

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



Ciências
ULisboa

**Estudo de uma habitação sustentável baseado em materiais de
construção natural**

Ana Filipa Oliveira Barros

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada por:
Miguel Brito
José Mário Pó

2016

Agradecimentos

Este trabalho não teria sido possível sem a preciosa ajuda de todos aqueles que participaram de uma forma ou de outra para o seu desenvolvimento.

Em primeiro lugar, quero agradecer aos meus orientadores José Mário Pó e à Sara Freitas por todo o apoio, compreensão e tempo que despenderam a ajudar-me e a oportunidade que me deram de trabalhar num tema que sempre me interessou. A vossa orientação ao longo deste trabalho foi muito importante para mim.

Quero também agradecer ao meu orientador Miguel Brito, por permitir que trabalhasse este tema.

Gostaria de agradecer ao Kent Queener e à sua família que tão bem nos receberam durante a visita ao local de estudo, foi, sem dúvida, uma ótima experiência. Os ensinamentos, opiniões e conselhos dados foram muito importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais pela oportunidade que me deram de estudar e por me apoiarem nas minhas decisões.

À minha irmã que sempre foi um exemplo para mim, sempre me incentivou e apoiou durante todas as etapas da minha vida.

Ao André Borges por me ter ajudado neste trabalho com conselhos, opiniões e muita motivação.

À Patrícia Cardoso por me apoiar não só neste trabalho, como em todos os momentos que precisei.

À Lurdes e ao Fernando que me ajudaram muito ao longo destes anos de faculdade e principalmente durante o período de desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus amigos e colegas de faculdade, sem os quais o percurso académico não teria sido o mesmo. Obrigada por estarem sempre comigo nos bons e nos maus momentos.

Por fim, quero agradecer ao Tiago pela paciência que tem tido deste o início da faculdade e principalmente durante o desenvolvimento deste trabalho. Obrigada pelo apoio, carinho e amizade.

Resumo

As alterações climáticas são um tema cada vez mais preocupante, sendo necessário tomar medidas que reduzam o consumo de energia e consequentemente a emissão de gases de efeito de estufa. O sector dos edifícios e especificamente a sua construção tem um grande peso no consumo global de energia. É, por isso, fundamental encontrar soluções que permitam diminuir a energia inerente à construção, bem como, os consumos de energia nos edifícios.

A construção sustentável pressupõe a utilização de materiais naturais, existentes perto do local de construção, permitindo assim, diminuir não só a energia de produção, mas também a energia de transporte dos materiais. A simulação energética é igualmente importante para diminuir o consumo, uma vez que permite analisar o efeito de medidas de construção e uso de energia no consumo total do edifício.

Tendo em conta este contexto, neste trabalho pretende-se estudar um edifício de habitação sustentável através de um caso de estudo. Portanto, será feita a otimização do edifício em vários parâmetros: escolha de materiais, em particular *bale cob* ou fardos de palha, pé direito, área de envidraçado, inclinação do telhado, tamanho da pala e produção de energia. Para esta otimização foi escolhido o *software* Rhinoceros 5 para desenho e as extensões do Grasshopper, DIVA e Archsim para a simulação energética.

Os resultados obtidos mostram que relativamente à construção, os dois materiais possuem comportamentos térmicos muito semelhantes, por isso a sua escolha pode ser feita relativamente aos restantes parâmetros. O pé direito que apresentou melhores resultados a nível da climatização foi de 2 metros. Quanto à área de envidraçado (otimização com o Galapagos), esta deve ser muito elevada na orientação a Sul, mas praticamente desprezável nas restantes orientações, por forma a reduzir a energia de aquecimento e iluminação no período de Inverno. A inclinação do telhado de 59° permite a produção máxima de energia solar fotovoltaica no período de Inverno. No entanto, uma pala a Sul com comprimento de 2 metros reduz bastante o arrefecimento no Verão. Por fim, nenhum dos cenários de produção de energia permite suprir o consumo durante todo o ano. Portanto, existe a necessidade de produção suplementar de energia renovável ou diminuição dos consumos no período de Inverno, para que o edifício seja totalmente sustentável.

Palavras-chave: Construção sustentável, Materiais naturais, Simulação energética, Rhinoceros 5, DIVA e Archsim.

Abstract

The climate change is an increasingly worrying theme, therefore it is necessary to take measures to reduce energy consumption and consequently the emission of greenhouse gases. The buildings sector and specifically your construction has a large importance in the global energy consumption. It is, for that matter, essential to find solutions to reduce the energy intrinsic to the construction, as well energy consumption in buildings.

Sustainable construction requires the use of natural materials, existing nearby the construction site, allowing the reduction not only of the energy production, but also the energy associate with the transport of materials. The energy simulation is also important to reduce consumption, for it allows to analyze the effect of construction measures and energy use in the total building consumption.

Following this context, this work aims to study a sustainable house through a case of study. Thus, it will be a building optimization work with various parameters: choice of materials, particularly bale cob or straw bales, height, glass area, roof inclination, blade size and energy production. In this optimization was chosen the Rhinoceros 5 for design and the extensions of Grasshopper, DIVA and Archsim for energy simulation.

The results shows that for construction, the two materials have very similar thermal behavior, so the choice can be made considering another parameters. The height that showed the best results in terms of climatization was 2 meters. Regarding the glass area (optimization with Galapagos), this should be very high in the south, but practically negligible in remaining directions to reduce heating and lighting in winter period. The 59° roof slope allows maximum production of photovoltaic solar energy in the Winter period. However, the existence of south shadow with 2 meters reduce the cooling in the summer. Finally, none of the energy production scenarios can compensate consumption during a year. Therefore, it is necessary the production of additional renewable power or having the consumption decreased in winter, for that the building is fully sustainable.

Keywords: Sustainable construction, Natural materials, Energy simulation, Rhinoceros 5, DIVA e Archsim.

Conteúdo

Resumo	i
Abstract	iii
Índice de figuras	vii
Índice de tabelas	viii
Abreviações	ix
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação e objetivos	3
2. Metodologia	3
2.1 Ferramentas de simulação de energia	5
2.2 Objetivos e componentes	13
2.2.1 Parâmetros de entrada da simulação	13
3. Caso de estudo	25
3.1 Local de estudo	25
3.2 Dados climáticos do local	26
3.4 Visita ao local de estudo	33
3.5 Materiais naturais considerados	36
3.5.1 Granito	36
3.5.2 Fardos de palha	36
3.5.3 Cob	37
3.5.4 Bale cob	38
3.6 Edifício de estudo	40
4. Resultados	43
4.1 Consumo de energia	43
4.2 Mapas de irradiação	44
4.3 Escolha entre bale cob e fardos de palha	46
4.4 Escolha do pé direito do piso 1 do edifício	47
4.5 Otimização da área de envidraçado	48
4.6 Otimização da inclinação do telhado	50
4.7 Otimização da pala	52
4.8 Consumo e produção de energia	52
5. Conclusões e trabalho futuro	57
6. Bibliografia	61

Índice de figuras

Figura 1.1- Impacto dos edifícios nos Estados Unidos (Adaptado de: EPA, USGBC).....	1
Figura 1.2- Consumo de energia final por setor em 2012 (Fonte: DGEG).	2
Figura 2.1- Esquema de funcionamento do Ladybug.....	8
Figura 2.2- Esquema de funcionamento do Honeybee.....	8
Figura 2.3- Ambiente de trabalho do Grasshopper.	9
Figura 2.4- Aspeto das ferramentas utilizadas e das suas interligações.	13
Figura 2.5- Componentes do DIVA para produção de mapas de radiação.	14
Figura 2.6- Componentes do Archsim e Grasshopper para cálculo da produção de energia solar fotovoltaica.....	14
Figura 2.7- Edifício de estudo.	15
Figura 2.8- Componentes do Archsim para definição da geometria do piso 1 e características correspondentes.....	15
Figura 2.9- Componentes do Archsim para definição da construção das superfícies do piso 1.....	16
Figura 2.10- Componentes do Archsim para definição das cargas da zona térmica.	17
Figura 2.11- Calendários diários de utilização do edifício.....	18
Figura 2.12- Componentes do Archsim para definição dos calendários de utilização.....	18
Figura 2.13- Componentes do Archsim para definição dos critérios de climatização e ventilação.	19
Figura 2.14- Componentes do Archsim para definição do uso de AQS.....	19
Figura 2.15- Componentes do Archsim para definição da janela e características correspondentes. ...	19
Figura 2.16- Componentes do Archsim para definição dos objetos fronteira, modelo e simulação.	20
Figura 2.17- Componentes do Archsim e Grasshopper para visualização dos resultados.	21
Figura 2.18- Funcionamento da componente Galapagos para otimização.	22
Figura 2.19- Função Galapagos: a) Galapagos Editor; b) janela Solvers.....	23
Figura 2.20- Funcionamento da componente Galapagos para otimização.	23
Figura 3.1- Local de estudo (Google Earth).	25
Figura 3.2- Perfil de altitude no edifício de estudo (Google Earth).	26
Figura 3.3- Diagrama de extremos e quartis.	27
Figura 3.4- Diagrama de extremos e quartis dos dados da temperatura do local.	27
Figura 3.5- Diagrama de extremos e quartis dos dados de humidade relativa do local.	28
Figura 3.6- Rosa do vento do local de estudo.	28
Figura 3.7- Diagrama de extremos e quartis dos dados de velocidade do vento do local.	29
Figura 3.8- Rosa de radiação.....	29
Figura 3.9- Diagrama de extremos e quartis dos dados de irradiação global no plano horizontal (incluindo período noturno).....	30
Figura 3.10- Precipitação horária referente ao ano de 2010.....	30
Figura 3.11- Diagrama de extremos e quartis dos dados de precipitação referente ao ano de 2010.	31
Figura 3.12- Representação do edifício de estudo e envolvente (plano superior) e fotografia do local (plano inferior).	32
Figura 3.13- Representação do edifício e envolvente (vista Norte).	32
Figura 3.14- Processo “manual” de produção de cob: a) terra e argila; b) e c) mistura de terra e argila; d) adição de água à mistura; e) junção de palha à mistura; f) aplicação na estrutura.....	33
Figura 3.15- Fotografia fisheye e diagrama solar anual.	34
Figura 3.16- Vista superior do local de estudo com indicação da árvore analisada (amarelo).	34
Figura 3.17- Geometrias de árvores testadas: a) árvore real; b) paralelepípedo; c) pirâmide e paralelepípedo; d) superfícies retangulares; e) superfícies triangulares e retangulares.....	35

Figura 3.18- Construção em granito: a) muro [63]; b) casa com paredes de granito [64]; c) exterior de uma habitação em Monsanto (Idanha-a-Nova)[65].	36
Figura 3.19- Construção em palha: a) exterior de um edifício; b) construção de paredes c) vista exterior da construção [66].	36
Figura 3.20- Construção em cob: a) exterior de uma habitação; b) construção de paredes; c) casa-de-banho [67].	37
Figura 3.21- Construção com bale cob: a) acabamento com cob [68]; b) processo de construção; c) exterior de uma habitação [69].	38
Figura 3.22- Representação do edifício de estudo.	40
Figura 3.23- Planta do rés-do-chão do edifício.	40
Figura 3.24- Planta do piso 1 do edifício.	41
Figura 4.1- Consumo diário de energia.	43
Figura 4.2- Distribuição do consumo anual.	44
Figura 4.3- Mapa de irradiação do local de estudo (vista Norte).	44
Figura 4.4- Mapa de irradiação do local de estudo (vista Sul).	45
Figura 4.5- Mapa de irradiação do local de estudo (solstício de Verão- 21 de Junho).	45
Figura 4.6- Mapa de irradiação do local de estudo (solstício de Inverno- 21 de Dezembro).	46
Figura 4.7- Energia anual de climatização com bale cob.	46
Figura 4.8- Energia anual de climatização com fardos de palha.	47
Figura 4.9- Energia necessária para climatização para as diferentes medidas de pé direito do piso 1.	47
Figura 4.10- Variação da produção anual com o ângulo de inclinação do telhado.	50
Figura 4.11- Variação da produção no Inverno com o ângulo de inclinação do telhado.	51
Figura 4.12- Esquema da inclinação e área de painéis do telhado a Sul.	51
Figura 4.13- Consumo de energia diário após otimização.	53
Figura 4.14- Distribuição do consumo após otimização.	53
Figura 4.15- Produção de energia solar fotovoltaica ao longo do ano para os três cenários.	54
Figura 4.16- Produção e consumo de energia	55

Índice de tabelas

Tabela 2.1- Listagem das ferramentas de simulação de energia consideradas.	11
Tabela 2.2- Equipamentos elétricos.	17
Tabela 3.1- Comparação dos resultados para as diferentes geometrias das árvores.	35
Tabela 3.2- Propriedades dos materiais naturais considerados.	39
Tabela 4.1- Resultados da otimização da área de envidraçado.	50
Tabela 4.2- Produção anual e no Inverno para os melhores ângulos de inclinação.	51
Tabela 4.3- Energia consumida no Verão vs comprimento da pala a Sul.	52

Abreviações

AQS	Águas quentes sanitárias
CO ₂	Dióxido de carbono
CO	Monóxido de carbono
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
EPA	Agência do Ambiente dos Estados Unidos da América
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
LCOE	<i>Levelized Cost Of Electricity</i>
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
NO _x	Óxidos de azoto
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
RPH	Renovações Por Hora
SO _x	Óxidos de enxofre
USGBC	Conselho de construção sustentável dos Estados Unidos da América

1. Introdução

1.1 Enquadramento

As preocupações relativas ao ambiente têm assumido um papel importante na sociedade, nomeadamente nos últimos anos. As alterações climáticas são tão evidentes que não é possível negar que é fundamental tomar medidas que conduzam à diminuição da emissão dos gases de efeito de estufa. Nesta linha de pensamento, os países têm unido esforços para encontrar consensos e metas para desacelerar, ou mesmo limitar as alterações climáticas.

Ao nível da União Europeia, os estados-membros acordaram em cumprir a meta “20-20-20” que deve ser cumprida até 2020. Os países que assinaram o acordo, entre eles Portugal, comprometeram-se a uma redução de 20% das emissões de gases com efeito de estufa relativamente aos níveis de 1990, assegurar uma quota 20% de energia proveniente de fontes renováveis no consumo final bruto e ainda uma redução de 20% do consumo de energia primária relativamente à projeção do consumo de 2020. Por outro lado, para o horizonte de 2030, as metas da União Europeia para Portugal são mais exigentes: uma redução de 40 % das emissões de gases de efeito de estufa, 27% de energia renovável no consumo de energia, aumento da eficiência energética em 27%, bem como um aumento de 15% nas interligações elétricas [1].

A OCDE estima que os edifícios em países desenvolvidos são responsáveis por mais de 40% do consumo de energia durante a sua vida, incluindo a produção de matérias-primas, construção, operação, manutenção e desativação (ver Fig. 1.1). Como metade da população mundial vive em ambiente urbano, a construção de edifícios mais sustentáveis é uma medida fundamental para assegurar a viabilidade ambiental, económica e social a longo prazo.

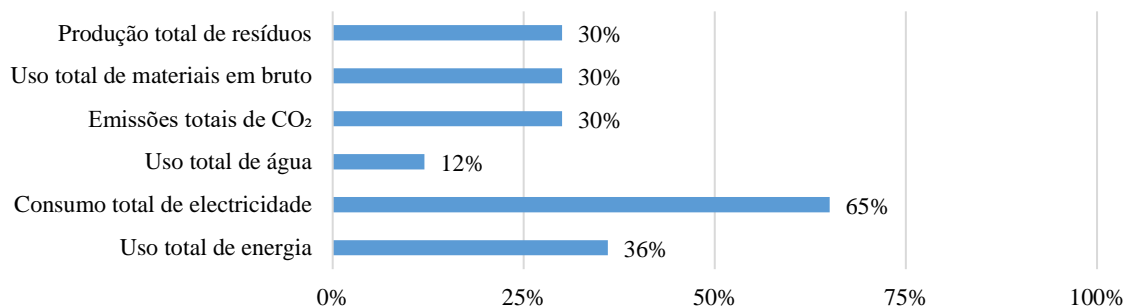


Figura 1.1- Impacto dos edifícios nos Estados Unidos (Adaptado de: EPA, USGBC) [2].

A energia consumida durante a extração, o processamento e o transporte de materiais de construção representa uma grande fatia da energia primária consumida [3]. Por outro lado, a construção de edifícios com materiais existentes no local pode ser uma boa forma de reduzir o consumo de energia inerente à construção e por sua vez, o impacto ambiental associado [3]. Além disso, permite a valorização do património e afirmação da identidade e cultura locais associadas a algumas formas de turismo, permitindo o desenvolvimento local. Facilita ainda a utilização de técnicas tradicionais de construção desenvolvidas ao longo de gerações na necessidade de obediência às regras de adaptação a um clima específico [4]. No entanto é necessário garantir a durabilidade da construção numa escala superior a uma geração [5].

Capítulo 1- Introdução

O crescimento urbano e as infraestruturas associadas produzem um grande impacto no ambiente, quer ao nível do uso de materiais quer ao nível do consumo de matérias-primas e energia. Estima-se que a indústria da construção é responsável por 7% das emissões globais de CO₂ [5]. É necessária uma mudança nesta indústria, que assente em alguns pontos, tais como a utilização de materiais naturais existentes no local de construção, que necessitem de uma baixa energia para a sua exploração e processamento, bem como, aumentar a durabilidade dos materiais, de modo a minimizar a necessidade de manutenção e substituição.

O consumo de energia no sector doméstico também possui uma elevada importância, sendo responsável por 17% do consumo de energia em Portugal (ver Fig. 1.2). Por esta razão, torna-se importante optar por uma construção que também permita reduzir o consumo do edifício durante a sua utilização.

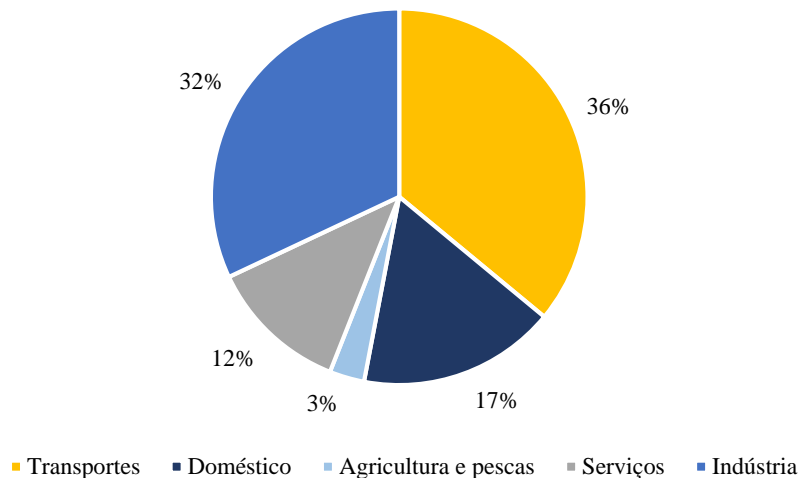


Figura 1.2- Consumo de energia final por setor em 2012 (Fonte: DGEG [6]).

A construção sustentável pretende atender às necessidades atuais inerentes à habitação, trabalho e infraestruturas sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades [7]. A construção e operação de edifícios tem vários impactos diretos e indiretos sobre o ambiente, a sociedade e a economia, normalmente denominados os três P's (*People, Planet, Pocketbook*), sendo fundamental equilibrar as necessidades destes parâmetros, por forma a possibilitar uma construção que favoreça as três partes envolvidas.

A construção sustentável permite reduzir o uso de recursos fundamentais como a energia, água e matérias-primas. Por sua vez, previne a degradação ambiental causada pela construção convencional, garantindo uma construção habitável, confortável e segura [8]. Este tipo de construção incorpora eficiência económica, desempenho e responsabilidade ambiental, envolvendo questões como conceção e gestão de edifícios, desempenho de materiais, tecnologia e processos de construção, energia e eficiência de recursos, operação e manutenção, produtos e tecnologias, bem como monitorização a longo prazo [7].

Estudo de uma habitação sustentável baseado em materiais de construção natural

Os materiais naturais são recursos renováveis, ou seja, podem ser repostos por processos naturais a um ritmo igual ou superior ao consumo [9]. Por isso, existem vários materiais naturais que são apontados como uma boa alternativa aos materiais de construção convencionais, tais como *cob*, fardos de palha, taipa, madeira, entre outros. No entanto, a aplicação de materiais naturais na construção de edifícios não é possível em todos os locais. No cenário urbano este tipo de construção pode ser difícil de efetuar, podendo ser adequado a locais com baixa densidade populacional, tal como o meio rural.

O Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) define os requisitos para os edifícios de habitação (novos ou sujeitos a intervenção), bem como os parâmetros e metodologias de caracterização do desempenho energético [10]. Estabelece mais especificamente, os requisitos de qualidade térmica da envolvente nos novos edifícios e nas intervenções em edifícios existentes, os requisitos de ventilação dos espaços, impondo um valor mínimo de cálculo para a taxa de renovação do ar, bem como os valores de necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento do edifício [11]. O Sistema de Certificação energética dos edifícios (SCE) que integra o REH visa assegurar e promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios, impondo a obrigatoriedade de certificação energética. No entanto, sendo a construção com materiais naturais emergente ao nível da larga escala, a certificação energética pode ser morosa, existindo a possibilidade de ser difícil comprovar as propriedades térmicas destes materiais.

1.2 Motivação e objetivos

O objetivo deste trabalho é estudar um edifício de habitação, no qual se pretende realizar algumas alterações para o tornar num edifício mais sustentável. É dada especial ênfase à análise dos materiais naturais, existentes perto do local de estudo e do seu comportamento térmico, por forma a reduzir o impacto ambiental do edifício. Pretende-se ainda dimensionar o edifício de forma otimizada, de modo a minimizar o consumo de energia elétrica e maximizar a produção de energia renovável.

2. Metodologia

Neste capítulo foi explorado o uso das ferramentas de simulação energética para calcular o consumo e a produção de energia. Com o intuito de aferir qual a ferramenta de simulação existente mais adequada ao caso de estudo (que será apresentado no capítulo 3), foi realizada uma revisão das ferramentas existentes (secção 2.1). Na secção 2.2, a ferramenta escolhida é aplicada ao edifício e envolvente, os componentes utilizados na simulação energética são explicados detalhadamente, nomeadamente os *inputs* e *outputs*.

2.1 Ferramentas de simulação de energia

As ferramentas de simulação de energia podem ter um importante contributo para reduzir o gasto de energia em edifícios. Cerca de um terço do consumo de energia em edifícios é usado para aumentar o conforto térmico das habitações e para a iluminação [12], sendo os restantes dois terços repartidos por equipamentos elétricos, aquecimento de águas, entre outros [13]. A simulação de energia, permite determinar o consumo de energia (iluminação, equipamentos, climatização, etc.), possibilitando assim analisar as melhores opções para reduzir esse consumo. Esta secção apresenta algumas das ferramentas de simulação de energia consideradas para o estudo em questão. Neste estudo pretende-se uma ferramenta que permita a simulação de energia com base em dados climáticos, possibilitando uma interface automática entre o *software* de desenho do edifício e análise de produção de energia renovável.

EnergyPlus [14]

O EnergyPlus é um programa de simulação de gestão de energia nos edifícios do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América. É usado por engenheiros, arquitetos e investigadores para modelar o uso de energia e água nos edifícios. Permite modelar a carga de aquecimento, arrefecimento, iluminação, ventilação, bem como outros fluxos de energia, e a utilização da água. Possui ainda várias funcionalidades tais como: tempo de análise inferior a uma hora, sistemas modulares, e a possibilidade de integração de balanço térmico de simulação diferenciada para cada zona do fluxo de ar, do conforto térmico, ventilação natural e sistemas fotovoltaicos. Baseia-se na descrição física do edifício por parte do utilizador, associada aos sistemas mecânicos e outros. Este modelo calcula as cargas de aquecimento e arrefecimento necessárias para manter os *set-points* de controlo térmico, as condições do sistema secundário *HVAC* e o consumo de energia do equipamento da instalação principal.

As funcionalidades mais importantes do EnergyPlus são as seguintes:

- Solução integrada e simultânea em que a resposta do edifício e os sistemas primário e secundário estão fortemente interligados (realização de iteração quando necessário);
- Condução transiente de calor através de elementos de construção, como paredes, telhados, pavimentos, usando funções de transferência de calor por condução;
- Intervalo de tempo sub-horário para interação entre zonas térmicas e o ambiente, definido pelo usuário, passos de tempo variáveis para interações entre zonas térmicas e os sistemas de *HVAC* (variável automaticamente para garantir a estabilidade da solução);
- Ficheiros de *input* e *output* em formato *ASCII*, baseados em dados meteorológicos;
- Modelos de conforto térmico baseados na atividade, temperatura de bolbo seco, humidade, entre outros;

Capítulo 2- Metodologia

- Balanço térmico baseado na solução técnica para as cargas térmicas que permite o cálculo simultâneo da transferência de calor por convecção e radiação, na superfície interior e exterior durante cada passo de tempo;
- Melhoria do modelo de transferência de calor do solo, através de *links* para modelos tridimensionais de diferenças terrestres e técnicas analíticas simplificadas;
- Modelo combinado da transferência de calor e massa;
- Melhoria do cálculo da radiação solar difusa em superfícies inclinadas;
- Cálculos avançados dos envidraçados, incluindo persianas e vidros controláveis, balanços de calor *layer-by-layer* que permitem estabelecer a energia solar absorvida pelas janelas, disponibilizando ainda uma biblioteca de informação do desempenho para muitas janelas disponíveis no mercado;
- Controlo da iluminação natural, incluindo cálculos da iluminância interior, simulação e controle do brilho, bem como o efeito da redução da iluminação artificial na climatização;
- Cálculos da poluição atmosféricas (CO₂, SO_x, NO_x, CO, partículas em suspensão e hidrocarbonetos) no local de estudo e produção de energia.

TRNSYS [15]

O TRNSYS (*TRaNsient SYstems Simulation program*) é um programa de simulação de sistemas transientes com uma estrutura modular, em que o utilizador especifica os componentes que constituem o sistema e o modo como estão ligados. A biblioteca do TRNSYS inclui muitas das componentes encontradas frequentemente nos sistemas térmicos e elétricos como componentes de entrada comuns, nomeadamente dados meteorológicos ou outros dados temporais que afetam os componentes e os resultados de saída. A sua natureza modular permite uma maior flexibilidade e facilita a adição de modelos matemáticos que não estão incluídos na sua biblioteca por defeito. Este programa é adequado para análises detalhadas de qualquer sistema cujo comportamento depende do tempo. Tornou-se, por isso, um *software* de referência para investigadores e engenheiros em todo o Mundo, sendo aplicável a sistemas solares (térmicos e fotovoltaicos), edifícios de baixo consumo de energia, sistemas *HVAC*, sistemas de energias renováveis, cogeração e ainda células de combustível. Este programa possui ainda várias extensões que permitem criar a envolvente de um edifício multi-zona e realizar a sua simulação, permitindo editar manualmente os ficheiros de entrada. O TRNSYS desenvolve e resolve simulações numa abordagem em “caixa preta”, ou seja, a saída de uma componente pode ser enviada para a entrada de outro componente (substituição sucessiva transiente).

OpenStudio [16]

O OpenStudio é um programa desenvolvido pelo Departamento de Energia do Laboratório Nacional dos Estados Unidos da América (*Office of Energy Efficiency and Renewable Energy*). É uma plataforma gratuita com uma coleção de ferramentas para modelar a energia de um edifício completo, usando o EnergyPlus e realizar uma análise avançada da radiação, usando o *software* Radiance. O OpenStudio inclui várias interfaces gráficas e um *kit* de desenvolvimento do *software*. Permite ao utilizador criar a geometria de uma forma rápida, através das ferramentas de desenho existente e integração com outros *softwares*. Esta ferramenta permite gerir as simulações e fluxos de trabalho, possibilitando o acesso a arquivos de saída através de uma interface gráfica. Possui ainda um visualizador de resultados que permite a navegação, construção de gráficos e comparação com os dados de saída do EnergyPlus.

Green Building Studio [17]

O Green Building Studio é um *software* de análise de energia que permite aos arquitetos e designers analisar o edifício como um todo, otimizar o consumo de energia e trabalhar em direção a projetos de construção de balanço zero. É um programa baseado na eficiência energética que ajuda a atingir projetos de construção sustentável com rapidez e precisão, pois possui ferramentas de energia e análise de carbono.

As principais funcionalidades do Green Building Studio são as seguintes:

- Análise da energia de construção como um todo: possibilidade de projeções de custos de energia que ajudam nas decisões de *design* e análise financeira, através do estudo de todos os sistemas que consomem energia. Tem em consideração o tipo de construção e localização do edifício, por forma a completar um modelo analítico de energia;
- Dados meteorológicos detalhados, permitindo o acesso a muitas estações meteorológicas virtuais compiladas;
- Relatórios de emissão de carbono, fornecendo as emissões de carbono para quase todos os parâmetros do edifício;
- Análise do uso de água e os custos associados, pois permite prever o uso de água dentro e fora do projeto de construção;
- Análise da ventilação natural, estimando a necessidade de arrefecimento mecânico e as possíveis horas de ventilação natural;

VELUX Energy and Indoor Climate Visualizer [18]

O *software* VELUX Energy and Indoor Climate Visualizer é utilizado para avaliar o desempenho de habitações unifamiliares relativamente à energia, ventilação e climatização. Permite estudar o efeito das janelas e proteção solar no consumo de energia para aquecimento, arrefecimento, ventilação e iluminação. Com base na disponibilidade de iluminação natural, esta ferramenta calcula a energia elétrica necessária para a iluminação artificial. O VELUX Energy and Indoor Climate Visualizer possibilita inserir a orientação e localização do edifício, possuindo uma biblioteca de construções que permite a sua aplicação a vários tipos de edifícios. Os resultados da simulação são resumidos num relatório que contém figuras de desempenho e orientações por escrito que facilitam a comparação de resultados entre geometrias de construção, diferentes opções de janelas, vidros e sombreamento.

O VELUX Energy and Indoor Climate Visualizer está disponível numa versão profissional gratuita que permite importar a geometria a partir de vários formatos de modelos 3D.

IDA ICE [19]

A ferramenta IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) analisa o modelo de construção, os seus sistemas e controladores, garantindo o menor consumo de energia e o melhor conforto possível. Permite uma simulação detalhada de todo o ano e por zona, estudando as condições interiores e o consumo de energia de todo o edifício. Nesta ferramenta é possível inserir dados de clima, material de construção, sistemas especiais, entre outros.

O IDA ICE foi concebido para facilitar a construção e simulação de casos simples ou complexos, oferecendo ao utilizador bastante flexibilidade, uma vez que possibilita redefinir o modelo em etapas ao mesmo tempo que fornece *feedback* gráfico e escrito. Com esta ferramenta é possível alternar entre tarefas sem ser necessário mudar de programa.

Capítulo 2- Metodologia

Ladybug e Honeybee [20]

Ladybug e Honeybee são duas extensões do Grasshopper (integrado no Rhinoceros) que permitem ajudar os *designers* a criar uma arquitetura ambiental e consciente. A Ladybug (Figura 2.1) permite a importação e análise de dados meteorológicos *standards* no Grasshopper, bem como desenhar diagramas de trajeto do sol, rosa-dos-ventos e de radiação. Permite ainda personalizar os diagramas de várias formas, analisar a radiação, permitir o estudo das sombras e análise panorâmica. Por outro lado, a Honeybee (Figura 2.2) liga o Grasshopper ao EnergyPlus, Radiance, Daysim e OpenStudio para permitir a simulação de energia e iluminação natural do edifício. A Honeybee possui a maioria das funcionalidades das ferramentas de simulação enumeradas anteriormente, mas de uma forma paramétrica.

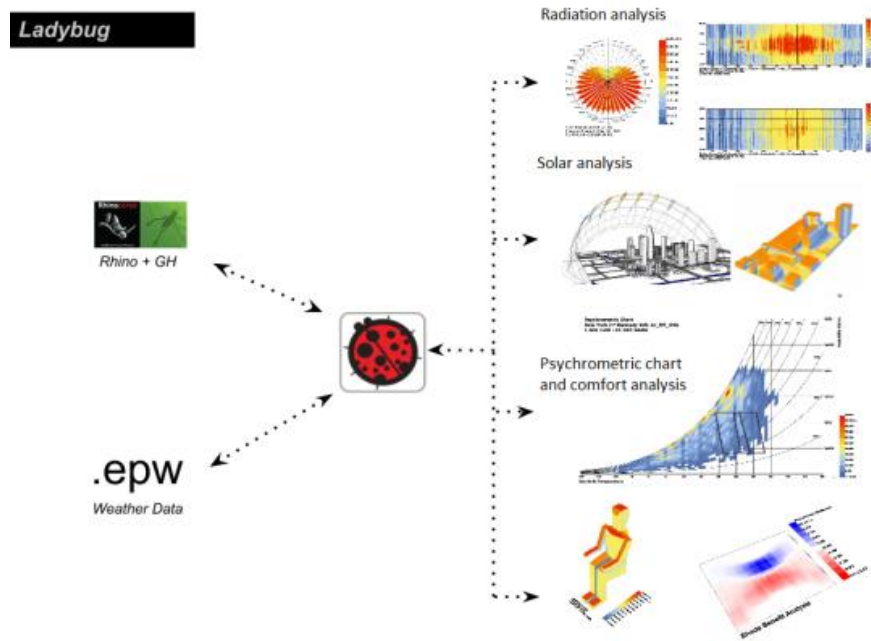


Figura 2.1- Esquema de funcionamento do Ladybug.

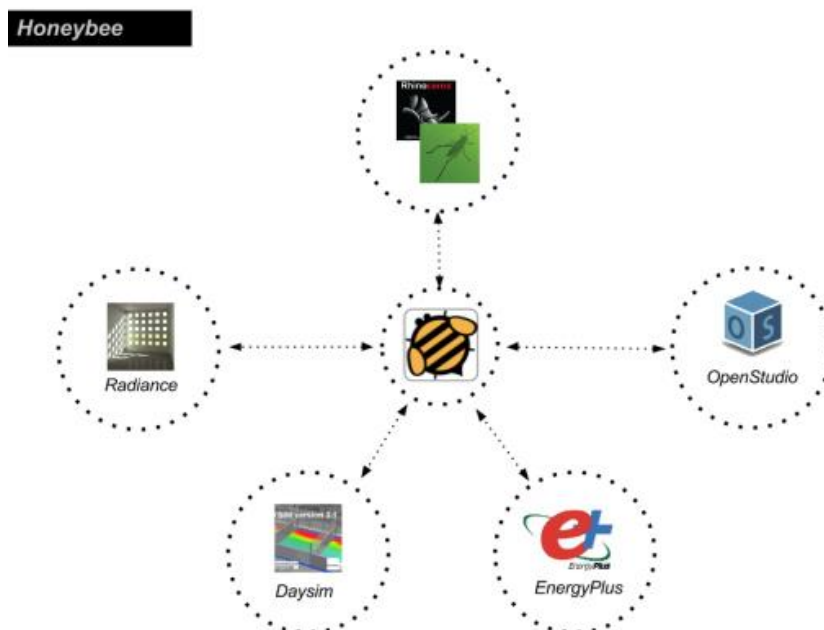


Figura 2.2 - Esquema de funcionamento do Honeybee.

Estudo de uma habitação sustentável baseado em materiais de construção natural

O Rhinoceros é um *software* de *design* que permite criar, editar, documentar, apresentar, animar e traduzir curvas *NURBS*¹, superfícies e sólidos, nuvens de pontos e malhas de polígonos [21]. Não existem limites para a complexidade, grau ou tamanho, além dos impostos pelo *hardware*, possuindo algumas características especiais tais como:

- Conseguir modelar qualquer forma em 3D;
- Possui a precisão necessária para projetar, criar o protótipo, analisar e fabricar qualquer objeto;
- Possui compatibilidade com todo o seu *software* de concepção, elaboração, CAM, engenharia, análise, animação e ilustração;
- É um *software* acessível, fácil de aprender e usar;
- É rápido, não sendo necessário nenhum *hardware* especial;
- Preço de compra acessível, sem necessitar de custos de manutenção;

O Grasshopper é um editor algoritmo gráfico totalmente integrado nas ferramentas de modelagem do Rhinoceros [22]. Ao contrário do script do Rhinoceros, o Grasshopper não requer nenhum conhecimento de programação, permitindo que os *designers* consigam construir geradores de formas do mais simples ao mais complexo.

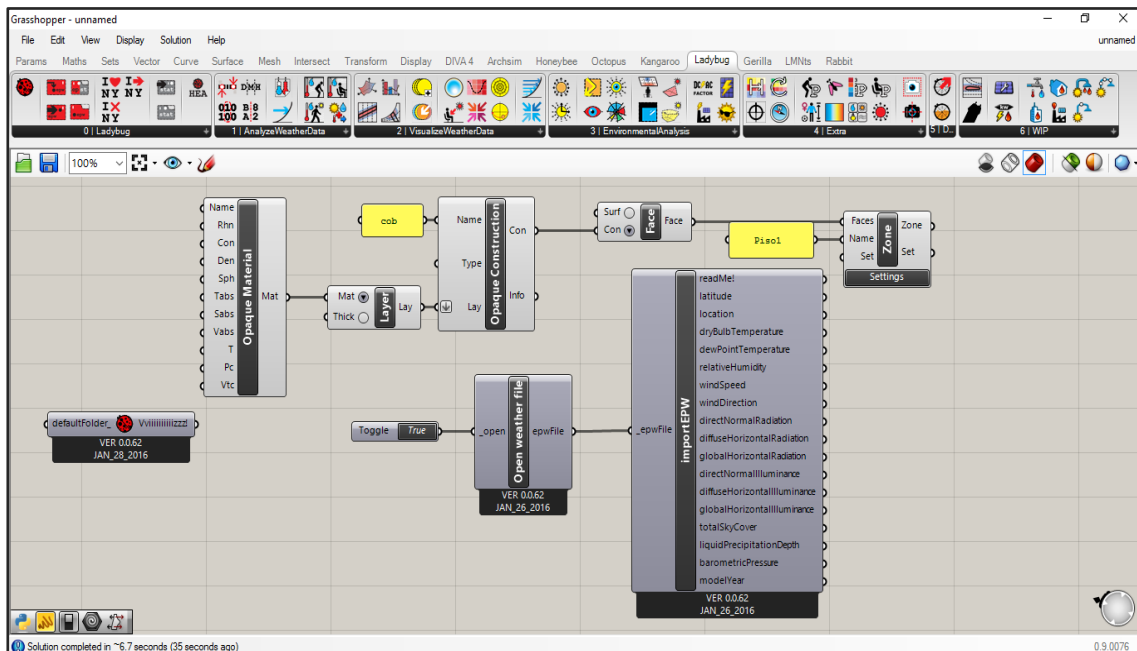


Figura 2.3- Ambiente de trabalho do Grasshopper.

¹ *NURBS*: *Non-Uniform Rational B-Splines* são representações matemáticas de geometria 3D, que conseguem descrever com precisão qualquer forma a partir de uma simples linha 2D. Devido à sua flexibilidade e precisão, os modelos *NURBS* podem ser utilizados em qualquer processo de ilustração e animação para fabrico.

Capítulo 2- Metodologia

DIVA [23] e Archsim [24]

O *software* DIVA também é uma extensão para o Grasshopper que permite a modelação energética, bem como o estudo da radiação. Foi inicialmente desenvolvido pela *Graduate School of Design at Harvard University*, mas atualmente é disponibilizado e desenvolvido pela *Solemma, LLC*. O DIVA permite realizar uma série de avaliações de desempenho ambiental dos edifícios individuais e da envolvente urbana, tais como mapas de radiação, medidas de iluminação natural baseadas em dados climáticos, análises com diferentes intervalos de tempo, cálculos de energia térmica e carga dividida por zona. Baseia-se no *software* Radiance criado entre 1985-1997 por Gregory Ward que permite prever os níveis de iluminação e aparência de um espaço antes da sua construção, no entanto, o DIVA é mais acessível e simples de utilizar.

O Archsim permite realizar simulações Energy Plus, exibindo-as simultaneamente no Rhinoceros e no Grasshopper, possibilitando a criação de modelos complexos de energia multi-zona, bem como, realizar a sua simulação e visualização dos resultados, sem necessitar de alternar ferramentas. Permite estudar a iluminação natural, sombreamento, ventilação natural e mecânica, redes de fluxo de ar, HVAC, produção de energia fotovoltaica e materiais de mudança de fase. É tipicamente utilizado para realizar uma exploração inicial do *design* dos edifícios, em que é possível testar: a forma do edifício, a proporção de envidraçado nas fachadas, sistemas de sombreamento e ventilação, entre outros parâmetros que podem ter influência no impacto e desempenho ambiental do edifício, bem como no seu conforto térmico. O Archsim possui ainda uma biblioteca com alguns dados *standard*, tais materiais, construções e perfis de utilização. Os dados de entrada da simulação são paramétricos e podem ser conectados a algoritmos de otimização existentes no Grasshopper.

UMI [25]

O *software* UMI foi desenvolvido pelo *Sustainable Design Lab* do Instituto de Tecnologia de *Massachusetts*. É uma extensão do Rhinoceros desenvolvida para arquitetos e agentes de planeamento urbano interessados em modelação do desempenho ambiental de ruas e cidades em relação à utilização de energia (quer na construção, quer no uso do edifício), mobilidade e potencial de iluminação natural.

Formsolver [26]



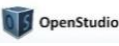







O Formsolver pode ser inserido no Grasshopper, permitindo otimizar o material e a forma do edifício por forma a diminuir o impacto ambiental. Possibilita uma modelação de energia simples pois incorpora “inteligência” que realiza o trabalho que seria necessário à tradicional modelação de energia. Esta ferramenta é útil a arquitetos, engenheiros, *designers* e construtores civis.

Outras ferramentas

Foram ainda consideradas outras ferramentas, tais como o PVsyst e o EnergyPlan. No entanto, o PVsyst é específico para o cálculo da produção fotovoltaica, não admitindo outras funcionalidades que são importantes para este trabalho. Por outro lado, o EnergyPlan é adequado à simulação do funcionamento dos sistemas nacionais de energia, incluindo os vários sectores de electricidade [27], mas não consumos específicos de uma habitação, que seria fundamental neste estudo. Além disso, o EnergyPlan não considera dados climáticos nem um edifício específico.

Estudo de uma habitação sustentável baseado em materiais de construção natural

Tabela 2.1- Listagem das ferramentas de simulação de energia consideradas.

Ferramentas de simulação de energia		Disponibilidade	Disponível para Windows	Escala do edifício	Interação desenho/simulação ²	Utilização de dados climáticos	Cálculo de consumos	Análise de radiação	Análise de ventilação natural	Produção de energia renovável
EnergyPlus		Gratuito	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
TRNSYS		1 ano de <i>trial</i>	✓	✓	-	✓	✓	-	✓	✓
OpenStudio		Gratuito	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✗
Green Building Studio		1 mês de <i>trial</i>	✓	✓	-	✓	✓	✗	✓	✓
Ladybug e Honeybee		Gratuito ³	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DIVA e ArchSim		Gratuito ⁴	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
UMI		Gratuito ³	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Formsolver		Pago	✓	✓	-	-	-	-	✗	✗
VELUX Energy and Indoor Climate Visualizer		Gratuito	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✗
IDA ICE		Gratuito ⁴	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗

² Por interação desenho/simulação entende-se que uma modificação no desenho produza uma alteração automática nos resultados da simulação e vice-versa, sem que seja necessário abrir ou fechar o programa.

³ Apesar de ser uma ferramenta gratuita é necessário instalar o Rhinoceros (pago) que possui um período de experiência de 3 meses.

⁴ Caso se considere licença de estudante.

Capítulo 2- Metodologia

Considerando o âmbito deste estudo e as funcionalidades das ferramentas de simulação apresentadas na Tabela 2.1, procedeu-se à escolha da ferramenta mais adequada aos objetivos.

O DIVA e o Archsim foram as ferramentas selecionadas, pelas seguintes razões:

1. Trata-se de uma extensão para Rhinoceros e Grasshopper que não necessita de conhecimentos de programação, sendo acessível a qualquer utilizador;
2. Possibilita inserir os dados climáticos do local;
3. Permite produzir mapas de radiação do edifício e da envolvente;
4. Possibilita que qualquer alteração realizada no desenho (na janela do Rhinoceros), possa alterar automaticamente os resultados da simulação, no Grasshopper;
5. Permite a simulação da produção de energia solar fotovoltaica.

Apesar desta ferramenta não ser gratuita existe a possibilidade de obter uma licença de estudante que não tem qualquer custo. O Rhinoceros também não é gratuito, mas possui um período de experiência de três meses.

Pressupostos das ferramentas escolhidas

O DIVA utiliza uma abordagem híbrida do método estocástico (Monte Carlo) e método determinístico, uma vez que é baseado no Radiance. O método utilizado começa num ponto de medição, geralmente um ponto de vista e traça raios de luz de trás para as fontes, ou seja, os emissores. Esta abordagem permite resultados bastante precisos num tempo razoável [28].

O Archsim executa a simulação no EnergyPlus, que assume um modelo do edifício baseado nos princípios fundamentais de balanço térmico [29].

2.2 Objetivos e componentes

Neste trabalho pretende-se dimensionar um edifício de habitação de forma otimizada de modo a torná-lo mais sustentável. Os parâmetros de otimização são: (1) escolha entre *bale cob* e fardos de palha como principal material constituinte das paredes; (2) escolha do pé direito do piso 1 do edifício; (3) área de envidraçado nas diferentes fachadas; (4) produção de energia fotovoltaica no telhado; (5) dimensões de uma pala a Sul.

Relativamente à escolha do material da parede a Oeste, Norte e Este do piso 1 (*bale cob* ou fardos de palha), esta será feita com base na energia elétrica gasta em climatização, ou seja, será escolhido o material com melhor comportamento térmico, que permita minimizar os consumos anuais elétricos de climatização. Do mesmo modo, a escolha do pé direito do piso 1 entre 2, 2.5 ou 3 metros, é feita com o objetivo de reduzir o consumo elétrico de climatização. No entanto, a área de envidraçado é otimizada por forma a reduzir não só a necessidade de aquecimento no Inverno, mas também o consumo de energia elétrica para iluminação, neste mesmo período. Relativamente à produção de energia fotovoltaica, o parâmetro a otimizar será a inclinação do telhado, em que será escolhido o ângulo que maximize a produção de energia fotovoltaica no Inverno, pois este é o período em que há menor disponibilidade de radiação solar. Por fim, a otimização das dimensões da pala a Sul será feita tendo em conta a redução dos consumos de energia para arrefecimento nos meses de Verão.

2.2.1 Parâmetros de entrada da simulação

Tal como foi mencionado na secção 2.1, as ferramentas de simulação a usar neste estudo são DIVA e o Archsim (versão 4.0.2.10). A Figura 2.4 apresenta o aspeto das ferramentas, incluindo as diversas funções (ou seja, as suas componentes) interligadas entre si. Seguidamente serão explicados em detalhe os parâmetros de entrada e de saída em cada um dos componentes utilizados nas simulações, sendo que não era do âmbito deste estudo avaliar os modelos por de trás de cada componente (que, tal como foi referido na secção 2.1, provêm do código EnergyPlus [30]).

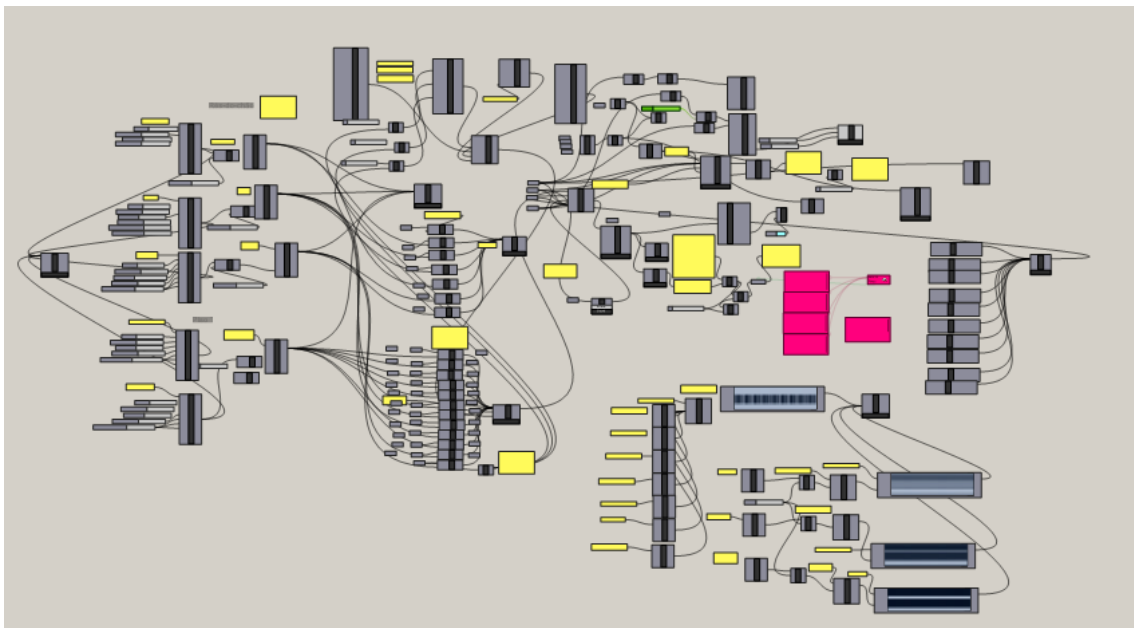


Figura 2.4- Aspeto das ferramentas utilizadas e das suas interligações.

Capítulo 2- Metodologia

Produção de mapas de radiação

Para criar os mapas de radiação do local de estudo, para que se possa averiguar o seu potencial fotovoltaico, utiliza-se o componente “Radiation Map” (4) do DIVA, presente na Figura 2.5. Como *input* principal deste componente têm-se as geometrias (1) que contém as superfícies e o tipo de material das mesmas, onde se pretende calcular a radiação incidente, as quais vão ser divididas numa grelha (2) cuja resolução pode ser imposta pelo utilizador. Outros *inputs* possíveis são os objectos que formam o contexto envolvente (3), a localização e o grau de detalhe da simulação. Para visualizar os mapas de radiação é necessário recorrer ao componente “Grid Viewer” (6), no qual é possível inserir a escala (5) do mapa de radiação.

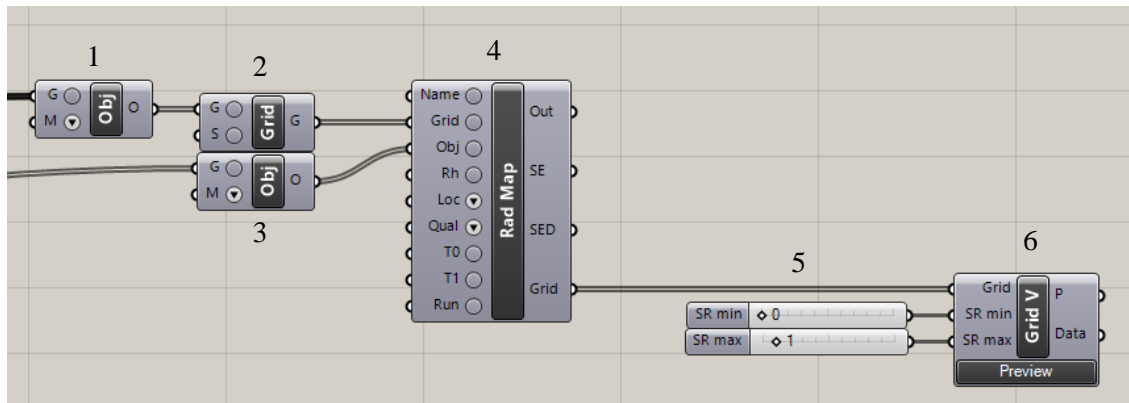


Figura 2.5- Componentes do DIVA para produção de mapas de radiação.

Produção de energia solar fotovoltaica

Para simular a energia produzida por painéis solar fotovoltaicos é apenas necessário utilizar dois componentes do Archsim (ver Fig. 2.6). O componente “PV” (7) no qual se insere a superfície onde se pretende instalar os painéis, a eficiência que se assume 0.15 e a fracção de área efectiva de painéis, considerada 0.8. Após a criação do painel solar, utiliza-se o componente “Runs a PV simulation” (8) no qual é necessário ligar os painéis criados pelo componente anterior, as geometrias contendo as sombras a considerar e o ficheiro climático do local. Para obter os valores de energia produzida pelos painéis selecciona-se o parâmetro de saída “Generator Produced DC Electric Energy”. Caso se pretenda visualizar os resultados, é necessário utilizar o componente “Load CSV” (9) e ligar o *output* dos resultados ao componente do Grasshopper “panel” (10).

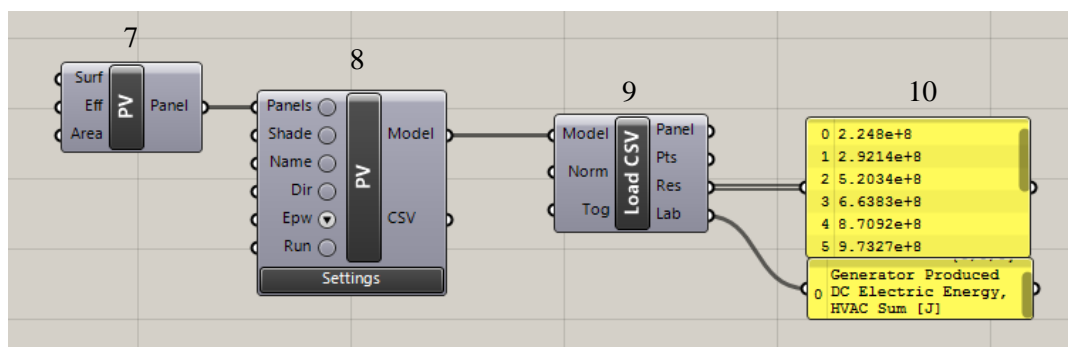


Figura 2.6- Componentes do Archsim e Grasshopper para cálculo da produção de energia solar fotovoltaica.

Simulação do consumo energético

O edifício de estudo possui uma área de pavimento de 97,5 metros quadrados e as medidas apresentadas na Figura 2.7. Dado que apenas o piso 1 será utilizado para habitação, a simulação de energia será efetuada para este piso. A sua geometria é introduzida por superfície (fachadas, piso e teto). Para este efeito utiliza-se o componente “Face” (12), presente na Figura 2.8 em que se insere a superfície através da componente “Brep” (11) e o tipo de construção.

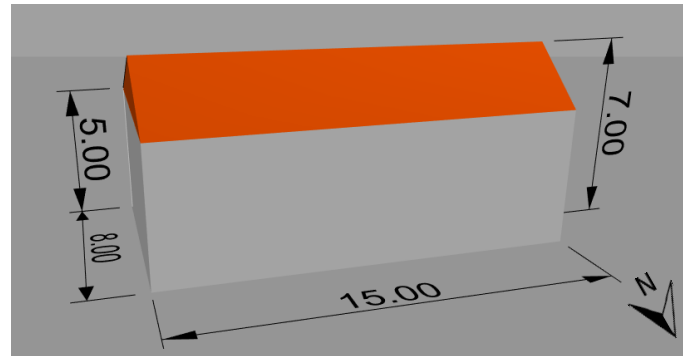


Figura 2.7- Edifício de estudo.

Após a definição da geometria do edifício é necessário criar as zonas térmicas do edifício (isto é, zonas com diferentes parâmetros térmicos), para esse efeito utiliza-se o componente “Zone” (15). Neste componente é necessário indicar a geometria do piso 1 do edifício (exposta anteriormente), a denominação da zona térmica e ainda as suas características (14). Neste trabalho considerou-se apenas uma zona térmica, ou seja, considerou-se as mesmas condições térmicas em todo o piso 1. Para inserir a denominação da zona térmica utiliza-se o componente do Grasshopper “panel” (13), que se encontra a amarelo na Figura 2.8.

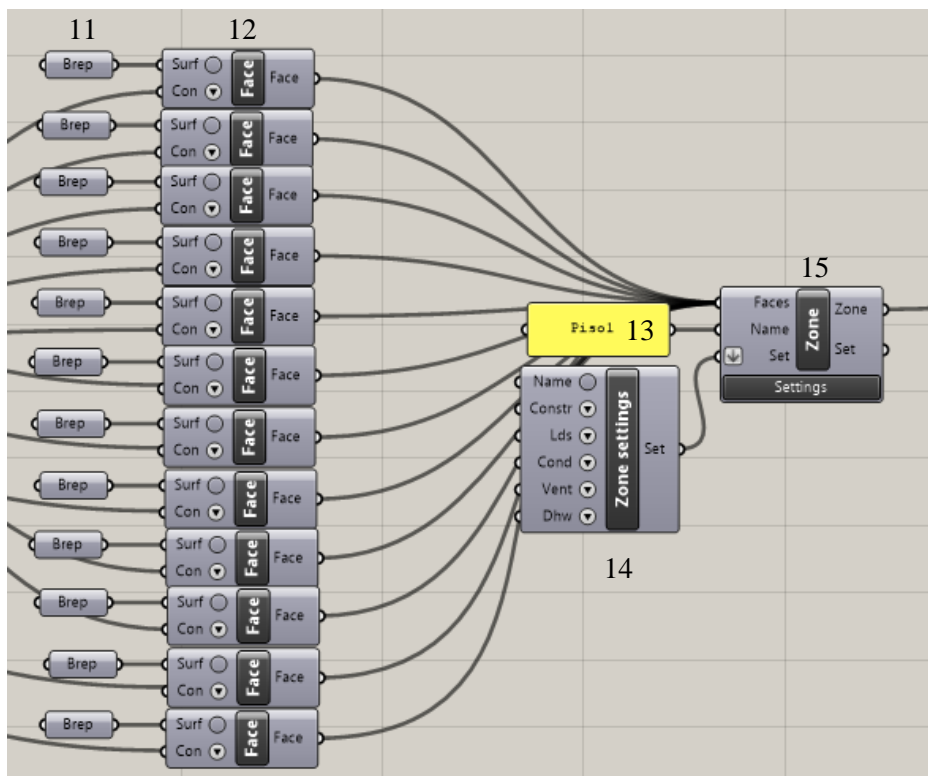


Figura 2.8- Componentes do Archsim para definição da geometria do piso 1 e características correspondentes.

Capítulo 2- Metodologia

A zona térmica possui várias características que precisam de ser definidas, nomeadamente o tipo de construção, as cargas existentes, critérios de climatização, características de ventilação e utilização de água quente. Para inserir estes parâmetros utiliza-se o componente “Zone settings” (14) que se liga ao componente apresentado anteriormente, tal como apresentado na Figura 2.8.

Por forma a definir o tipo de construção das superfícies utiliza-se o componente “Zone constructions”, (15) presente na Figura 2.9, no qual se insere a construção corresponde ao telhado, fachadas, pavimento e restantes superfícies, caso existam. É ainda necessário atribuir um nome ao tipo de construção para se distinguir das restantes.

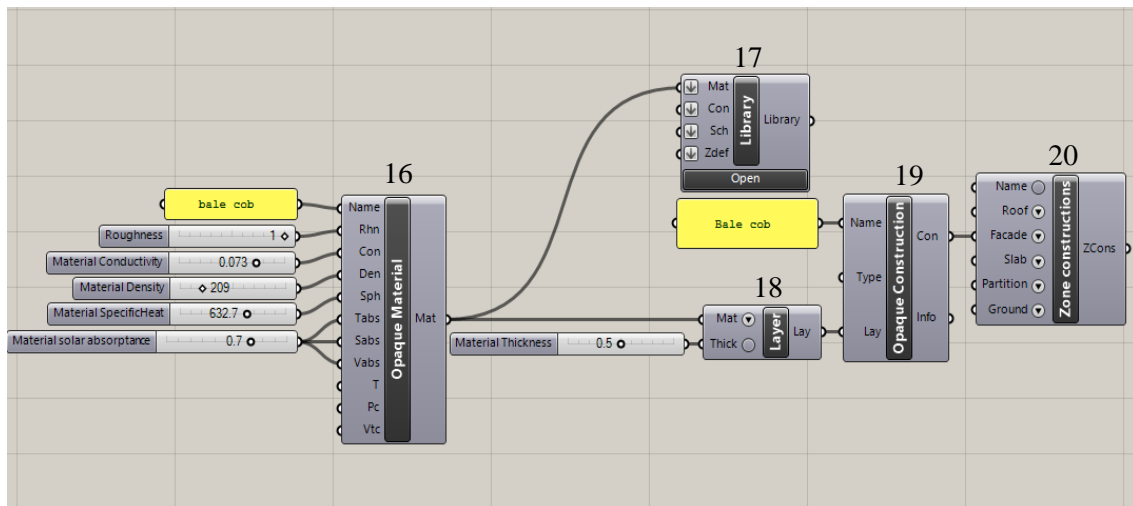


Figura 2.9- Componentes do Archsim para definição da construção das superfícies do piso 1.

Para definir o tipo de construção das superfícies opacas (telhado, fachadas e pavimento) foi utilizado o componente “Opaque Construction” (19) no qual é necessário definir a denominação da superfície, a categoria da superfície (entre fachada, pavimento interior, pavimento exterior, telhado, entre outros) e as camadas (*layers*) que constituem as superfícies (18), atribuindo-se o material e a espessura. Por fim, é necessário acrescentar o tipo de construção criada à biblioteca (17) para ser possível utilizar posteriormente.

Para inserir o material das superfícies é necessário utilizar o componente “Opaque Material” (16), presente na Figura 2.9, no qual se atribui as características do material, nomeadamente, o nome, rugosidade (numa escala de 0 a 5, em que valor 0 significa que o material é muito rugoso enquanto o valor 5, indica que o material é muito suave), condutividade, densidade, calor específico, bem como, absorvância térmica, solar e visível. Tal como anteriormente, é necessário adicionar o material definido à biblioteca.

Estudo de uma habitação sustentável baseado em materiais de construção natural

No que toca às cargas existentes na zona térmica utiliza-se o componente “Zone loads” (21) presente na Figura 2.10, no qual se insere o valor das cargas e o respetivo calendário. Foram consideradas as seguintes cargas:

- Pessoas: considerou-se que o edifício é habitado por três pessoas, no entanto as unidades do valor de entrada pedido são pessoas por metro quadrado. A área do piso 1 é de 97.5 m², por isso o valor atribuído à ocupação foi de 0.0308 pessoas/m²;
- Iluminação: relativamente aos equipamentos de iluminação consideraram-se 5 lâmpadas de 20 W e 2 lâmpadas de 60 W, totalizando uma potência de 220 W. Neste caso, o valor pedido possui unidades de Watt por metro quadrado, sendo o valor atribuído de 2.2564 W/m²;
- Equipamentos: os equipamentos considerados foram um frigorífico e um micro-ondas, como se encontra presente na Tabela 2.2, totalizando uma potência de 825 W, em equipamentos elétricos. Mais uma vez, o valor pedido para a simulação possui unidades de potência por unidade de área, por isso atribuiu-se o valor de 8.4615 W/m²;

Tabela 2.2- Equipamentos elétricos.

Equipamento	Potência (W)
Frigorífico	125
Micro-ondas	700

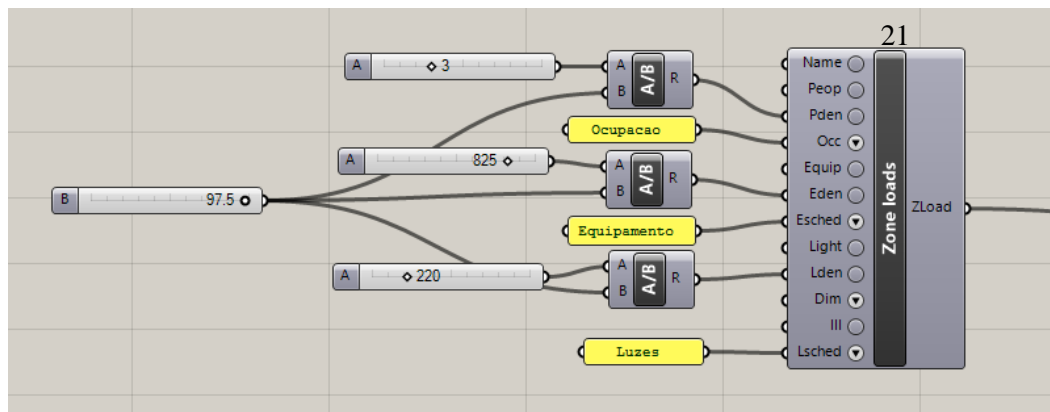


Figura 2.10- Componentes do Archsim para definição das cargas da zona térmica.

Relativamente aos calendários de utilização, existem quatro calendários que é necessário definir: pessoas (durante a semana), pessoas (durante o fim de semana), iluminação e equipamentos elétricos (ver Fig. 2.11). O edifício é residencial, por isso assumiu-se que as pessoas estariam ausentes da habitação durante o período de trabalho (de segunda-feira a sexta-feira) e passariam o fim-de-semana na habitação. No entanto, assumiu-se que os equipamentos elétricos e a iluminação funcionam durante todo o dia. É ainda de salientar que os calendários referidos são válidos para todo o ano.

Capítulo 2- Metodologia

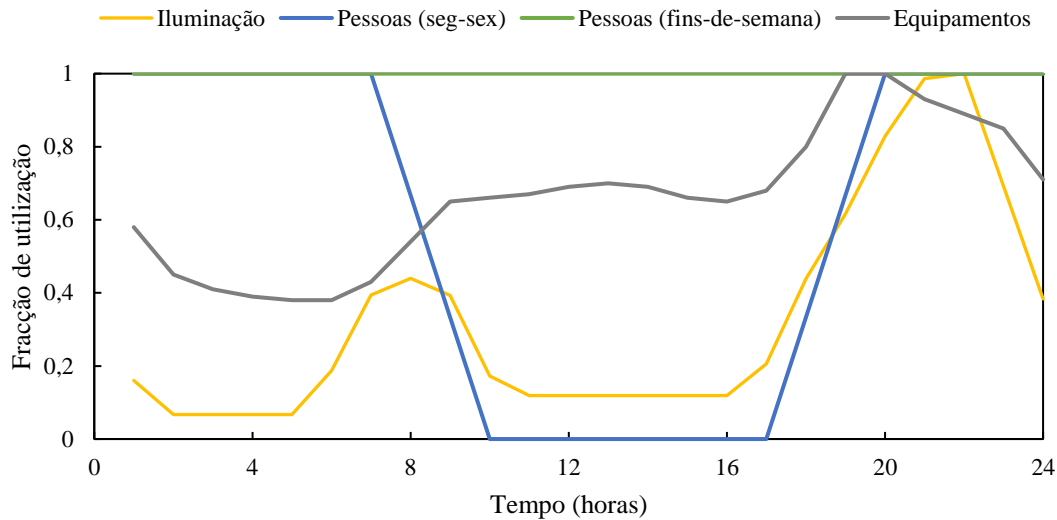


Figura 2.11- Calendários diários de utilização do edifício.

Para criar os calendários recorre-se ao componente “Year Schedule” (24) em que é necessário identificar o calendário atribuindo-lhe um nome, bem como utilizar o componente “Week Schedule” (23) para introduzir os valores semanais de utilização/ocupação, que por sua vez tem de ser definidos através do calendário diário que é construído pelo componente “Day Schedule” (22), Figura 2.12. Após a definição dos calendários é necessário inseri-los na biblioteca para que possam ser utilizados na simulação.

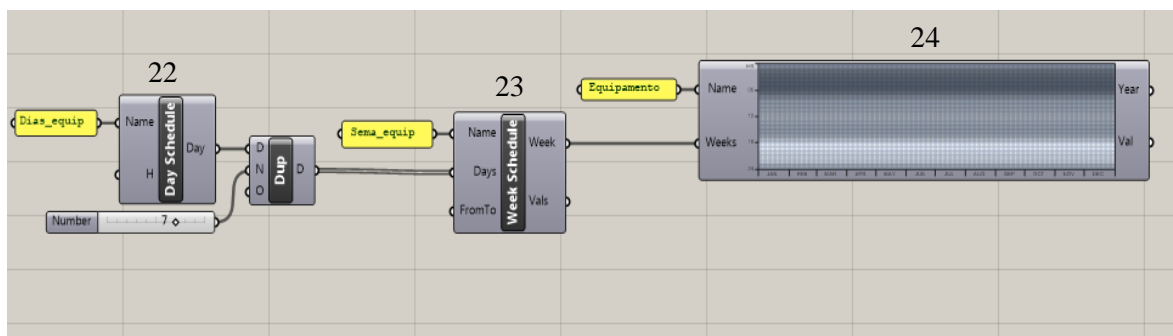


Figura 2.12- Componentes do Archsim para definição dos calendários de utilização.

Os critérios de climatização do edifício são definidos através do componente “Zone conditioning” (25) no qual é possível limitar as suas temperaturas interiores (ver Fig. 2.13). Para assegurar o conforto térmico no interior do edifício, as temperaturas interiores variam entre 20°C e 28°C. Portanto, o sistema de climatização precisa de assegurar que a temperatura interior está dentro desse intervalo. Neste componente é possível inserir outros parâmetros de climatização, contudo foram adotados os valores *standart* do componente. Por fim, é necessário ligar a saída deste componente a “Zone settings” (27).

Para introduzir as características de ventilação utilizou-se o componente “Zone ventilation” (26), tendo-se adotado as características pré-definidas pelo Archsim, que assume uma infiltração de 1 rph.

Estudo de uma habitação sustentável baseado em materiais de construção natural

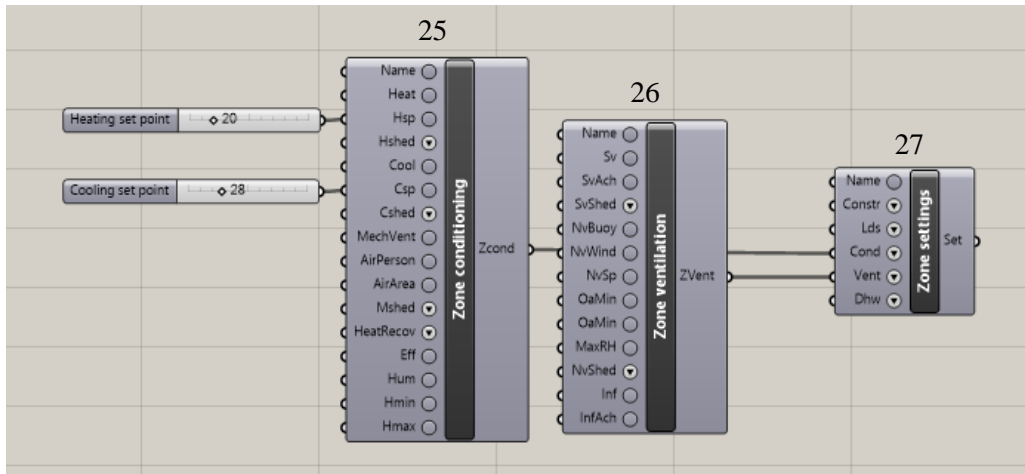


Figura 2.13- Componentes do Archsim para definição dos critérios de climatização e ventilação.

O uso de AQS é definido através do componente “Zone DHW” (28), apresentada na Figura 2.14, tendo-se assumido um fluxo máximo de 0.0001 m³/s, uma temperatura da água da rede de 15°C e 65°C para a temperatura de saída. Ainda neste componente é necessário definir o calendário de utilização de AQS, no qual se assume a utilização no período entre as 8h e 10h e as 20h e 22h.

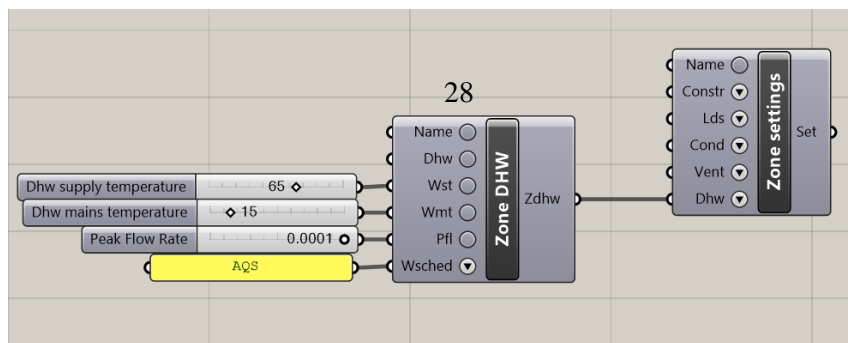


Figura 2.14- Componentes do Archsim para definição do uso de AQS.

Os ganhos de calor do edifício dependem da sua área de envidraçado, devido à radiação incidente na mesma. Por essa razão, a área de envidraçado é um dos parâmetros de otimização da energia de climatização do edifício. Para a criação das janelas do edifício utiliza-se a componente “Window” (31) apresentada na Figura 2.15, na qual é necessário introduzir a geometria da janela, permitindo ainda introduzir as características da mesma, através do parâmetro de entrada “Window settings” (29).

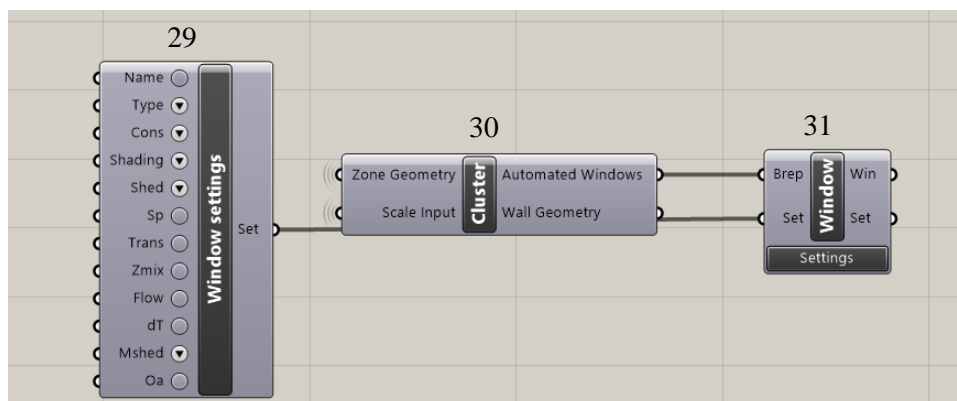


Figura 2.15- Componentes do Archsim para definição da janela e características correspondentes.

Capítulo 2- Metodologia

Para a criação da geometria da janela foi utilizado um *cluster* (30), que consiste num conjunto de componentes que juntos funcionam como um só, ou seja, introduzindo-se os dados de entrada, o *cluster* calcula os dados de saída através de vários componentes. Neste caso, é necessário inserir a geometria da fachada e a percentagem de janela para se obter a geometria da janela.

Para definir os objectos que limitam a fronteira do edifício é necessário utilizar o componente “Boundary condition object” (32), presente na Figura 2.16, no qual se insere a geometria do objecto e se é fronteira adiabática ou solo.

O componente “Networker” (33) permite conectar várias zonas térmicas, inserir as janelas presentes, os objectos fronteira e as sombras que afectam estas zonas, nomeadamente árvores circundantes, edifícios vizinhos e o relevo do local. Através destes dados de entrada, o componente cria o modelo para a simulação energética.

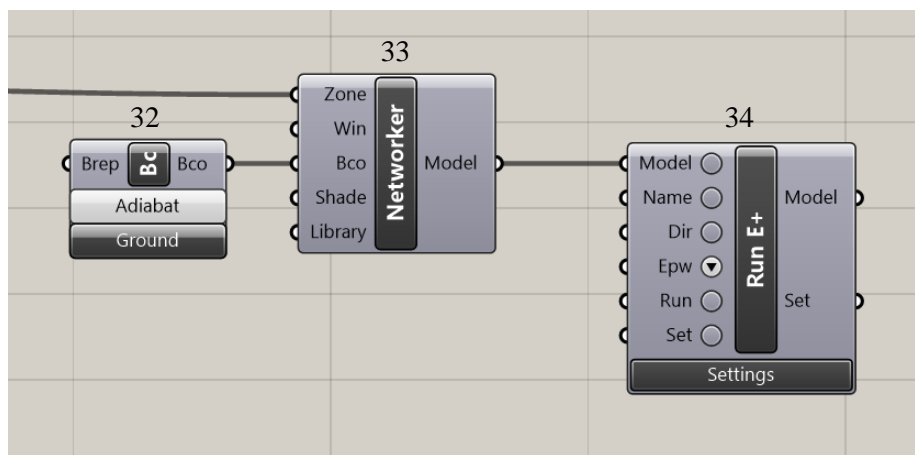


Figura 2.16- Componentes do Archsim para definição dos objetos fronteira, modelo e simulação.

Por forma a realizar a simulação energética do edifício utiliza-se o componente “Run E+” (34) que aceita o modelo térmico e corre-o no Energy Plus. Para que esta componente opere é necessário que o *software* Energy Plus esteja instalado no sistema. Neste passo é necessário inserir o modelo térmico criado anteriormente, atribuir um nome ao projecto, introduzir o directório de trabalho (caso se pretenda) e o ficheiro meteorológico do local de estudo. Para escolher as variáveis de saída que se pretende calcular é necessário seleccionar os parâmetros pretendidos, entre os possíveis. Neste caso, as variáveis de saída necessárias para calcular a energia de climatização total são “Zone Ideal Loads Supply Air Total Heating Energy” e “Zone Ideal Loads Supply Air Total Cooling Energy” (Energia de aquecimento do ar da zona e energia de arrefecimento do ar da zona, respectivamente).

Finalmente, para obter os resultados calculados através da simulação é necessário utilizar o componente “Results” (35) onde se selecciona os parâmetros de saída que se quer conhecer, ligando um “panel” (36) à saída do componente para os visualizar (Figura 2.17).

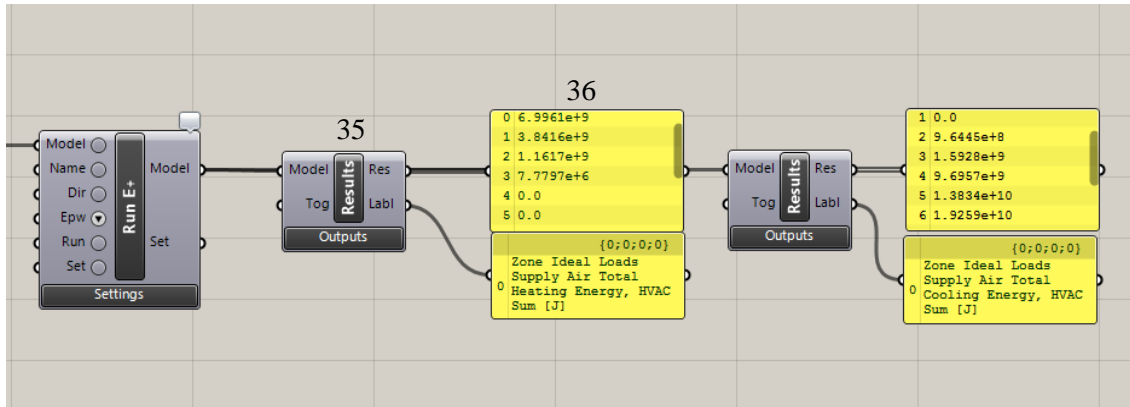


Figura 2.17- Componentes do Archsim e Grasshopper para visualização dos resultados.

Otimização da área de envidraçado

Os elementos de sombreamento presentes no local afetam a radiação solar recebida pelo edifício, nomeadamente pela área de envidraçado existente em cada fachada, que é um dos parâmetros de otimização do edifício. Ao contrário dos restantes parâmetros, a área de envidraçado pode variar entre muitos valores, sendo necessário um componente que permita encontrar o melhor valor. Portanto, para realizar esta otimização foi utilizado o componente Galapagos (ver Fig.2.18) do Grasshopper [31], que contém um algoritmo de otimização baseado numa estratégia evolucionária.

O algoritmo evolutivo é bastante flexível, sendo adequado a uma grande variedade de problemas, nomeadamente problemas mal formulados ou com muitas restrições. O processo decorre progressivamente, possibilitando a recolha de respostas intermédias a qualquer momento e facilitando a análise da tendência da solução. Este algoritmo gera muitas respostas, quanto mais recente for a resposta mais próxima será da solução. Além disso, permite um elevado grau de interação com o utilizador que permite limitar a solução através de barreiras. O algoritmo evolutivo é adequado para resolução do “problema” de otimização da área de envidraçado, pois varia este parâmetro para convergir para a melhor solução.

Por outro lado, o processo de simulação efetuado através de algoritmos evolutivos é lento, alguns processos podem ser executados por dias ou semanas, nomeadamente em configurações que requerem muito tempo para resolver uma única iteração. Além disso, o algoritmo evolutivo não garante uma solução, ou seja, a simulação pode correr indefinidamente sem nunca obter uma solução.

Estudo de uma habitação sustentável baseado em materiais de construção natural

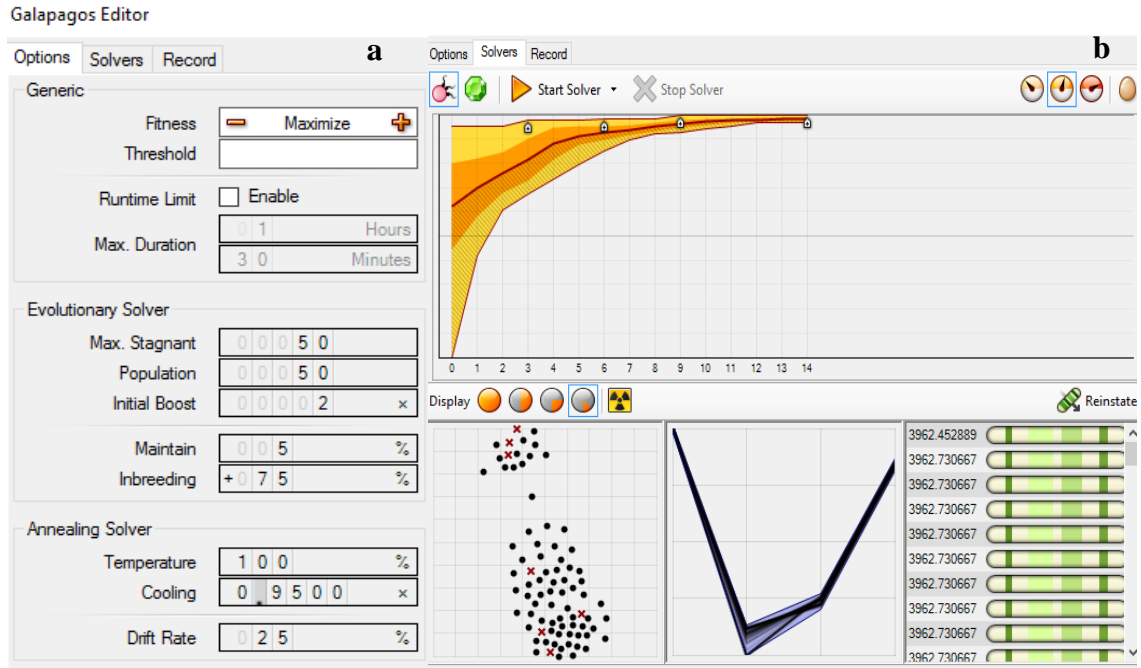


Figura 2.19- Função Galapagos: a) Galapagos Editor; b) janela Solvers.

3. Caso de estudo

Para estudar a edificação de construção sustentável, foi desenvolvido um caso de estudo recorrendo a uma habitação rural, cujos proprietários pretendiam a implementação de materiais de construção natural para a restauração da habitação. A análise dos dados climáticos do local é essencial para quantificar as necessidades de climatização e iluminação, bem como, a viabilidade de produção de energia a partir de fontes renováveis.

Este capítulo apresenta o caso de estudo e as suas características. Em primeiro lugar, procedeu-se à análise da localização e do clima do local do edifício de estudo, apresentados na secção 3.1 e secção 3.2, respetivamente. Na secção 3.3 é apresentado o plano do edifício e da envolvente modelado no software Rhinoceros 5, sendo feita uma comparação entre esta representação e a fotografia do local. Neste trabalho houve uma visita ao local de estudo, na qual foi possível produzir *cob* (secção 3.4). Ainda nesta secção é efetuada uma análise da sombra das árvores. A secção 3.5 apresenta os materiais naturais utilizados no caso de estudo e as suas propriedades. A representação do edifício de estudo é apresentada na secção 3.6, nomeadamente as suas medidas, orientação e materiais constituintes.

3.1 Local de estudo

O local de estudo (41°48'14" N, -8°26'29" W), presente na Figura 3.1, situa-se nas proximidades da localidade de Ribeiro, pertencente à freguesia de Oleiros, concelho de Ponte da Barca no distrito de Viana do Castelo.



Figura 3.1- Local de estudo (Google Earth).

O edifício de estudo, assinalado a azul na Figura 3.1, é constituído por uma antiga habitação e um barracão, que embora estejam bastante degradados possuem algumas paredes que podem ser aproveitadas. O edifício de estudo fica a pouco mais de 100 metros do rio Lima e nas suas imediações possui principalmente castanheiros (*castanea sativa*), como elementos de flora. O castanheiro é uma árvore de grande porte que possui folha caduca com 10 a 25 cm de comprimento [32]. Como as folhas surgem no início da Primavera, estas têm o potencial de limitar a radiação que o edifício recebe no Verão.

3.2 Dados climáticos do local

Os dados climáticos apresentados foram obtidos através do CLIMAS-SCE- *software* para o Sistema Nacional de Certificação de Edifícios (versão de 2013), desenvolvido pelo LNEG [33]. Estes dados foram criados com base em parâmetros de 1981 a 2010 fornecidos pelo IPMA. Neste *software* é possível escolher o local e altitude para o qual se pretende obter os dados climáticos. Neste trabalho, o local é Ponte da Barca, com uma altitude de 32 metros (média dos pontos do edifício em estudo, ver Fig. 3.2). No entanto, estes dados climáticos não são exatamente os do local de estudo, pois apesar de terem em consideração a altitude, são dados médios para a região de Ponte da Barca, no qual não se considera o relevo do terreno, as obstruções e sombras existentes no local de estudo. Apesar da ferramenta de simulação energética utilizar estes dados climáticos (secção 2.2), permite também inserir os elementos da envolvente, possibilitando aproximar as simulações às condições reais do local de estudo.

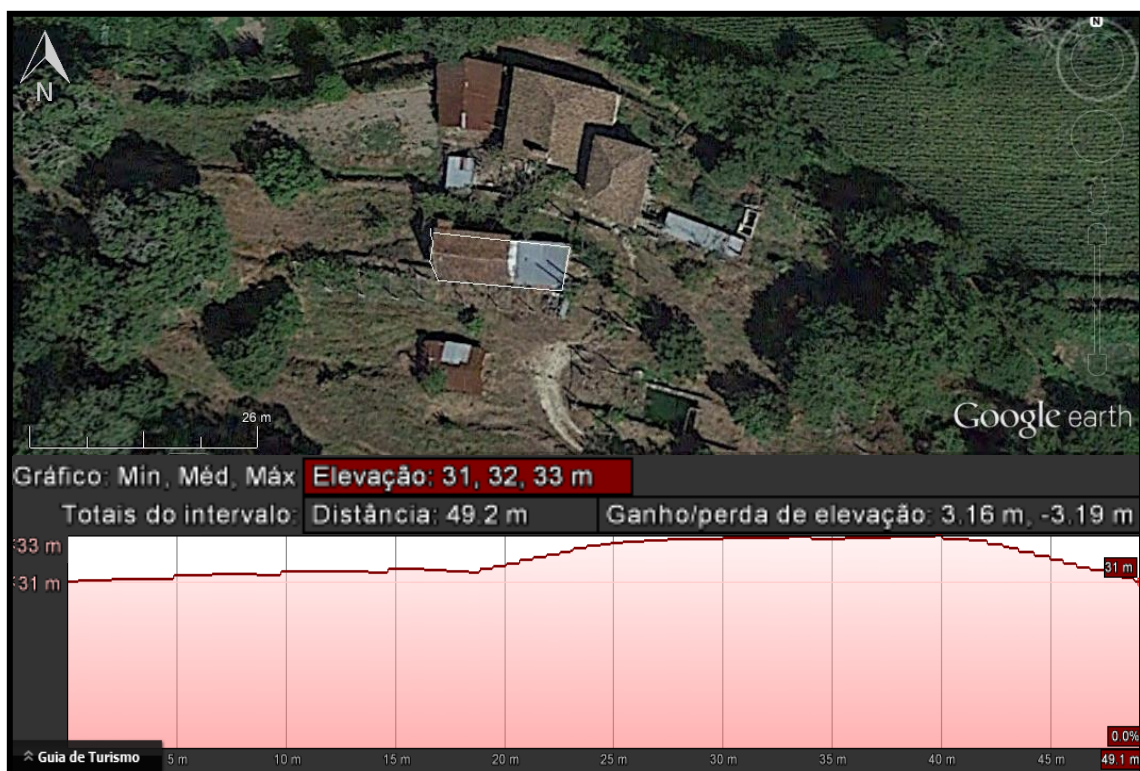


Figura 3.2- Perfil de altitude no edifício de estudo (Google Earth).

Por forma a facilitar a análise dos dados climáticos foram realizados vários diagramas de extremos e quartis, também denominados diagramas de caixa cujo esquema se encontra presente na Figura 3.3.

Estudo de uma habitação sustentável baseado em materiais de construção natural

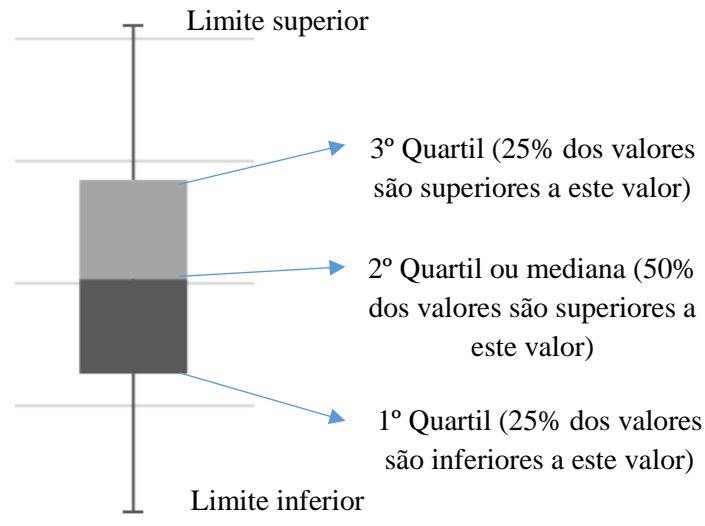


Figura 3.3- Diagrama de extremos e quartis.

Temperatura

No local de estudo, a temperatura média anual é cerca de 16.0 °C, atingindo a temperatura máxima anual de 34.3 °C, no mês de Julho, por outro lado, a temperatura mínima anual, 1.9°C é atingida no mês de Janeiro. Tal como é possível verificar pela Figura 3.4, as temperaturas mais baixas ocorrem nos meses de Janeiro e Dezembro e as mais altas nos meses de Julho e Agosto.

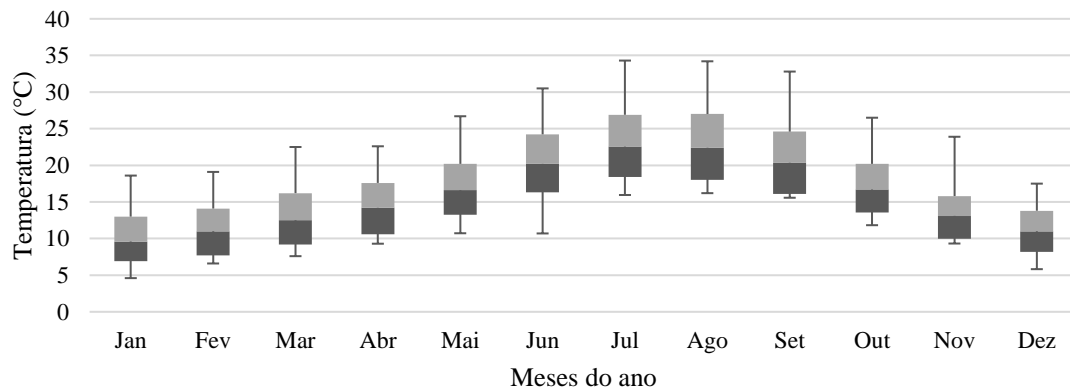


Figura 3.4- Diagrama de extremos e quartis dos dados da temperatura do local.

Capítulo 3- Caso de estudo

Humidade relativa

A nível anual, a humidade relativa média é de 78.7%. A Figura 3.5, apresenta uma humidade máxima de 98.0% que ocorre em todos os meses do ano. No entanto, a humidade mínima é de 27.0% e ocorre o mês de Julho. A humidade relativa é superior nos meses de Outubro, Novembro, Dezembro, Janeiro e Fevereiro, ou seja, nos meses de Outono/Inverno. Já os menores valores ocorrem nos meses de Verão.

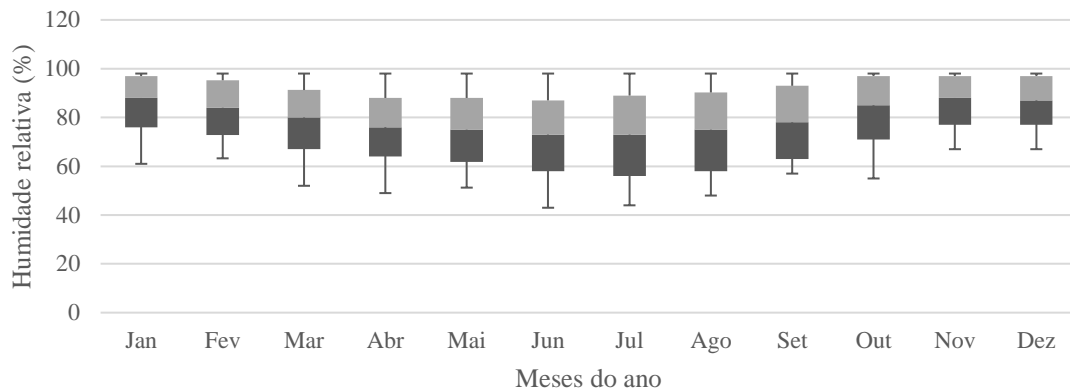


Figura 3.5- Diagrama de extremos e quartis dos dados de humidade relativa do local.

Direção e velocidade do vento

A direção predominante do vento no local é oeste (240° e 270°), apresentando uma velocidade máxima anual de 6.5 m/s (mês de Outubro). Porém, a Norte a velocidade do vento é praticamente nula, como é possível observar na Figura 3.6. A velocidade do vento apresenta-se relativamente constante ao longo do ano, com valores um pouco mais baixos nos meses de Maio e Dezembro (ver Fig. 3.7).

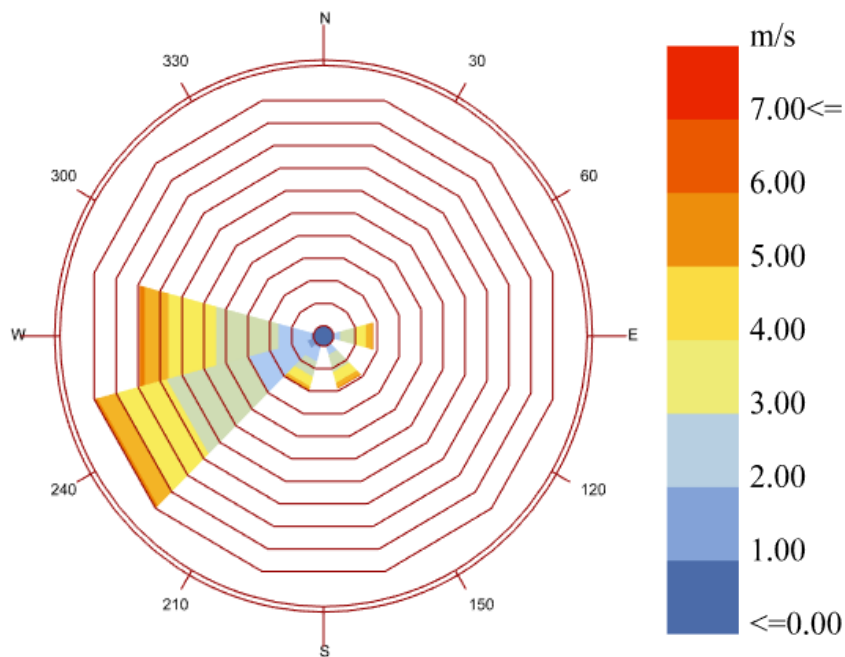


Figura 3.6- Rosa do vento do local de estudo.

Estudo de uma habitação sustentável baseado em materiais de construção natural

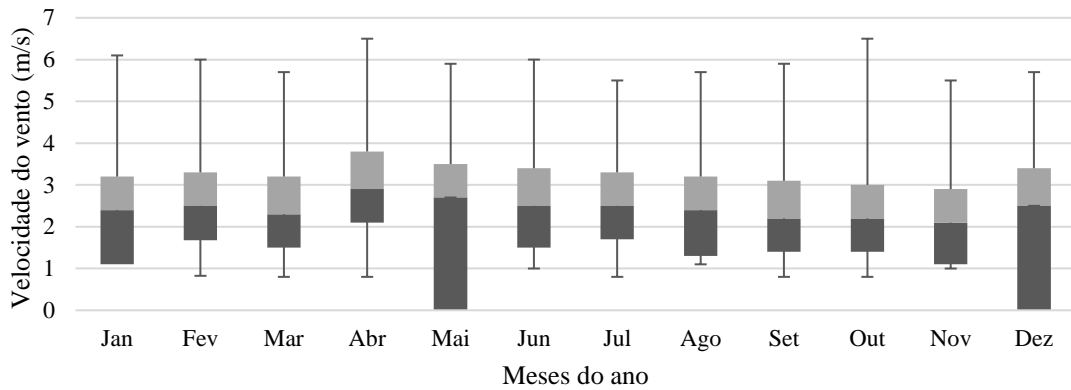


Figura 3.7- Diagrama de extremos e quartis dos dados de velocidade do vento do local.

A energia radiativa global máxima, no plano horizontal, a nível anual é de 1063 Wh/m² e ocorre no mês de Junho. Apesar do que se esperava, a direção predominante da radiação não é Sul, mas sim 140°. Este fato pode dever-se à nebulosidade ocorrer maioritariamente no período da tarde, em que o sol segue na orientação Oeste. No entanto, qualquer direção a Sul apresenta um alto valor de energia radiativa global ao contrário da direção Norte, onde a radiação é muito baixa (ver Fig.3.8). A radiação global apresenta valores mais elevados nos meses de Verão (Junho, Julho e Agosto) e valores muito baixos nos meses de Novembro, Dezembro, Janeiro e Fevereiro (ver Fig.3.9).

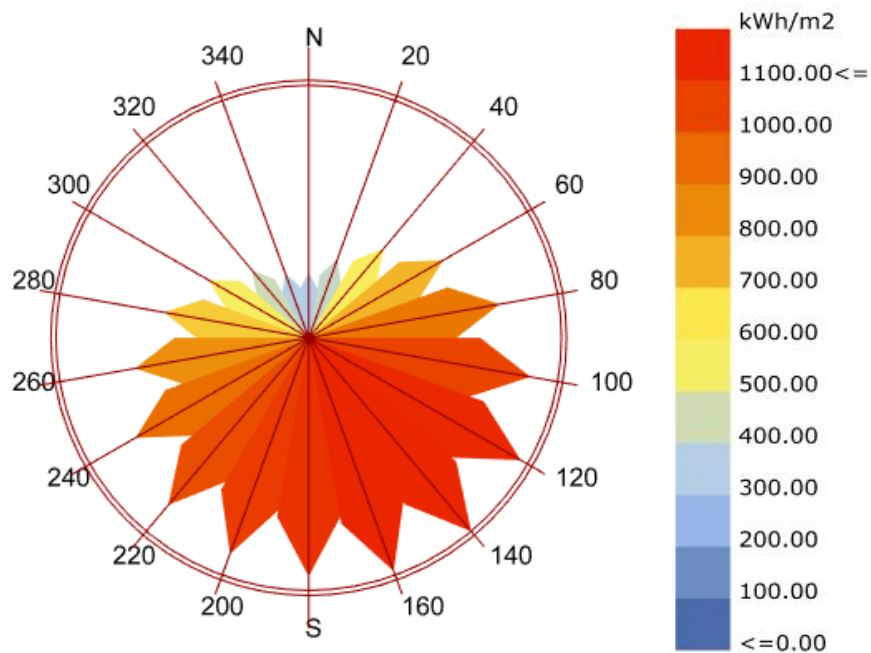


Figura 3.8- Rosa de radiação.

Capítulo 3- Caso de estudo

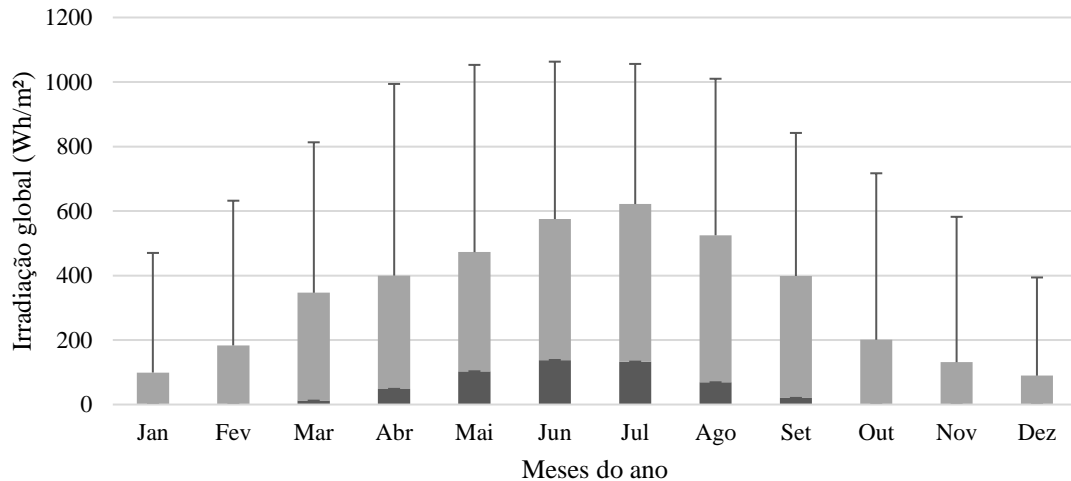


Figura 3.9- Diagrama de extremos e quartis dos dados de irradiação global no plano horizontal (incluindo período noturno).

Precipitação

Os dados climáticos obtidos através do *software* CLIMAS-SCE não incluem a precipitação, por esta razão, foi necessário utilizar os dados horários de precipitação obtidos, para o local, através do SNIRH (Sistema Nacional de Informação dos Recursos Hídricos) [34]. No entanto, na estação meteorológica de Ponte da Barca nem todos os anos de 2006 a 2014 estão completos (anos utilizados para o desenvolvimento do ano típico obtido pelo *software* CLIMAS-SCE). Os anos de 2006, 2010 e 2012 são aqueles em que se verificaram menores falhas nos dados de precipitação. O ano escolhido foi o de 2010, pois apesar de 2006 não apresentar falhas nos dados de precipitação, nos restantes parâmetros apresenta várias falhas. Os registos de 2012 referem-se a um ano de seca e apresentam apenas um dia de chuva, sendo por isso um ano de seca pouco representativo do clima do local.

Como é possível verificar pela Figura 3.10 e pela Figura 3.11, a precipitação no local é superior nos meses de Inverno e Primavera, sendo o mês de Abril aquele que apresenta o máximo de precipitação anual (11,1 mm). Por outro lado, nos meses de Verão e Outono, a precipitação apresenta valores bastante mais baixos, atingido uma precipitação horária máxima 1,3 mm para esse período. A média anual é de 0,1029 mm.

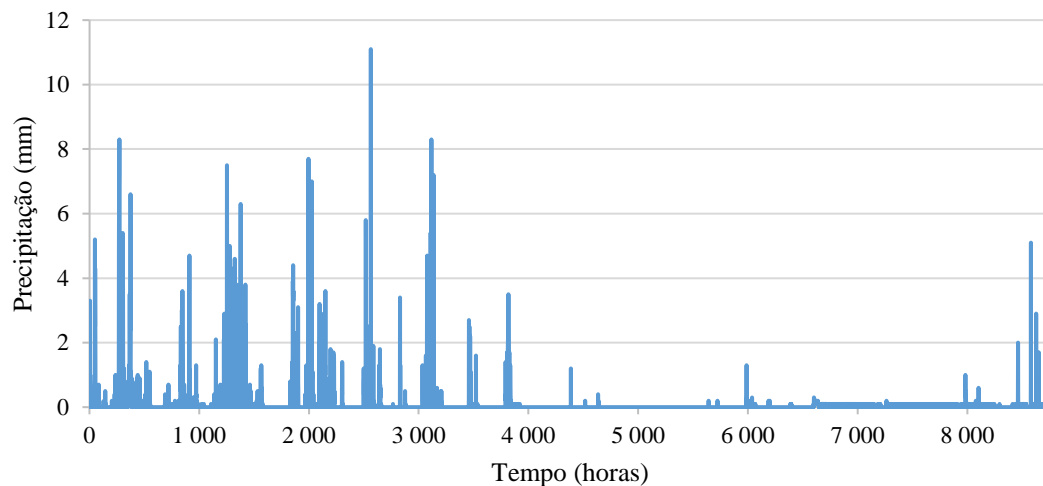


Figura 3.10- Precipitação horária referente ao ano de 2010.

Estudo de uma habitação sustentável baseado em materiais de construção natural

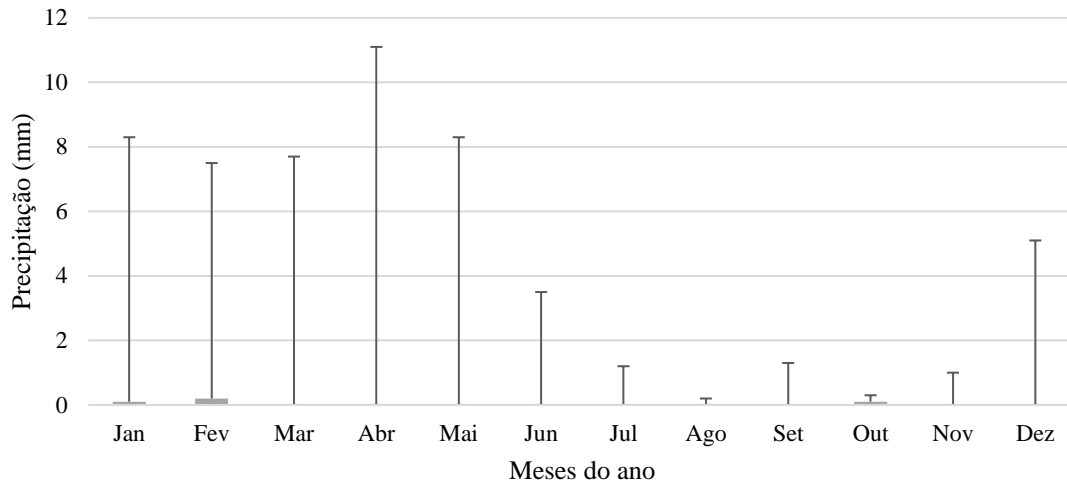


Figura 3.11- Diagrama de extremos e quartis dos dados de precipitação referente ao ano de 2010.

Com base nos dados expostos anteriormente é possível perceber que o local de estudo apresenta um clima mediterrânico, em que o Verão é quente (com temperaturas mais altas nos meses de Junho, Julho, Agosto e Setembro) e relativamente seco (revelando valores mais baixos de humidade e precipitação nestes meses). No Inverno as temperaturas são moderadas (superiores a 0°C) e a humidade é elevada, ocorrendo vários períodos de chuva, no caso de 2010 principalmente nos meses de Dezembro a Maio (ver Fig. 3.10 e Fig. 3.11). A radiação apresenta valores mais elevados nos meses de Verão, com maior influência na direção Sul. Por outro lado, a radiação no Inverno é baixa, assim como na direção Norte. O vento é predominante de Oeste sendo relativamente constante ao longo do ano.

3.3 Plano do edifício e envolvente

A Figura 3.12 compara a representação do edifício e envolvente com a fotografia do local, sendo possível perceber que existem algumas discrepâncias. Estas podem ser explicadas pelo fato da representação e da fotografia não estarem georreferenciadas. Além disso, as medidas tiradas através do GoogleMaps, podem ter algum erro associado pois a resolução não é muito alta, fazendo com que a representação não coincida com a fotografia apresentada.



Figura 3.12- Representação do edifício de estudo e envolvente (plano superior) e fotografia do local (plano inferior).

Na Figura 3.13 é possível visualizar, de outra perspectiva a representação do edifício e envolvente, constituída por árvores, casas, relevo do local e um reservatório de água. Os elementos foram desenhados no *software* Rhinoceros 5, com base nas medidas obtidas através do Google Earth.



Figura 3.13- Representação do edifício e envolvente (vista Norte).

3.4 Visita ao local de estudo

No mês de Julho de 2016, foi realizada uma visita ao local na qual foi possível efetuar uma experiência com *cob*, nomeadamente na construção de um banco. Os materiais utilizados foram: terra, argila (pois o solo do local não contém a quantidade necessária), palha, água, lona e luvas.

Procedimento efetuado

Para a produção do *cob*, em primeiro lugar é necessário colocar duas medidas de terra na lona e caso o solo não contenha a quantidade de argila necessária, adicionar cerca de meia medida (ver Fig.3.14 a), misturando estes dois constituintes (ver Fig.3.14 b e c). De seguida, acrescentar cerca de uma medida de água e envolver na mistura (ver Fig.3.14 d). Por fim, adicionar a palha e misturar todos os elementos (ver Fig. 3.14 e). Para comprovar se o *cob* ficou consistente fazer um cilindro e segurá-lo por uma das pontas. Caso este se desfaça deve juntar-se mais um pouco de argila ou água até que o cilindro não se desagregue.



Figura 3.14- Processo “manual” de produção de *cob*: a) terra e argila; b) e c) mistura de terra e argila; d) adição de água à mistura; e) junção de palha à mistura; f) aplicação na estrutura.

Para a construção da estrutura do banco, em primeiro lugar foi necessário nivelar o terreno e em seguida fazer uma fundação com gravilha e pedra. Após a criação da fundação, colocou-se *cob* entre e por cima das pedras. Por fim, adicionou-se várias camadas de *cob* para a criar a estrutura desejada.

O processo de produção de *cob* varia com o local em que se pretende construir, pois as propriedades do solo diferem, nomeadamente o teor em argila, necessária para que o *cob* forme uma estrutura coesa. Portanto, não existe um processo de produção adequado a todas as situações, sendo baseado em tentativa e erro, até que a estrutura do *cob* esteja consistente.

Além da experiência de produção e aplicação de *cob*, a visita ao local, permitiu igualmente esclarecer algumas dúvidas, nomeadamente sombras existentes (árvores e declive) e medidas dos edifícios envolventes.

Capítulo 3- Caso de estudo

Através de fotografias *fisheye* e do diagrama solar é possível perceber se as sombras existentes no local são relevantes. Pela Figura 3.15 é possível verificar que as árvores existentes no local produzem uma sombra significativa em algumas posições anuais, pois o sol sobrepõe-se a estas. Logo, existem alguns momentos em que o sol não será visível porque se encontrará atrás das árvores, impedindo que a radiação direta atinga o edifício.

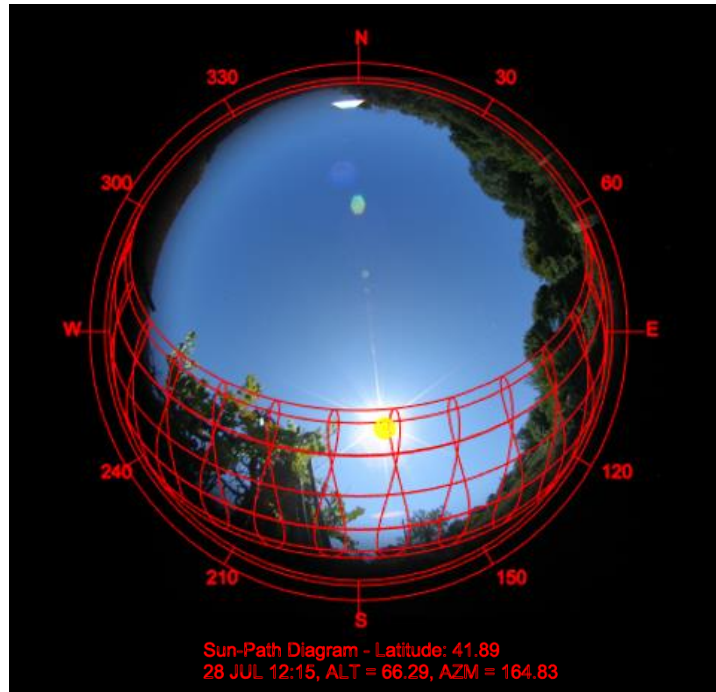


Figura 3.15- Fotografia *fisheye* e diagrama solar anual.

O *software* utilizado possui uma extensão que permite a modelação de vários tipos de flora, nomeadamente as árvores que envolvem o local de estudo. Esta extensão cria as geometrias das árvores num formato que deve ser convertido em malha (*mesh*) para que seja reconhecido no Grasshopper. Porém, a malha resultante contém demasiado detalhe e complexidade para que seja viável assumir todas as árvores como sombras do edifício, o que tornaria o tempo de cálculo muitíssimo elevado, eventualmente bloqueando o programa. Torna-se, pois, necessário encontrar uma geometria que permita a simplificação das sombras provocadas pelas árvores sem comprometer significativamente o rigor das simulações.



Figura 3.16- Vista superior do local de estudo com indicação da árvore analisada (amarelo).

Estudo de uma habitação sustentável baseado em materiais de construção natural

Efectuou-se uma simulação considerando a sombra de apenas uma árvore em malha detalhada (ver Fig.3.17 a), localizada a Oeste do edifício (ver Fig.3.16), para conhecer os valores de consumo em iluminação, aquecimento e arrefecimento. Posteriormente, foram testadas várias geometrias aproximadas (ver Fig.3.17, b-e), tendo-se escolhido aquela que apresentou valores mais próximos dos anteriores e cujo tempo de execução foi menor.

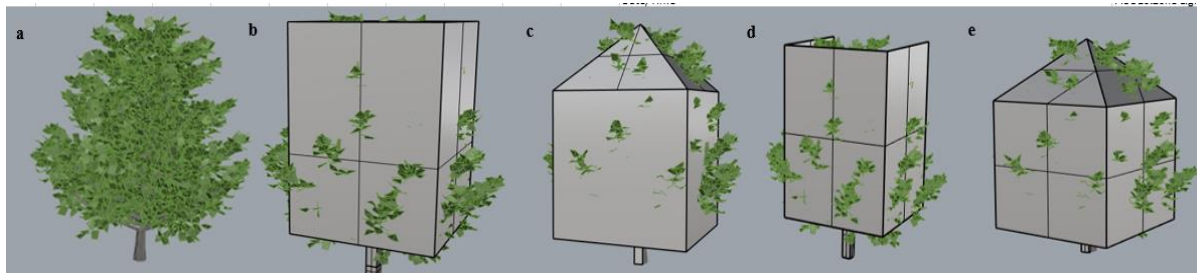


Figura 3.17- Geometrias de árvores testadas: a) árvore real; b) paralelepípedo; c) pirâmide e paralelepípedo; d) superfícies retangulares; e) superfícies triangulares e retangulares.

Tabela 3.1- Comparação dos resultados para as diferentes geometrias das árvores.

Geometria	Iluminação (kWh)	Aquecimento (kWh)	Arrefecimento (kWh)	Tempo (s)
Árvore real	4898.80	2767.05	3049.41	1292
Paralelepípedo	4898.62	2767.07	3049.38	31
Pirâmide e paralelepípedo	4898.80	2767.05	3049.41	21
Superfícies retangulares	4898.62	2767.07	3049.38	11
Superfícies triangulares e retangulares	4898.80	2767.05	3049.41	12

Como é possível verificar pela Tabela 3.1, a geometria a escolher é a formada por superfícies triangulares e retangulares (última geometria da Figura 3.17), pois além do tempo de simulação ser reduzido, apresenta os mesmos resultados que os obtidos para a árvore “real”. O facto de as diferenças entre os resultados serem bastante reduzidas não significa que o sombreamento das árvores seja desprezável pois apenas se avaliou a presença de uma árvore num conjunto superior a vinte árvores que serão consideradas na simulação de energia. Com o uso de geometrias de árvore mais simples não existe a precisão necessária para realizar diferenciação entre a árvore no período de Inverno (em que a árvore não possui folhas) e Verão.

3.5 Materiais naturais considerados

3.5.1 Granito

O granito tem sido utilizado ao longo do tempo nas mais diversas construções, nomeadamente monumentos, barragens, pontes e habitações. A utilização deste material foi variando ao longo do tempo, influenciada pela sua abundância local, pelas acessibilidades e seu transporte. Em vários países da Europa encontram-se construções tradicionais em granito, em função da geologia local e da disponibilidade de afloramento de rochas com propriedades físicas e mecânicas apropriadas. A construção em granito caracteriza grande parte do parque habitacional tradicional português, nomeadamente nas regiões do Minho, Douro, Trás-os-Montes e Beiras, onde se verifica a abundância natural deste material. No entanto, existem construções tradicionais de alvenaria de granito de norte a sul de Portugal, podendo variar a tipologia e sistema construtivo utilizado, reflexo do ambiente em que estão inseridas [35].



Figura 3.18- Construção em granito: a) muro [65]; b) casa com paredes de granito [66]; c) exterior de uma habitação em Monsanto (Idanha-a-Nova)[67].

O granito é uma rocha vulcânica, sendo um dos materiais de construção mais antigos e com maior durabilidade, sendo resistente mecanicamente e a ácidos [36]. Além disso, é um material natural e sustentável que não precisa de manutenção [37]. Por outro lado, a sua natureza impermeável facilita a existência problemas de humidade nos elementos de ligação [38]. O facto de ser um material sólido e pesado torna-se difícil de moldar, não sendo, por isso, muito adaptável.

3.5.2 Fardos de palha

A palha é um material natural cujo ciclo de vida é anual e está disponível em muitos locais. A construção com fardos de palha é originária dos Estados Unidos da América na região de Nebraska (século XIX), mas já há várias construções deste tipo por toda a Europa, nomeadamente na Bélgica, Inglaterra, Itália, Suíça, Portugal, entre outros países.



Figura 3.19- Construção em palha: a) exterior de um edifício; b) construção de paredes c) vista exterior da construção [68].

Estudo de uma habitação sustentável baseado em materiais de construção natural

Este tipo de construção consiste num processo de empilhamento em fiadas desencontradas de fardos, fixos entre si por agulhas de madeira e cintas de tecido. Para proteção contra a humidade e o fogo é necessário rebocar as superfícies com terra e cal.

A construção com fardos de palha é sustentável devido ao baixo consumo de energia envolvida na produção e transporte da palha [39]. Além das vantagens referidas acima este material tem também a capacidade de ser resistente ao fogo e a sismos, apresentando uma estrutura sólida. É um material confortável (agradável ao tacto, livre de arestas e quente), com um bom isolamento térmico não sendo tóxico [40]. No entanto, em climas húmidos e com temperaturas elevadas pode causar degradação da qualidade do ar interior, podendo levar a problemas de saúde para os ocupantes, tais como alergias respiratórias e supressão do sistema imunitário [41]. Além disso, a palha é um material com disponibilidade sazonal e não existe legislação relativamente a este tipo de construção, dificultando assim o uso da palha como material de construção em Portugal [39].

3.5.3 Cob

O *cob* é um material de construção natural baseado em barro. Esta tecnologia precisa de poucas ferramentas, não necessita de revestimento ou estrutura interna, pois consiste apenas em empilhar e moldar o barro para criar paredes. A constituição do *cob* é muito semelhante à dos tijolos de barro, no entanto, o *cob* é mais rígido e contém um maior teor de palha [42]. Normalmente, as partículas existentes neste material não excedem o tamanho da areia [43].



Figura 3.20- Construção em *cob*: a) exterior de uma habitação; b) construção de paredes; c) casa-de-banho [69].

Cada camada de *cob* é um estrato e deve ser completamente seca para que a camada seguinte seja colocada por cima. As janelas e as portas são feitas aquando a colocação das camadas, já as vergas de madeira ou pedra são adicionadas após o edifício estar completo, o que torna este tipo de construção bastante estrutural. Devido à sua simplicidade existem várias construções com *cob* em todo o Mundo [42]. Por outro lado, o seu alto teor de fibras facilita a intrusão de insetos ou roedores dentro da sua estrutura, que pode prejudicar o seu comportamento [43].

Este tipo de construção pode ter muitas vantagens tais como: a sua capacidade de controlo da humidade, a sua capacidade redução dos odores e toxinas no ar interior (levando a uma menor necessidade de ventilação e consequentemente menores necessidades de climatização). Além disso, este material possibilita o armazenamento térmico, uma vez que absorve e armazena calor nas suas paredes, quando as temperaturas internas diminuem, o calor armazenado começa a fluir uniformemente para o interior da casa. O *cob* é um material com nenhum impacto negativo para o ambiente, pois além de reduzir a energia necessária para a climatização do edifício durante toda a sua vida, não necessita de energia no processamento, transporte e outros tratamentos inerentes a outros tipos de construção [44].

Capítulo 3- Caso de estudo

3.5.4 Bale cob

O *bale cob* é utilizado quando se pretende ter um isolamento extra, mas uma construção mais rápida do que com *cob*. A construção com *bale cob* é semelhante à construção com fardos de palhas, mas possui um acabamento em *cob*, tornando-a estruturalmente forte e termicamente confortável.



Figura 3.21- Construção com *bale cob*: a) acabamento com *cob* [70]; b) processo de construção; c) exterior de uma habitação [71].

A Tabela 3.2 apresenta as propriedades dos materiais sustentáveis considerados, no entanto, os valores apresentados podem variar de acordo com a localização, clima do local, processos de fabricação e construção utilizados, experiência dos construtores, entre outras variáveis. Relativamente aos valores considerados para o *bale cob* foram obtidos através de uma junção dos valores do *cob* e dos fardos de palha.

Estudo de uma habitação sustentável baseado em materiais de construção natural

Tabela 3.2- Propriedades dos materiais naturais considerados.

	Granito	<i>Cob</i>	Fardos de Palha	<i>Bale Cob</i>
Condutividade térmica (W/(m K))	2.000 [45]	0.450 [46]	0.067 [46]	0.073 ⁵
Densidade (kg/m ³)	2400 [15]	1550 [15]	60 [46]	209
Calor específico (J/(kgK))	840 [47]	879-975 [48]	600 [46]	632
Preço (€/m ³)	275.90 ⁶	23.50 ⁷	1.80 ⁸	3.97
Mercado	Disponível na zona [49]	Disponível na zona [49]	Disponível na zona	Disponível na zona
Tempo de vida (anos)	Milhares [50]	500 [51]	70-100 [52],[53]	250
Tempo de fabrico-construção	0,003m ³ /(pessoa. h) [54]	0,191-0,318m ³ /(pessoa. h) ⁹	6-9 meses/habitação [55]	6-9 meses/habitação
Resistência à humidade	Alta [56]	Média [57]	Baixa [58]	Média
Energia inerente aos materiais ¹⁰ (kWh/kg)	2.03 [3]	0 [44]	0.25 [59]	0.23
Coefficiente de absorção solar ¹¹	0.6 [45]	0.7 [45]	0.3 [60]	0.7

⁵ Cálculo efetuado através de uma média pesada, assumindo 10 % de *cob* e 90% de fardos de palha.

⁶ Assumindo uma pedra de granito concertada para alvenaria, formada por elementos com as suas faces trabalhadas em forma poligonal mais ou menos regular, para que se assentem sobre superfícies sensivelmente planas [61]

⁷ O preço de 90 toneladas de *cob* é de 1365,25€, obtendo-se um custo de 23,51 €/m³[62].

⁸ O preço da palha de milho é de 0,03€/kg, resultando num preço de 1,8€/m³[63].

⁹ Tendo em conta trabalhadores experientes [64].

¹⁰ A energia inerente aos materiais refere-se à energia que é gasta na extração ou outras ações necessárias para obter o material.

¹¹ O coeficiente de absorção solar indica a fração de radiação total incidente que é absorvida pela superfície do material.

3.6 Edifício de estudo

O edifício de estudo, apresentado na Figura 3.22, é uma habitação existente que apenas possui rés-do-chão (ver Fig.3.23). No entanto, será acrescentado mais um piso ao edifício, que permitirá ser utilizado para habitação de uma família (ver Fig.3.24).

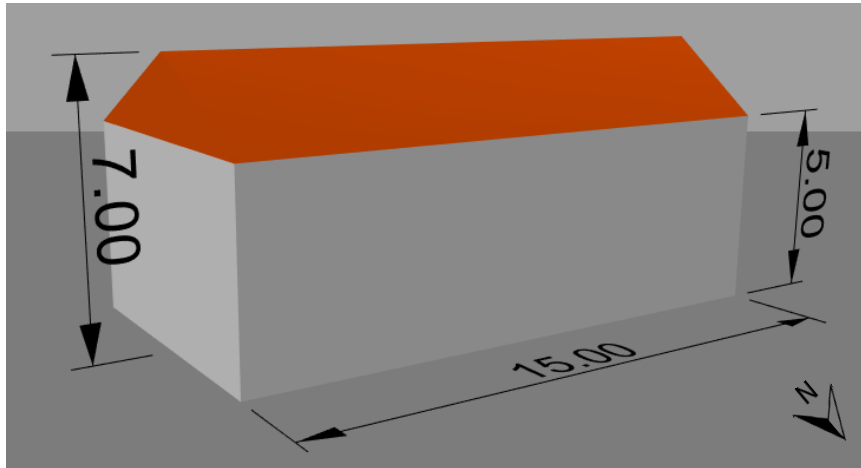


Figura 3.22- Representação do edifício de estudo.

Relativamente ao rés-do-chão, as fachadas Norte, Oeste e Este são constituídas por granito. No entanto, a fachada Sul será alterada para uma construção com *cob*, como representado na Figura 3.23. Portanto, a fachada Este terá uma adição de 3 metros em comprimento de *cob*, permitindo assim, a forma descrita. O rés-do-chão possui um pé direito de 2.5 metros e uma espessura de parede 0.5 metros.



Figura 3.23- Planta do rés-do-chão do edifício.

Estudo de uma habitação sustentável baseado em materiais de construção natural

Tal como referido, o piso 1 será construído “de raiz”, possuindo sala, dois quartos, uma casa-de-banho e sala de estudo. A fachada a Sul será construída com *cob*, tal como no rés-do-chão. Porém, o material de construção das restantes fachadas será um parâmetro de otimização, sendo feita a escolha entre *bale cob* e fardos de palha. Também no piso 1, a fachada a Este incluirá 3 metros de comprimento adicionais de *cob*. O pé direito deste piso será, também, um parâmetro de otimização, podendo ser de 2, 2.5 ou 3 metros.

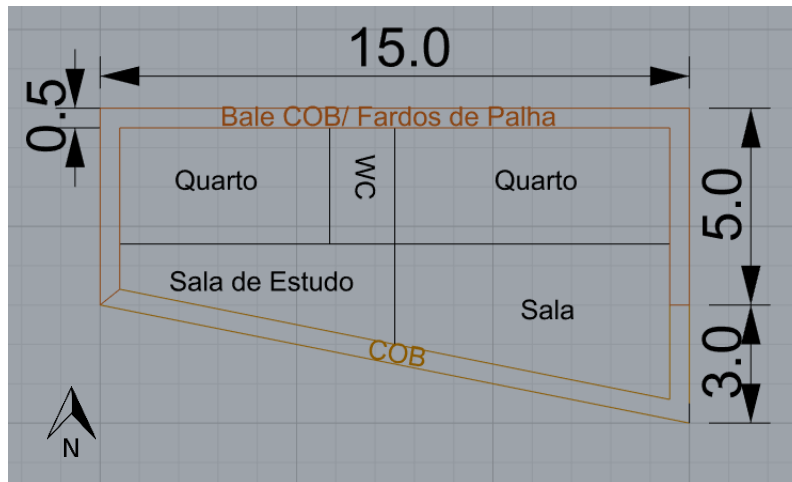


Figura 3.24- Planta do piso 1 do edifício.

4. Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados correspondentes aos parâmetros apresentados em objetivos e componentes (secção 2.2). Em primeiro lugar é apresentado o consumo de energia do edifício antes da otimização (secção 4.1). Na secção 4.2 apresenta-se a análise da radiação incidente no local de estudo. Na secção 4.3 são apresentados os resultados de energia necessária para climatização relativas à utilização de fardos de palha e *bale cob* como materiais de construção. A secção 4.4 indica os resultados para os diferentes valores de pé direito do piso 1 do edifício. Os valores para a área de envidraçado obtidos pela otimização através do Galapagos são apresentados na secção 4.5, bem como a soma do valor de aquecimento e iluminação no período de Inverno. A secção 4.6 expõe a variação da produção de energia fotovoltaica com o ângulo de inclinação do telhado quer para o período de Inverno, quer para o todo o ano. A otimização do comprimento da pala na fachada a Sul é apresentada na secção 4.7. Neste trabalho foram ainda criados três cenários de produção de energia solar fotovoltaica, os quais são descritos na secção 4.8, juntamente com o perfil de produção correspondente. Também nesta secção é efetuada uma comparação entre o consumo e a produção de energia.

4.1 Consumo de energia

A Figura 4.1 permite realizar um resumo dos consumos da zona térmica antes da otimização, pois apresenta os consumos diários de iluminação, equipamentos elétricos, climatização e água quente sanitária. Como se comprova pela figura, todos os consumos expeto a climatização são constantes a nível diário, uma vez que apenas este consumo varia com o clima. No entanto, aquando a posterior otimização da área de envidraçado, a iluminação também dependerá das condições exteriores.

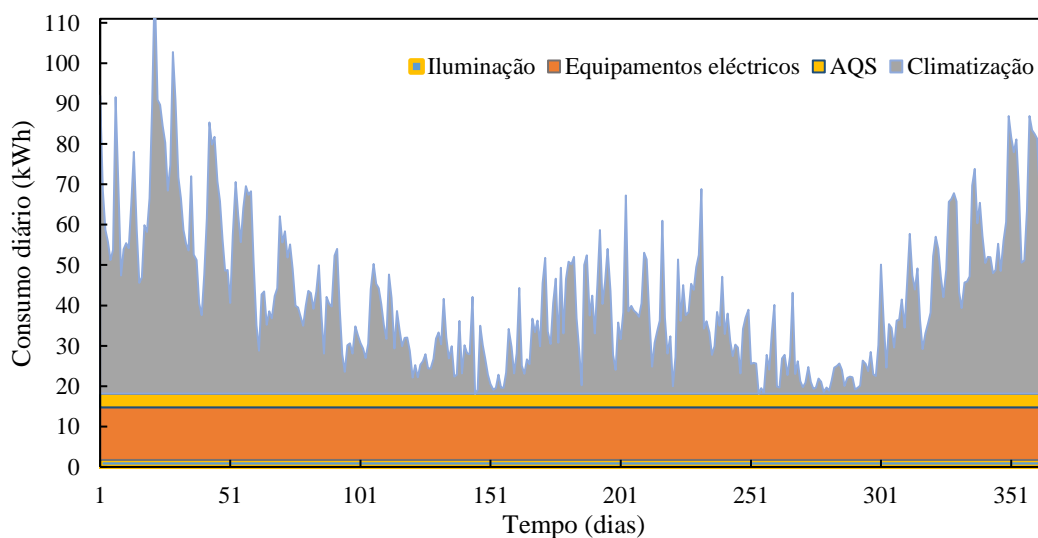


Figura 4.1- Consumo diário de energia.

Capítulo 4- Resultados

Através da Figura 4.2, é possível perceber que a climatização é responsável por mais de metade do consumo de energia do edifício. Os equipamentos elétricos também têm um peso importante, com 31%, sendo o consumo total anual de 15.55 MWh.

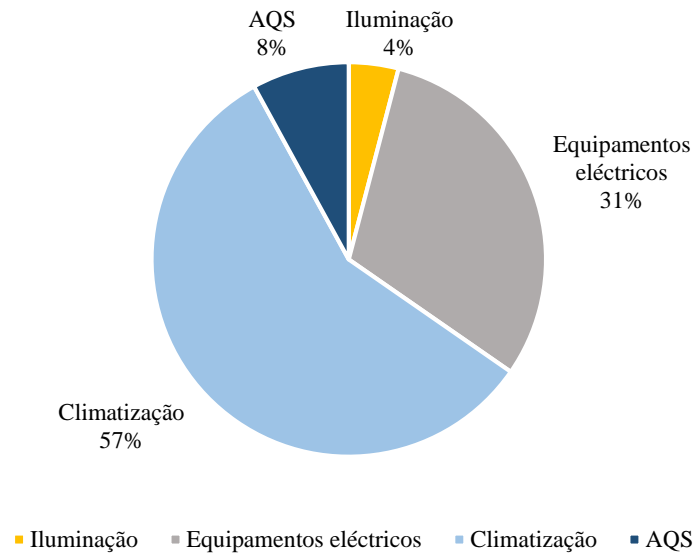


Figura 4.2- Distribuição do consumo anual.

4.2 Mapas de irradiação

Os mapas de irradiação permitem a análise da distribuição de radiação incidente no local de estudo. Nas Figuras 4.3 e 4.4 são apresentados mapas para a irradiação anual com vista de Norte e Sul, respetivamente. Como seria de esperar é possível observar, a distribuição de radiação incidente a Norte é baixa quando comparada a radiação incidente a Sul. Ainda nestas figuras é possível verificar que o sombreamento dos edifícios e das árvores reduz a irradiação solar disponível ao seu redor. No entanto, na maior parte do terreno, e nos telhados das casas, a irradiação é muito elevada atingindo valores próximos de 1800 kWh/m².

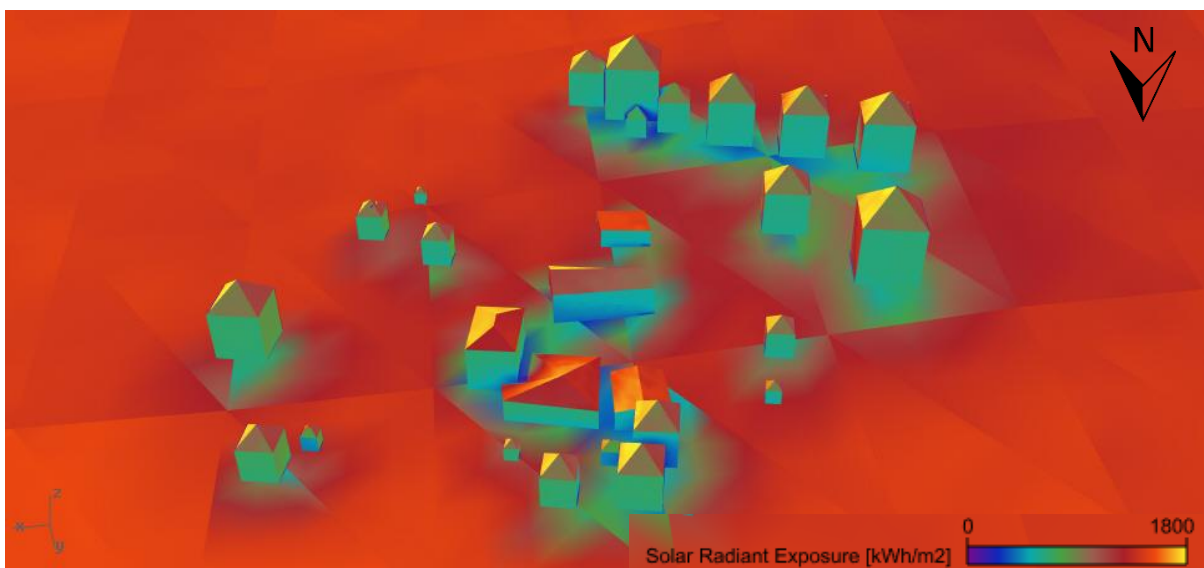


Figura 4.3- Mapa de irradiação do local de estudo (vista Norte).

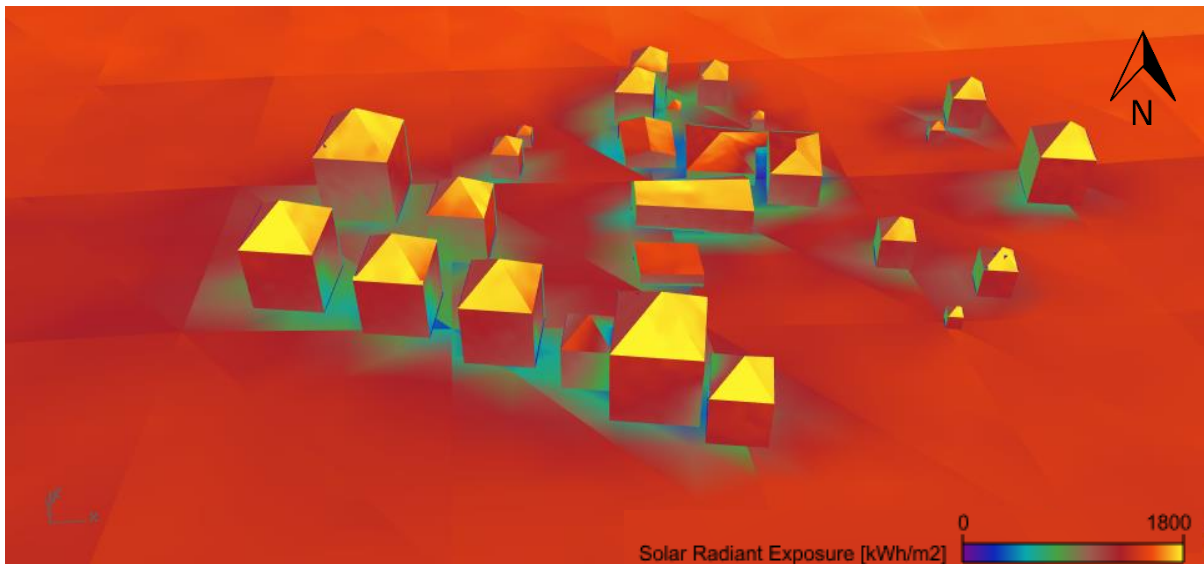


Figura 4.4- Mapa de irradiação do local de estudo (vista Sul).

A Figura 4.5 apresenta o mapa de irradiação para o solstício de Verão, na qual é de notar a mudança de escala pois o mapa é relativo à irradiação de apenas um dia. Para esse dia observa-se que a irradiação é bastante elevada nos telhados, copa das árvores e terreno. Por outro lado, a radiação incidente nas fachadas e laterais das árvores é mais reduzida. É ainda de notar que as superfícies viradas a Sul possuem valores mais baixos de irradiação.

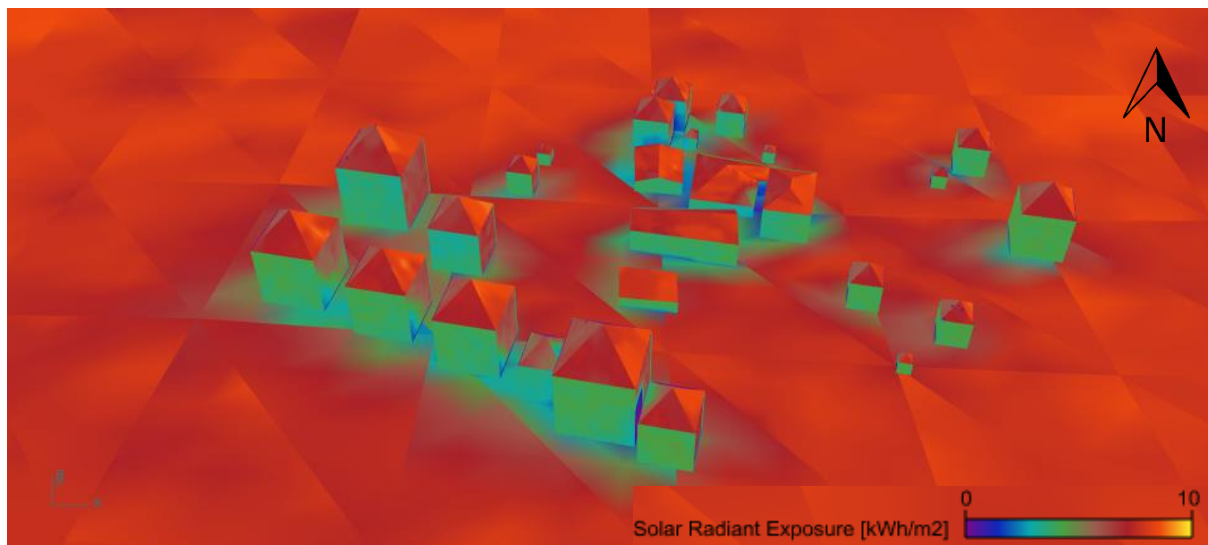


Figura 4.5- Mapa de irradiação do local de estudo (solstício de Verão- 21 de Junho).

Analisando a irradiação solar no solstício de Inverno (ver Fig. 4.6, notar novamente a mudança de escala), verifica-se que esta é muito baixa ao longo do dia (valor máximo de 5 kWh/m²). Ao contrário do mapa anterior, as superfícies viradas a Sul, são as que apresentam maiores valores de irradiação. No terreno do local, o valor de radiação incidente é muito baixo, inferior às superfícies laterais. Como seria de esperar a irradiação solar no solstício de Inverno é muito reduzida quando comparada com a irradiação no solstício de Verão, pois a altura do sol no dia 21 de Junho é superior.

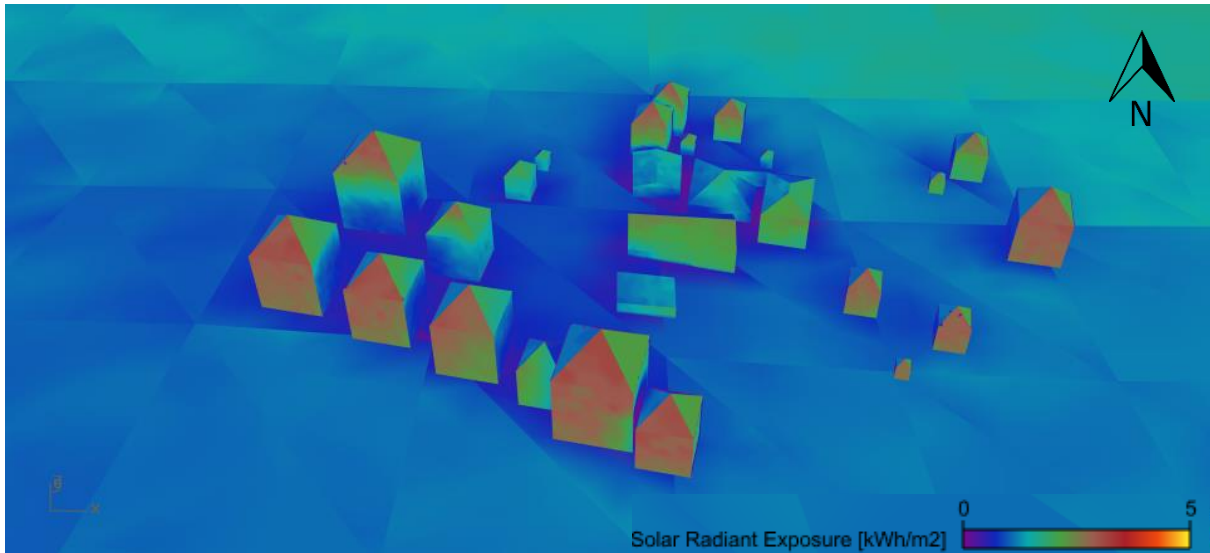


Figura 4.6- Mapa de irradiação do local de estudo (solstício de Inverno- 21 de Dezembro).

Através dos mapas de radiação apresentados é possível verificar quanto maior a altura solar maior é a irradiação recebida nas superfícies horizontais (telhados, copa das árvores e terreno).

4.3 Escolha entre *bale cob* e fardos de palha

Para calcular a energia anual de climatização referente a estes materiais foi necessário fixar os restantes parâmetros de otimização. Portanto, assumiu-se um pé direito de 2.5 metros e inexistência de janelas.

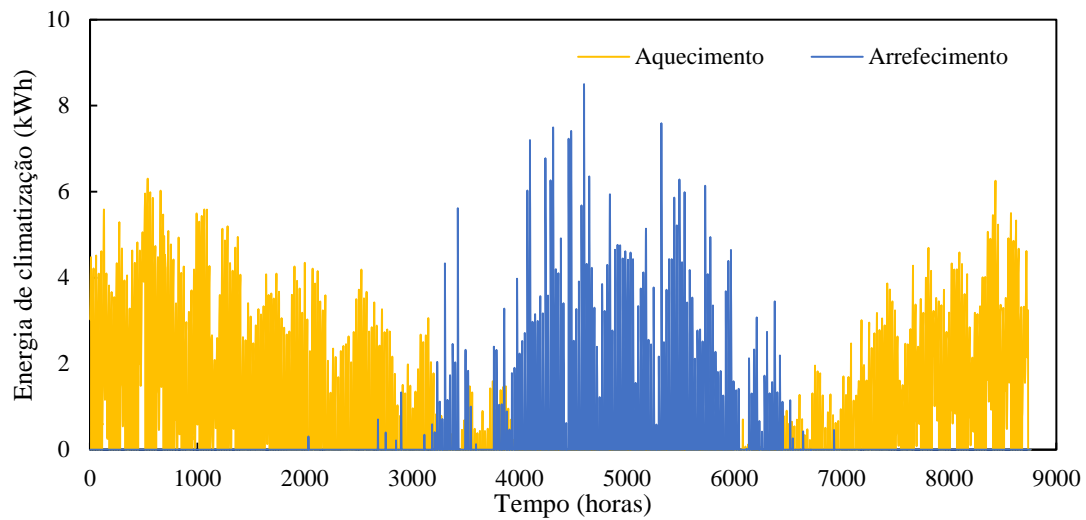


Figura 4.7- Energia anual de climatização com *bale cob*.

Com construção com *bale cob*, a energia total anual de climatização é 9.03 MWh, correspondendo 6.91 MWh ao aquecimento e 2.12 MWh ao arrefecimento do edifício.

Estudo de uma habitação sustentável baseado em materiais de construção natural

Por outro lado, com construção de fardos de palha, a energia total anual de climatização é de 8.84 MWh, sendo 6.73 MWh relativos à energia de aquecimento e 2.11 MWh ao arrefecimento.

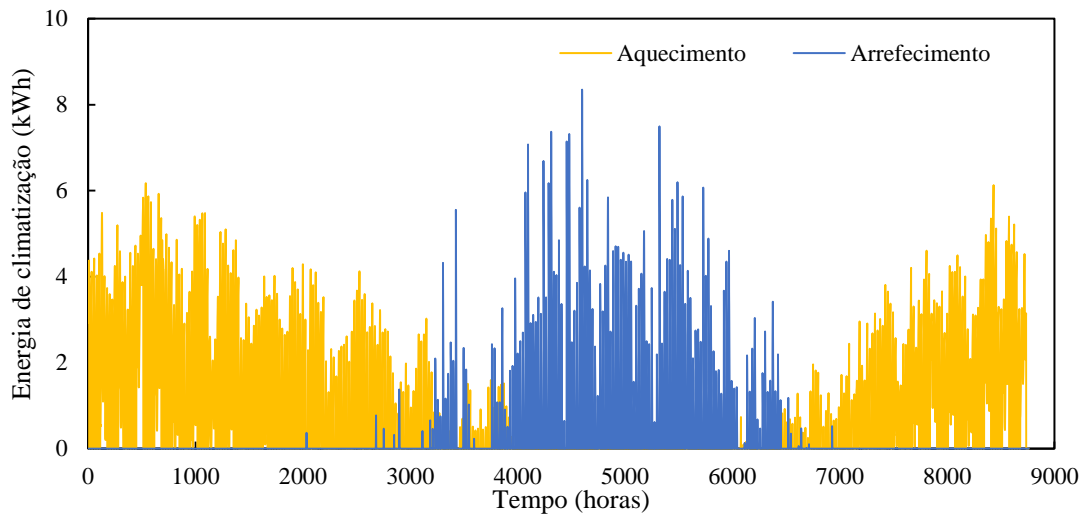


Figura 4.8- Energia anual de climatização com fardos de palha.

Através dos dados apresentados anteriormente é possível perceber que a construção com fardos de palha possui um melhor comportamento térmico. Do mesmo modo, verifica-se que os valores máximos de climatização para aquecimento são superiores no perfil relativo à construção com *bale cob*. No entanto, o perfil de climatização é muito semelhante e a diferença dos resultados das duas construções não é muito acentuada, pelo que a escolha também deve ter em consideração os restantes parâmetros, tais como, durabilidade e resistência à humidade.

4.4 Escolha do pé direito do piso 1 do edifício

A escolha do pé direito será feita entre 2, 2.5 e 3 metros, tal como referido anteriormente. Para calcular a climatização referente às diferentes alturas foi necessário fixar os restantes parâmetros, tendo-se assumido a construção com fardos de palha e inexistência de janelas. A Figura 4.9 apresenta os resultados obtidos.

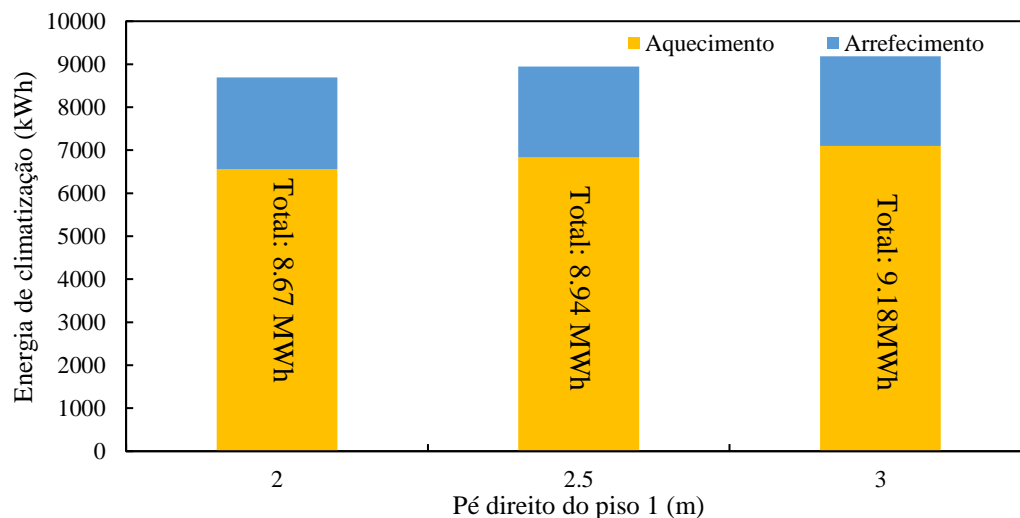


Figura 4.9- Energia necessária para climatização para as diferentes medidas de pé direito do piso 1.

Capítulo 4- Resultados

Relativamente à energia de climatização para aquecimento, o pé direito de 2 metros é o que apresenta menores consumos (6.56 MWh), pois quanto menor é o espaço menor será a energia necessária para aquecimento do ar interior, visto que a ocupação por parte das pessoas, a iluminação e equipamentos gera algum calor interno, aquecendo o espaço. Por outro lado, em espaços com maior volume, a energia será maior pois o calor interno compreende apenas uma pequena parte do aquecimento necessário. Por essa razão, o pé direito de 3 metros é o que apresenta o maior valor de energia necessário para aquecimento.

Por outro lado, a energia de arrefecimento necessária para o pé direito de 3 metros é a que apresenta menores valores (2,09 MWh). Para as mesmas condições, quanto maior é o espaço menor será a energia necessária para o arrefecimento, pois existe um maior volume para dissipar o calor gerado internamente.

Através dos valores apresentados é possível perceber que o melhor valor para o pé direito do edifício é 2 metros, pois apesar de apresentar uma maior energia de arrefecimento que os 3 metros, o valor de climatização anual (soma do aquecimento e arrefecimento) é o mais baixo, totalizando 8.69 MWh. No entanto, os valores de climatização para as diferentes alturas são bastante próximos, com diferenças na ordem dos 200 kWh anuais, como é possível aferir através da Figura 4.9. Portanto, a escolha do pé direito deve ter em consideração outros factores tais como a comodidade ou espaço disponível.

4.5 Otimização da área de envidraçado

A área de envidraçado foi otimizada por forma a reduzir o consumo da iluminação e de aquecimento no período de Inverno (1 de Novembro a 28 de Fevereiro). Tal como referido, utilizou-se o Galapagos para esta otimização, em que serão testadas várias áreas de envidraçado através do seu algoritmo, por forma a encontrar a melhor percentagem de janela para cada fachada.

Pela Figura 4.10 é possível verificar que os resultados das gerações (20) estão a convergir, o que significa que a função Galapagos encontrou a melhor solução. Selecionando em mostrar as melhores soluções no *display*, encontra-se a melhor solução: 5153.84 kWh. Posteriormente, ao seleccionar a opção “reinstata” obtêm-se as percentagens de janela correspondentes, apresentadas na Figura 4.11.

Estudo de uma habitação sustentável baseado em materiais de construção natural

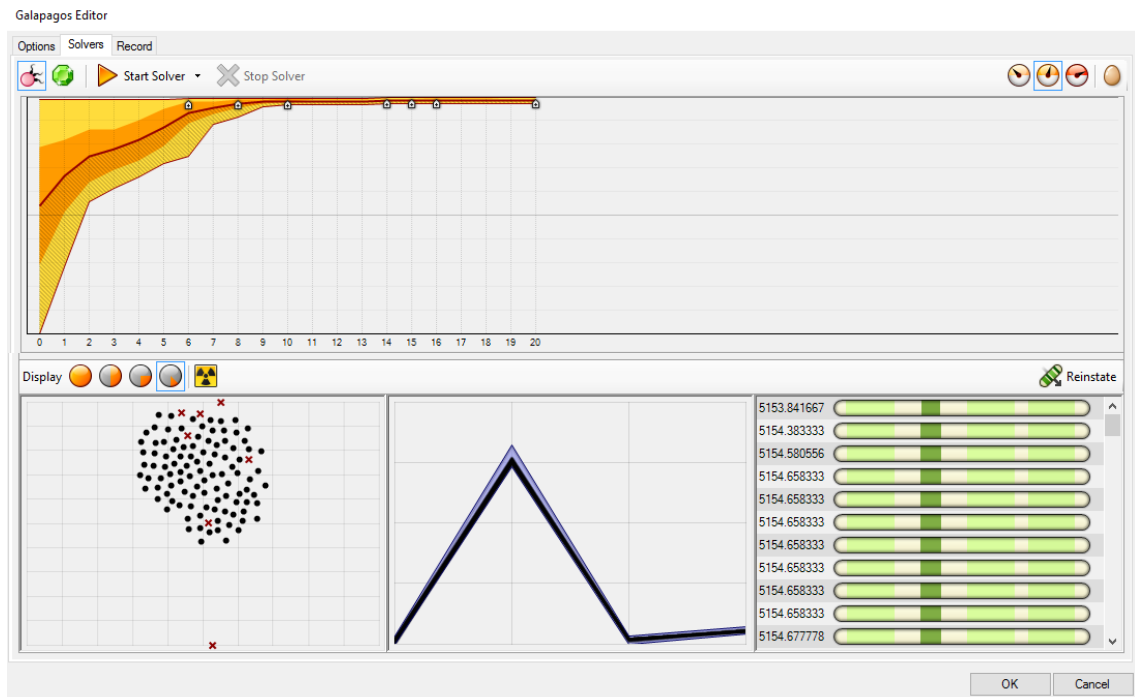


Figura 4.10 - Otimização da área de envidraçado através do *software* Galapagos.

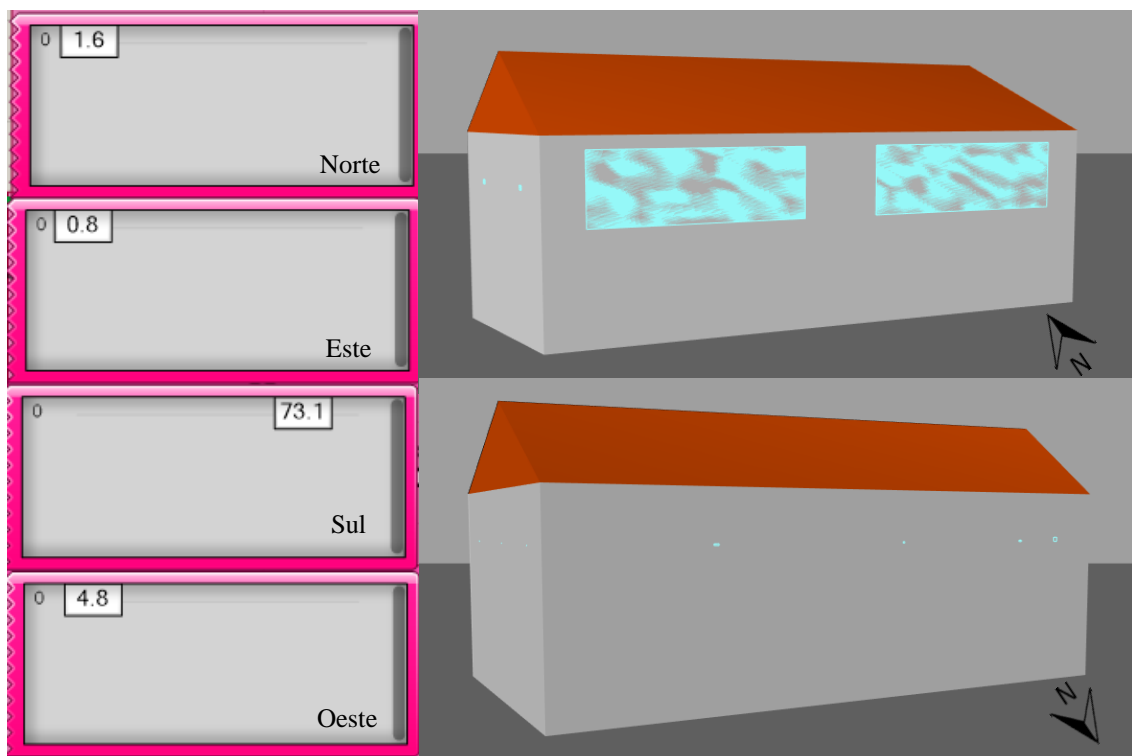


Figura 4.11- Melhores valores obtidos para a área de envidraçado em cada fachada do edifício.

Observando a Figura 4.11, é possível perceber que a percentagem de janela Norte, Este e Oeste apresenta valores muito reduzidos. Por outro lado, a percentagem de janela a Sul é bastante elevada.

Capítulo 4- Resultados

A Tabela 4.1 apresenta a área de envidraçado em cada fachada para a qual o consumo da iluminação e de aquecimento no período de Inverno tem o menor valor encontrado. Sendo possível confirmar que apenas a área de envidraçado na fachada a Sul apresenta valores elevados. No entanto, nas restantes direções, a área de envidraçado é praticamente desprezável.

Tabela 4.1- Resultados da otimização da área de envidraçado.

Fachada	Percentagem de Janela (%)	Área de janela (m ²)
Norte	1.6	0.6
Este	0.8	0.2
Sul	73.1	28.0
Oeste	4.8	0.6

4.6 Otimização da inclinação do telhado

A otimização da inclinação do telhado será feita tendo em conta a produção fotovoltaica no Inverno. Portanto, será escolhido o ângulo que permite produzir mais energia nos meses de Novembro, Dezembro, Janeiro e Fevereiro. Apenas se assumiu a produção de energia fotovoltaica na água do telhado a Sul, uma vez que é nesta orientação que incide mais radiação solar.

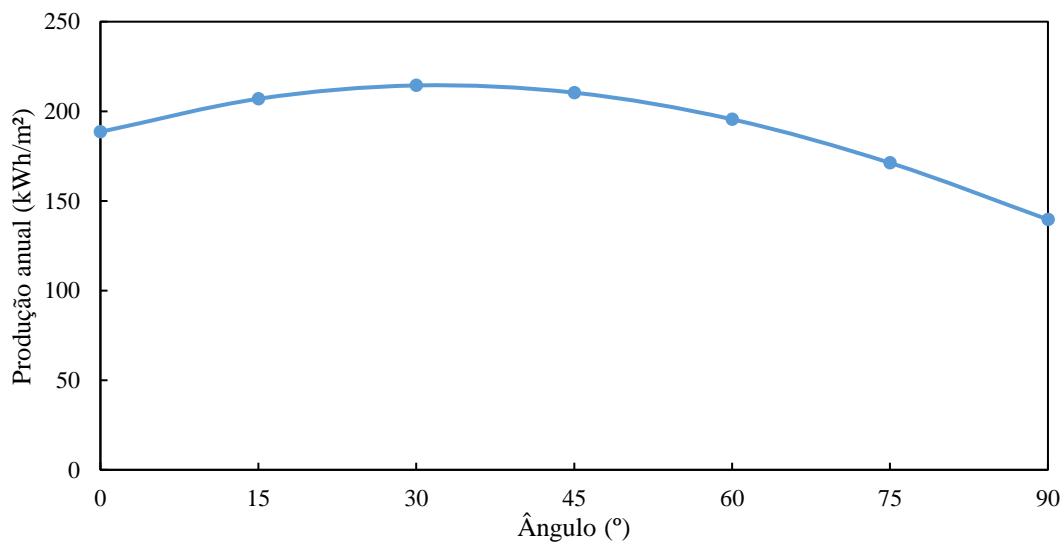


Figura 4.12 - Variação da produção anual com o ângulo de inclinação do telhado.

A Figura 4.12 apresenta a variação da produção anual com o ângulo do telhado. Através da sua análise é possível perceber que o ângulo para o qual a produção anual é superior situa-se entre os 15° e 45°, com diferenças não muito significativas.

Estudo de uma habitação sustentável baseado em materiais de construção natural

No entanto, a produção no Inverno é superior entre os 45° e 75°, Figura 4.13. Esta diferença deve-se à altura do Sol no Inverno, que é mais baixa.

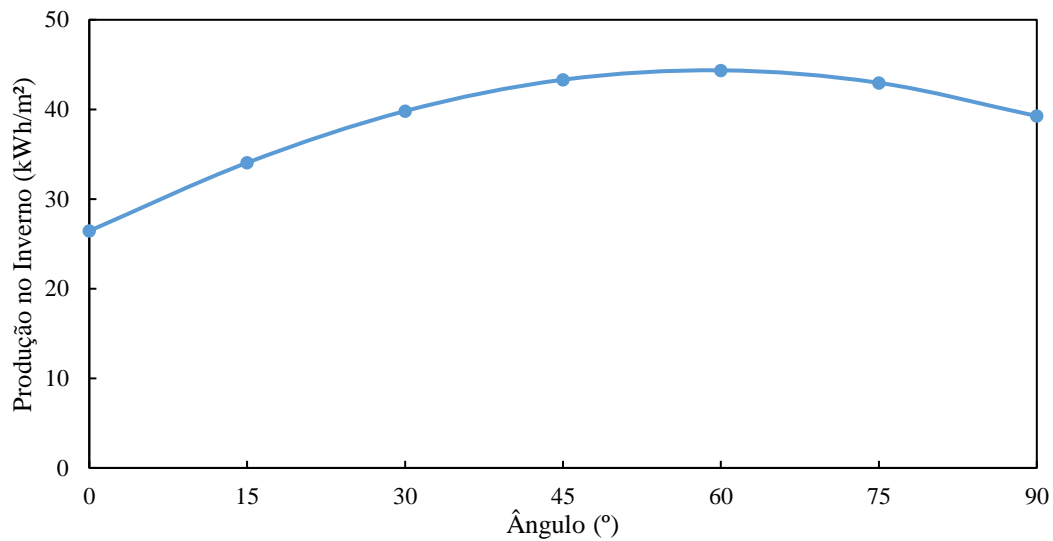


Figura 4.13- Variação da produção no Inverno com o ângulo de inclinação do telhado.

Pela Tabela 4.2 observa-se que o ângulo que permite produzir mais energia no Inverno é 59°, possibilitando uma produção anual de 196.83 kWh/m² e produção no Inverno de 44.35 kWh/m², que corresponde a 7.80 MWh e 1.69 MWh, respetivamente, para uma área de telhado a Sul de 38.01 m², Figura 4.14.

Tabela 4.2- Produção anual e no Inverno para os melhores ângulos de inclinação.

Ângulo (°)	Produção anual (kWh/m ²)	Produção no Inverno (kWh/m ²)
57	199.311	44.349
58	198.091	44.365
59	196.831	44.369
60	195.526	44.361
61	194.183	44.344
62	192.794	44.315

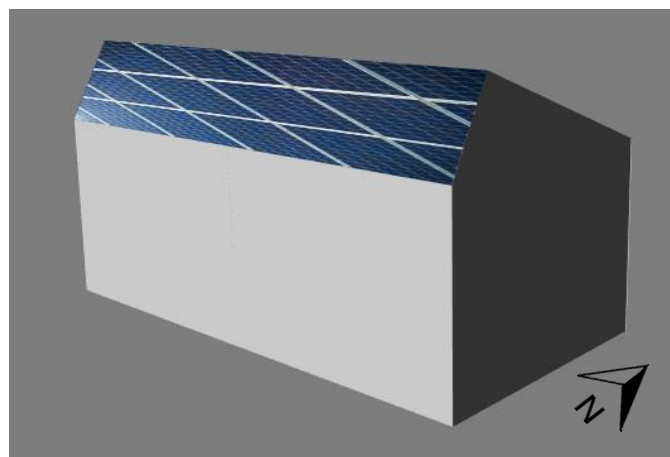


Figura 4.14- Esquema da inclinação e área de painéis do telhado a Sul.

Capítulo 4- Resultados

4.7 Otimização da pala

A área de janela foi otimizada tendo em conta os consumos no Inverno (climatização e iluminação), mas esta otimização pode não ser benéfica para os meses de Verão. A colocação de uma pala, na orientação a Sul pode reduzir os consumos de Verão, sem interferir com os consumos de Inverno pois o sol neste período é baixo, sendo pouco afetado pela pala. Portanto, será estudado o efeito da colocação de uma pala com a mesma inclinação do telhado (59°), para possibilitar a colocação de painéis, de modo a aumentar a produção de energia solar fotovoltaica.

Tabela 4.3- Energia consumida no Verão vs comprimento da pala a Sul.

Comprimento da pala (m)	Energia consumida no Verão- Iluminação e arrefecimento (kWh)
0	3086.2
0.5	2850.8
1	2574.7
2	2450.9

Considerou-se o período de Verão de 1 de Maio a 30 de Setembro, ou seja, os meses quentes. A colocação de pala diminui os valores do consumo de energia de iluminação e arrefecimento no Verão, como é possível observar na Tabela 4.3, em que o consumo referido diminui à medida que se aumenta o comprimento da pala. Como a área de envidraçado a Sul é bastante elevada, a colocação de pala permite diminuir os ganhos solares do edifício e consequentemente a necessidade de arrefecimento.

4.8 Consumo e produção de energia

Após a otimização dos vários parâmetros, realizada anteriormente, o consumo difere do apresentado na secção 4.1. Na Figura 4.15 é possível observar o perfil do consumo diário, em que se repara que neste caso o consumo de iluminação é variável e existe um aumento da energia gasta por climatização, nomeadamente arrefecimento no Verão, relativamente ao consumo considerado inicialmente. É possível também aferir que o pico de climatização (que ocorre por volta do início de Fevereiro) é superior após a otimização, atingindo os 110 kWh, que pode dever-se ao fato da melhor solução permitir aumentar os consumos de aquecimento e iluminação em alguns dias, desde que permita diminuir estes consumos no período total de Inverno. Além disso, a colocação de uma pala com um comprimento de 2 metros, diminui a energia radiativa recebida através da superfície envidraçada no Inverno, nomeadamente nesse dia.

O consumo total anual é de 16.26 MWh, um pouco superior ao considerado na secção 4.1. Este aumento deve-se ao facto de algumas das otimizações serem feitas relativamente ao Inverno. No entanto, o que se adequa ao Inverno, pode não ser o mais apropriado para o resto do ano, nomeadamente para os meses de Verão, verificando-se um aumento do consumo de energia para colmatar as necessidades de arrefecimento.

Estudo de uma habitação sustentável baseado em materiais de construção natural

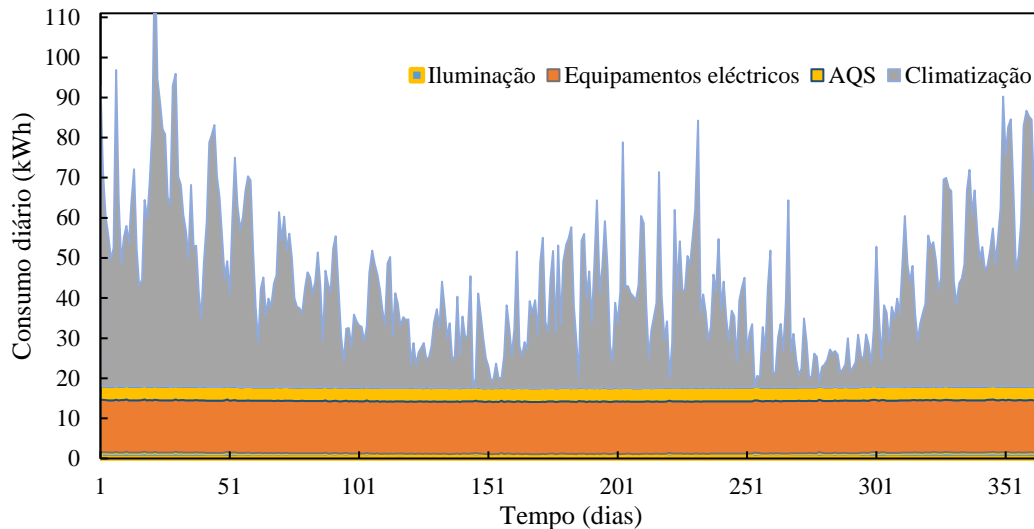


Figura 4.15 - Consumo de energia diário após otimização.

Pela Figura 4.16 é possível perceber quais são os maiores consumidores de energia. A climatização é o que tem maiores consumos de energia, tendo aumentado a sua importância para os 60%. Por outro lado, os equipamentos eléctricos, reduziram a sua contribuição para o consumo total. Ainda comparando esta figura com a apresentada na secção 4.1 (Figura 4.1), verifica-se uma redução da iluminação provocada pela otimização da área de envidraçado.

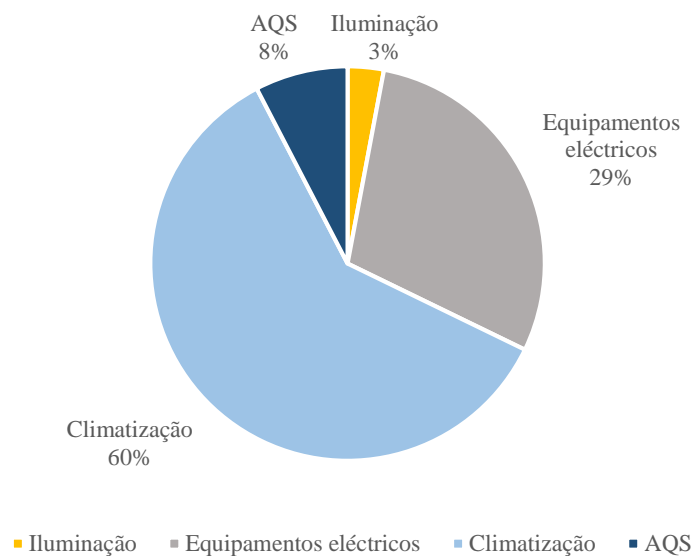


Figura 4.16- Distribuição do consumo após otimização.

Para a produção de energia foram criados três cenários:

- Produção com painéis solares apenas no telhado;
- Produção com painéis solares no telhado e pala;
- Produção com painéis solares no telhado, pala e seguidor solar.

Capítulo 4- Resultados

O perfil anual de produção de energia para os vários cenários é apresentado na Figura 4.17.

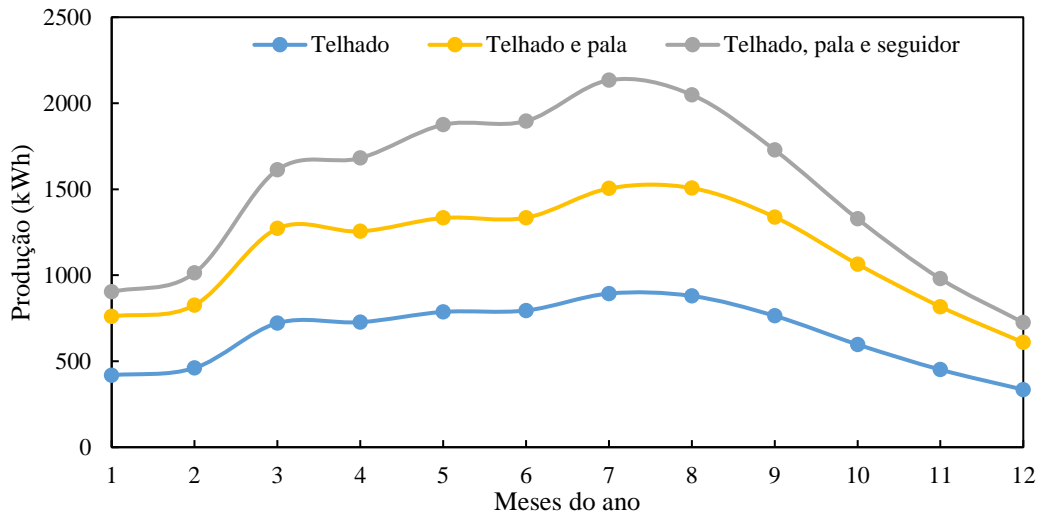


Figura 4.17 - Produção de energia solar fotovoltaica ao longo do ano para os três cenários.

A produção apenas com painéis solares no telhado foi apresentada na otimização da inclinação do telhado, tendo-se obtido uma produção de 7.48 MWh, para uma área de 38.01 m². Neste cenário, a produção é superior nos meses de Verão, pois a disponibilidade de radiação solar é mais elevada. No entanto, nos meses de Inverno, produção também é bastante significativa, pois a inclinação foi otimizada exatamente para este período.

A produção com painéis no telhado e pala produz uma energia anual de 13.62 MWh para uma área total de 68.49 m². Assumiu-se uma pala de 2 metros, pois é a que permite uma maior área de produção. Ao observar o perfil de produção verifica-se que é semelhante ao do cenário anterior, pois a inclinação é a mesma, apenas se aumentou a área de produção. Portanto, a produção é bastante superior relativamente à apresentada anteriormente.

A produção anual obtida através dos cenários anteriores não é suficiente para suprir as necessidades impostas pelo consumo, sendo por isso necessário adicionar mais um elemento para produção de energia solar fotovoltaica. Optou-se por um seguidor solar pois permite um maior aproveitamento da radiação solar, adaptando-se tanto ao período de Inverno como de Verão. A produção obtida por este cenário é de 16.77 MWh. Relativamente ao perfil de produção, este não é idêntico aos anteriores (a distância entre as linhas amarela e cinzenta na Figura 4.17 difere), pois apesar do painel e da pala serem dimensionados para a mesma inclinação, o seguidor solar varia a inclinação com a posição do sol.

Estudo de uma habitação sustentável baseado em materiais de construção natural

Na Figura 4.18 é possível comparar o perfil de consumo com o de produção de energia, na qual se verifica nos meses de Março a Outubro, a produção é suficiente para colmatar o consumo. Por outro lado, de Novembro a Fevereiro, a produção é inferior ao consumo. Nestes meses de Inverno, o consumo atinge o máximo e a produção atinge o seu mínimo. Por outro lado, nos meses de Verão, o perfil do consumo é semelhante ao da produção, embora esta seja sempre bastante superior, tornando o sistema sobredimensionado para este período.

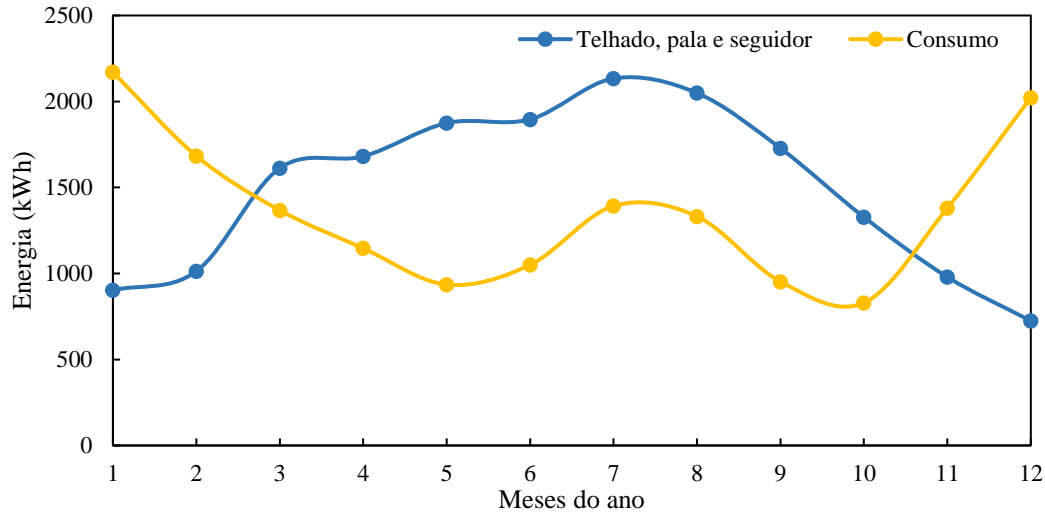


Figura 4.18- Produção e consumo de energia

Através dos vários cenários estudados é possível concluir que a produção de energia não é suficiente para o consumo durante todo o ano. Por isso, existe a necessidade de encontrar formas de aumentar a produção de energia. Algumas soluções podem ser: colocação de painéis na restante área de telhado, utilização de mais um seguidor solar. No entanto, como é possível verificar pelo perfil de produção apresentado nos resultados, a produção de energia solar fotovoltaica é baixa nos meses de Inverno, mas muito elevada nos meses de Verão, período no qual a produção está sobredimensionada. Por isso, o aumento da produção de energia solar fotovoltaica dificilmente será suficiente para colmatar o consumo durante todo o ano, sem que haja um grande desperdício de energia nos meses de Março a Outubro. Assim sendo, a melhor solução seria uma fonte de produção que “preenchesse” o consumo relativo ao aquecimento no Inverno. A biomassa é uma boa opção pois é um recurso que existe em abundância no local de estudo, que permite suprir os consumos de aquecimento e consequentemente colmatar a produção de energia fotovoltaica. A utilização de biomassa para produção de energia no Inverno permite ainda que não seja necessário a utilização de seguidor solar, sendo suficiente a colocação de painéis solares no telhado e pala a Sul, reduzindo ainda o desperdício de energia nos meses de Verão.

5. Conclusões e trabalho futuro

Neste trabalho foi possível realizar a simulação energética de um edifício no qual se instalou medidas para aumentar a sua sustentabilidade.

Este trabalho surgiu da intenção do estudo do comportamento de uma habitação sustentável baseada em materiais de construção natural, através de simulação energética. Para isso estudou-se o efeito de vários parâmetros no consumo e produção do edifício de estudo.

Para este estudo utilizou-se o Rhinoceros 5 para desenhar o edifício e a envolvente e as ferramentas do Grasshopper: DIVA para criação dos mapas de irradiação, Archsim para simulação energética e Galapagos para otimização da área de envidraçado.

Os mapas de irradiação realizados permitiram estudar as sombras existentes no local e estimar a redução da irradiação disponível, sendo por isso relevantes para as simulações energéticas.

O *bale cob* e os fardos de palha são materiais que apresentam um comportamento térmico semelhante, pois assumiu-se que o *bale cob* possui uma composição em 90% semelhante à dos fardos de palha. Além disso, apenas se estudou a sua aplicação em algumas paredes, portanto, é expectável que os valores obtidos para a climatização para os dois materiais sejam próximos. Por outro lado, fardos de palha apresentaram um melhor comportamento térmico. No entanto, ao analisar os restantes parâmetros (Tabela 3.2, secção 3.5), percebe-se que o *bale cob* deve ser escolhido, pois possui um maior tempo de vida e mais resistência à humidade.

Relativamente ao pé direito do piso 1 do edifício, o melhor valor obtido foi de 2 metros porque é o que esta associado a menores consumos de climatização. No entanto, uma altura de 2.5 metros permite um maior conforto e comodidade. Além de permitir poupar material de construção relativamente a pé direito de 3 metros. Por estas razões e devido às diferenças relativamente às restantes alturas não diferirem muito, o pé direito de 2.5 metros pode ser escolhido.

Através da otimização realizada percebe-se que a área de janela deve ser muito elevada na orientação a Sul, cerca de 70 % e muito reduzidas a Norte, Este e Oeste. Este resultado era previsto pois no Inverno, Sul é a orientação que propicia maiores ganhos solares, uma vez que o percurso do Sol neste período é mais vantajoso para esta orientação, devido ao seu percurso que se efetua para azimutes muito próximos do Sul geográfico. No entanto, nas restantes orientações o rácio entre a energia radiativa incidente no envidraçado e a energia perdida é muito baixo, por isso a área de envidraçado nestas orientações deve ser praticamente nula. Como a área de envidraçado é tão reduzida, pode ser difícil ou mesmo inviável a colocação de janelas com esta dimensão. Portanto, pode ser aceitável não colocar qualquer janela nestas direções. No entanto teria de ser efetuada uma análise de consumos para verificar qual o impacto no consumo de energia de climatização e iluminação.

O ângulo de inclinação do telhado que produz mais energia solar fotovoltaica no Inverno é 59°, diferindo do melhor ângulo a nível anual situado entre os 15° e 45°, pois o Sol, no Inverno, encontra-se numa posição mais baixa. A otimização para este período, apesar de diminuir a energia anual produzida, é importante para uma melhor sobreposição do consumo e produção de energia a nível diário.

A existência de pala a Sul diminui os consumos de energia de arrefecimento no Verão, sendo o comprimento de 2 metros aquele que permite a maior redução. No entanto, a colocação de uma pala com um comprimento muito elevado pode reduzir a energia radiativa recebida através da janela no período de Inverno.

Capítulo 4- Resultados

O consumo obtido após a otimização dos parâmetros alterou-se, verificando-se um aumento, embora que reduzido. Este aumento de consumo pode ser explicado pelo facto da otimização da área de envidraçado ter sido efetuada relativamente ao período de Inverno, ou seja, o que é ideal para este período pode não o ser para o resto do ano.

Com este trabalho foi possível perceber que a utilização de materiais sustentáveis tem ainda um longo caminho a percorrer, sendo um tema emergente, acerca do qual é bastante difícil encontrar informações científicas e viáveis. No entanto, o seu estudo é muito importante pois permite realmente reduzir a energia inerente à construção e emissões de gases de efeito de estufa associados, apresentando um melhor comportamento térmico que muitos materiais de construção comuns. Os parâmetros dos materiais naturais são diferentes de local para local e entre fontes de informação dificultando por isso, a simulação energética do seu comportamento térmico.

As ferramentas de simulação energética apresentam uma elevada importância aquando a projeção de edifícios novos ou mesmo modificação de existentes, pois permitem saber, embora de uma forma aproximada, o consumo e produção de energia do edifício. Possibilitam o seu dimensionamento de acordo com determinados parâmetros, que dependem do objetivo que se pretende. Relativamente às ferramentas de simulação utilizadas, estas revelaram ser adequadas ao objetivo do trabalho, pois permitiram o estudo dos parâmetros que se pretendia.

Por outro lado, as simulações energéticas são baseadas em dados climáticos médios ou de um ano típico e em calendários de utilização previstos, levando a que os dados obtidos difiram dos que se verificam na realidade. No entanto, esta é a única forma viável e possível de prever, o uso e produção de energia.

Relativamente à ferramenta utilizada, o Archsim é um *software* bastante recente e que necessita ainda de algum desenvolvimento, tal como a maioria deste tipo de ferramentas de simulação que utilizam o EnergyPlus como meio de cálculo. O fato de não estar disponível muita informação, dificultou o desenvolvimento da simulação de energia. No entanto, este tipo de ferramenta torna estas simulações mais simples e intuitivas de realizar.

Futuramente seria interessante estudar a construção e o comportamento de outros materiais naturais existentes, nomeadamente taipa, madeira e tijolos de barro e de materiais reciclados, pois são materiais que permitem uma construção sustentável, com baixo custo. Seria igualmente interessante comparar o comportamento destes materiais com o dos materiais de construção tradicional, por forma a encontrar os prós e contras da construção sustentável e tradicional. O estudo das emissões de CO₂ relativas a cada tipo de construção também seria um ponto interessante para comparação.

Outro trabalho futuro poderia ser o estudo da implementação de materiais naturais num clima extremo, no qual seria possível aferir qual o material natural adequado a cada clima.

A comparação entre resultados com diferentes ferramentas de simulação energética também seria um trabalho futuro possível, permitindo perceber as diferenças entre os modelos inerentes a cada ferramenta estudada.

Como último trabalho futuro sugerido, seria interessante estudar a implementação de outras fontes de produção de energia, comparando o perfil de produção de energia com o de consumo. Para este trabalho sugere-se procurar fontes que permitam adequar a produção ao consumo. Alguns exemplos de produção de energia renovável sugeridos são: mini-hídrica, uma vez que existe um pequeno reservatório de água no local de estudo e biomassa, que existe em quantidade no local de estudo. Ainda inserido neste trabalho sugerido seria interessante estudar formas de reduzir o consumo de energia elétrica, por exemplo aquecimento com tubos subterrâneos ou com um dispositivo “*Rocket Mass Heater*”, que consiste num sistema central de aquecimento a biomassa que pode englobar *cob* na sua construção.

6. Bibliografia

- [1] “Metas - Apren | Associação de Energias Renováveis.” [Online]. Available: <http://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/metas/>. [Accessed: 11-Aug-2016].
- [2] “Sustainable | WBDG Whole Building Design Guide.” [Online]. Available: <https://www.wbdg.org/design/sustainable.php>. [Accessed: 25-Jul-2016].
- [3] J. C. Morel, a. Mesbah, M. Oggero, and P. Walker, “Building houses with local materials: Means to drastically reduce the environmental impact of construction,” *Build. Environ.*, vol. 36, no. 10, pp. 1119–1126, 2001.
- [4] V. Ribeiro, “Materiais, sistemas e técnicas da construção tradicional-Contributo para o estudo da arquitectura vernácula da região oriental da serra do Caldeirão,” pp. 10–11.
- [5] E. Peris Mora, “Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 3, pp. 1329–1334, 2007.
- [6] C. de C. e Indústria, “Setor Português do Ambiente e Energia,” 2015.
- [7] “Understanding sustainable construction.” [Online]. Available: <https://www.lafargeholcim-foundation.org/AboutPages/what-is-sustainable-construction>. [Accessed: 11-Aug-2016].
- [8] “Sustainable | Whole Building Design Guide.” [Online]. Available: <https://www.wbdg.org/design/sustainable.php>. [Accessed: 11-Aug-2016].
- [9] “sustainable material.” [Online]. Available: <http://www.metroplan-ecofriendly.co.uk/sustainable-material>. [Accessed: 12-Aug-2016].
- [10] “REH | Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação.” [Online]. Available: <http://www.reh.pt/>. [Accessed: 11-Aug-2016].
- [11] DL No 118/2013, “Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de Agosto,” *Diário da República N.º 159, 1.ª série*, p. 4988–5005, Lisboa, Portugal (in Portuguese), 2013.
- [12] J. Sousa, “Energy Simulation Software for Buildings: Review and Comparison,” *Inf. Technol. Energy Appl. 2012*, pp. 6–7, 2012.
- [13] ADENE, “Guia Da Eficiência Energética,” *Guia Da Eficiência Energética*, p. 94, 2011.
- [14] “EnergyPlus Energy Simulation Software: About EnergyPlus.” [Online]. Available: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_about.cfm. [Accessed: 07-Aug-2015].
- [15] “TRNSYS - Official Website.” [Online]. Available: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/faq/faq.htm>. [Accessed: 22-Aug-2015].
- [16] “OpenStudio | OpenStudio.” [Online]. Available: <https://www.openstudio.net/>. [Accessed: 23-Aug-2015].
- [17] “Energy Analysis Software | Green Building Studio | Autodesk.” [Online]. Available: <http://www.autodesk.com/products/green-building-studio/overview>. [Accessed: 24-Aug-2015].
- [18] “About | VELUX.” [Online]. Available: http://eic.velux.com/eic_visualizer/about. [Accessed: 30-Sep-2016].
- [19] “IDA ICE - EQUA - Building and Tunnel simulations.” [Online]. Available: <http://www.equa.se/en/ida-ice>.

- [20] “Ladybug + Honeybee.” [Online]. Available: <http://www.grasshopper3d.com/group/ladybug>. [Accessed: 10-Aug-2015].
- [21] “Rhinoceros Feature Overview.” [Online]. Available: <https://www.rhino3d.com/features>. [Accessed: 10-Aug-2015].
- [22] “Grasshopper.” [Online]. Available: <http://www.grasshopper3d.com/>. [Accessed: 10-Aug-2015].
- [23] “DIVA for Rhino.” [Online]. Available: <http://diva4rhino.com/>. [Accessed: 18-Aug-2016].
- [24] “Archsim.” [Online]. Available: <http://archsim.com/>. [Accessed: 19-Aug-2016].
- [25] “umi.” [Online]. Available: <http://urbanmodellinginterface.ning.com/>. [Accessed: 18-Aug-2016].
- [26] “Energy analysis for Rhino and Grasshopper - Formsolver.” [Online]. Available: <https://www.formsolver.com/about.php>.
- [27] “EnergyPLAN | Advanced energy systems analysis computer model.” [Online]. Available: <http://www.energyplan.eu/>. [Accessed: 10-Aug-2015].
- [28] G. Ward, J, “The RADIANCE Lighting Simulation and Rendering System,” *21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 459–472, 1994.
- [29] U.S. Department of Energy, *Engineering Reference*, no. c. 2016, p. 19.
- [30] “Run Energy Plus- Archsim.” [Online]. Available: <http://archsim.com/documentation-energy-modeling/run-energy-plus/>. [Accessed: 19-Sep-2016].
- [31] “Evolutionary Principles applied to Problem Solving - Galapagos.” [Online]. Available: <http://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles>.
- [32] Câmara Municipal de Guimarães, “Levantamento Arvóreo-Arbustivo.”
- [33] “LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia.” [Online]. Available: <http://www.lneg.pt/>. [Accessed: 17-Aug-2016].
- [34] “SNIRH :: Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos.” [Online]. Available: <http://snirh.pt/>. [Accessed: 17-Aug-2016].
- [35] M. L. F. PEREIRA, “Caraterização térmica de soluções construtivas em xisto e em granito,” 2015.
- [36] “Stone | Marble | Granite | Sandstone | Limestone | Slate | Building Materials - Understand Building Construction.” [Online]. Available: <http://www.understandconstruction.com/stone.html>. [Accessed: 23-Aug-2016].
- [37] National Building Granite Quarries Association, “StoneGraniteSpecs-Specifications for architectural granite.”
- [38] M. E. Young, “Dampness penetration problems in granite buildings in Aberdeen, UK: Causes and remedies,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 9, pp. 1846–1859, 2007.
- [39] E. C. Catarina Pinto, “Construção ecológica com fardos de palha,” pp. 1–2.
- [40] “Workshop Construção com fardos de Palha - Palombar.” [Online]. Available: <http://www.palombar.org/eventos/workshop-construcao-com-fardos-de-palha-1705452784/>. [Accessed: 04-Aug-2015].

- [41] “LBEEC: Straw Bale Housing Technical Paper.” [Online]. Available: <http://www.longbrancheec.org/pubs/strawbale.html>. [Accessed: 11-Aug-2015].
- [42] H. Niroumand, M. F. M. Zain, and M. Jamil, “Various Types of Earth Buildings,” *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 89, pp. 226–230, 2013.
- [43] L. Miccoli, U. Müller, and P. Fontana, “Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 61, pp. 327–339, 2014.
- [44] F. Butler, “www.mudandwood.com,” 2012. .
- [45] F. Collet, L. Serres, J. Miriel, and M. Bart, “Study of thermal behaviour of clay wall facing south,” *Build. Environ.*, vol. 41, no. 3, pp. 307–315, 2006.
- [46] S. Goodhew and R. Griffiths, “Sustainable earth walls to meet the building regulations,” *Energy Build.*, vol. 37, no. 5, pp. 451–459, 2005.
- [47] “Specific Heat of common Substances.” [Online]. Available: http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_391.html.
- [48] B. Environment and W. I. T. Press, “Transactions on the Built Environment vol 8, © 1995 WIT Press, www.witpress.com, ISSN 1743-3509,” vol. 8, pp. 1–3, 1995.
- [49] J. M. F. Ramos, “Recursos minerais no Norte de Portugal.”
- [50] “Stone Construction.” [Online]. Available: <http://www.sustainablebuild.co.uk/constructionstone.html>. [Accessed: 05-Aug-2015].
- [51] “Questions and Answers About Cob | Cob Cottage Company.” [Online]. Available: <http://www.cobcottage.com/questions>. [Accessed: 05-Aug-2015].
- [52] “Sustentabilidade é Acção: Casas em palha.” [Online]. Available: <http://sustentabilidadenaopalavraeacao.blogspot.pt/2010/11/casas-em-palha.html>. [Accessed: 05-Aug-2015].
- [53] “Frequently Asked Questions | Straw Works.” [Online]. Available: <http://www.strawworks.co.uk/faqs/>. [Accessed: 04-Sep-2016].
- [54] *Estimating Building Costs*. CRC Press, 2003.
- [55] “House of Bales, Questions About Strawbale Construction.” [Online]. Available: <http://houseofbales.com.au/questions.html>. [Accessed: 05-Aug-2015].
- [56] B. Miglio, “Durability of stone,” *Journal of the Franklin Institute*, vol. 204, no. 2. pp. 268–269, 1927.
- [57] “Cob Construction : NBNe - Natural Builders Northeast.” [Online]. Available: <http://www.nbne.org/natbuild/cob.php>. [Accessed: 05-Aug-2015].
- [58] J. de B. e F. B. Autor: Patrícia Lourenço, “Novas tecnologias na aplicação de terra crua na construção,” 2002.
- [59] “Embodied Carbon (aka Embodied Energy) & EPDs.” [Online]. Available: <http://www.greenspec.co.uk/building-design/embodied-energy/>. [Accessed: 04-Aug-2015].
- [60] “Cores que ajudam a economizar | AGÊNCIA FAPESP.” [Online]. Available: http://agencia.fapesp.br/cores_que_ajudam_a_economizar/8008/. [Accessed: 04-Aug-2015].

- [61] “Preço em Portugal de m³ de Muro de pedra. Gerador de preços para construção civil. CYPE Ingenieros, S.A.” [Online]. Available: http://www.geradordeprecos.info/obra_nova/calculaprecio.asp?Valor=2|0_0|2|ECM010|ecm_muro_construccion:_0_0_0_0_0_0_0. [Accessed: 04-Sep-2016].
- [62] Quora, “How much does it cost to build a recommendation engine?,” 2013. [Online]. Available: <http://www.brighthub.com/environment/green-living/articles/117825.aspx>. [Accessed: 02-Aug-2015].
- [63] Peritos Avaliadores da Lista Oficial da Justiça, “Dados Agronómicos.”
- [64] “Green Home Building: Mixing and applying cob.” [Online]. Available: <http://www.greenhomebuilding.com/QandA/cob/mixing.htm>. [Accessed: 05-Aug-2015].
- [65] “Normuro.” [Online]. Available: <http://normurogranito.blogspot.pt/>. [Accessed: 23-Aug-2016].
- [66] “Granite walls.” [Online]. Available: <http://www.lantoom.co.uk/portfolio/granite-walls>. [Accessed: 24-Aug-2016].
- [67] “Visitar Monsanto, Guia de Viagem, Dicas, Roteiros, Fotos.” [Online]. Available: <http://www.joaoleitao.com/viagens/2015/10/24/visitar-monsanto/>.
- [68] “terrapalha | estúdio de arquitectura.” [Online]. Available: <http://terrapalha.blogspot.pt/search?updated-min=2008-01-01T00:00:00Z&updated-max=2009-01-01T00:00:00Z&max-results=19>. [Accessed: 23-Aug-2016].
- [69] “Cob | Kirk Nielsen.” [Online]. Available: <http://kirknielsen.com/project/cob/>. [Accessed: 23-Aug-2016].
- [70] “House Alive! Cob and Natural Building Workshops | Wood-cob/bale-cob.” [Online]. Available: <http://www.housealive.org/#!wood-cobbale-cob/c14ji>. [Accessed: 24-Aug-2016].
- [71] “A Bale/cob Experiment | Happy Campers The Creations of Hap & Lin Mullenneaux.” [Online]. Available: <https://hapnlin.com/a-balecob-experiment/>. [Accessed: 24-Aug-2016].