

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



Desenvolvimento de um Sistema Agrofotovoltaico

João Luís Ventura Manita

Mestrado em Engenharia da Energia e Ambiente

Dissertação orientada por:
Professor Doutor Miguel Centeno Brito
Doutor Guilherme Gaspar

2022

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus pais e irmã por todo o apoio e encorajamento dado ao longo deste extenso percurso, pois sem essa ajuda nada teria sido possível.

À minha namora pela ajuda e por estar sempre ao meu lado a apoiar, principalmente nesta fase final.

Aos meus colegas e amigos André Raposo e Alexander Marques pela ajuda e pelos bons momentos de descontração que passamos ao longo do curso.

E por fim queria também agradecer aos professores Miguel Brito e Guilherme Gaspar por todas a ajuda e orientação na construção desta dissertação ao longo do último ano.

A todos o meu sincero agradecimento por tudo.

Resumo

A produção de energia elétrica por meio de energias renováveis é cada vez mais uma preocupação mundial. Assim, é urgente que estas passem a ser a principal forma de produção de energia em detrimento da utilização de combustíveis fósseis. Dentro das energias renováveis, a energia solar fotovoltaica é uma das que tem maior potencial. Além da produção de energia outra grande preocupação da população mundial é a produção de alimentos, uma vez que o consumo mundial destes recursos é cada vez maior. É no seguimento destas duas grandes preocupações da população mundial que surgem algumas das motivações para o surgimento do conceito agroPV. Dentro dessas motivações estão:

- a competição por terrenos que são favoráveis para a implementação tanto de centrais fotovoltaicas, como de pontos de cultivo de alimentos agrícolas;
- a perceção social de que vai existir uma escassez de terreno para a produção agrícola se forem construídas grandes centrais fotovoltaicas. No entanto esta perceção não é justificada uma vez que com a tecnologia atual é possível produzir grandes quantidades de energia em pequenas áreas;
- criação de outras fontes de rendimento para os agricultores;
- criação de sinergias entre a produção de energia PV e a produção de alimentos agrícolas que juntas podem produzir mais que em separado.

O conceito agroPV na sua definição original consiste na utilização do mesmo espaço de terreno para produção de energia e simultaneamente há produção de produtos agrícolas. Nos últimos anos este conceito tem ganho alguma relevância e é considerado uma opção cada vez mais viável de rentabilizar os terrenos.

Assim, devido à crescente importância do conceito AgroPV e ao grande potencial da produção de energia fotovoltaica que surge o tema desta dissertação que consiste em desenvolver e otimizar um sistema agrofotovoltaico que será construído no campus solar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL).

Palavras-Chave: AgroPV, culturas, plantas, módulos PV, necessidade de rega

Abstract

The production of electricity through renewable energies is increasingly a global concern. Thus, it is urgent that these become the main form of energy production to the detriment of the use of fossil fuels. Within the renewable energies, photovoltaic solar energy is one of the ones with the greatest potential. In addition to energy production, another major concern of the world population is food production, since the world consumption of these resources is increasing. It is in the wake of these two major concerns of the world population that some of the motivations for the emergence of the agroPV concept arise. Among these motivations are:

- the competition for land that is favorable for the implementation of both photovoltaic plants and agricultural food cultivation points;
- the social perception that there will be a scarcity of land for agricultural production if large photovoltaic plants are built. However, this perception is not justified since with current technology it is possible to produce large amounts of energy in small areas;
- creating other sources of income for farmers;
- creating synergies between PV energy production and agricultural food production that together can produce more than separately.

The agroPV concept in its original definition consists of the use of the same land space for energy production and simultaneously for the production of agricultural products. In recent years this concept has gained some relevance and is considered an increasingly viable option to monetize land.

Thus, due to the growing importance of the AgroPV concept and the great potential of photovoltaic energy production, the theme of this dissertation arises, which consists of developing and optimize resources an agrophotovoltaic system that will be built on the solar campus of the Faculty of Sciences of the University of Lisbon (FCUL).

Keywords: AgroPV, crops, plants, PV modules, irrigation needs

Índice

Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iii
Abstract	iv
1 Introdução.....	5
1.1 Apresentação do tema	5
1.2 Enquadramento.....	5
1.3 Objetivos	6
1.4 Organização da dissertação	6
2 Sistemas agrofotovoltaicos: estado da arte.....	7
2.1 Definição do Conceito.....	7
2.2 Barreira e soluções para construção de sistemas agroPV.....	8
2.3 Configuração de sistemas agroPV.....	9
2.3.1 Configurações.....	9
2.4 PV Bifacial	12
2.5 Ferramentas utilizadas para modelação.....	13
2.6 Culturas	14
2.6.1 As necessidades de radiação para o crescimento biológico.....	14
2.7 Gestão de água.....	16
2.8 Monitorização.....	17
2.9 Descrição de projetos AgroPV	18
3 Método	23
3.1 Apresentação e descrição do SketchUP	24
3.2 Descrição detalhada do Plugin Sunhours e aplicação no caso de estudo	24
3.3 Cálculo a radiação global através da fórmula Angström-Prescott e os dados obtidos com o Sunhours.....	28
3.4 Evapotranspiração (ET_0) através da fórmula de Turc.....	29
4 Resultados	30
4.1 Cálculo do número de horas de sol para diferentes ângulos entre 0° e 90°	30
4.2 Cálculo do número de horas de sol para o ângulo de 30°	32
4.3 Cálculo da evapotranspiração (ET_0) através da fórmula de Turc	34
4.4 Cálculo da necessidade de rega	36
5 Discussão dos resultados	38
5.1 Tipos de culturas que podem ser utilizadas no caso de estudo.....	38
5.2 Gestão de água.....	39
5.3 Configuração dos módulos do caso de estudo.....	39

7. Conclusão	40
8. Referências bibliográficas	41
6 Anexos.....	45

Índice de figuras

Figura 1- Objetivos de desenvolvimento sustentável relevantes.....	5
Figura 2- Exemplo de sistema agroPV montado no solo	10
Figura 3- Exemplo de sistema agroPV montado em estrutura com uma altura Z.....	10
Figura 4- Exemplo de sistema agroPV bifacial colocados numa posição vertical	10
Figura 5- Distribuição a área abaixo dos painéis.....	11
Figura 6-Módulos bifaciais	13
Figura 7- Ferramentas utilizadas para modelação	14
Figura 8-Radiação típica no ano de 2015	23
Figura 9- Configuração e disposição de referência dos módulos.....	23
Figura 10-Exemplo da caixa de diálogo onde se define a densidade da grelha	25
Figura 11-Exemplo de caixa de diálogo de configuração dos intervalos de tempo	26
Figura 12- Exemplo de resultados dos cálculos efetuados pelo SunHours no SkechUp.....	27
Figura 13- Caixa de diálogo para configuração da escala de cores da grelha	28
Figura 14- Estrutura de suporte com os módulos separados	30
Figura 15- Estrutura de suporte com os módulos juntos	30
Figura 16- Percentagem de horas de sol anual para cada ângulo de inclinação e para as diferentes disposições dos módulos	31
Figura 17- Produção PV anual para diferentes ângulos (Informação retirada do PVGIS	31
Figura 18- Horas de sol diárias para o ângulo de inclinação 30°.....	32
Figura 19- Representação gráfica da percentagem de horas de sol mensais que atingem o solo para o ângulo 30°.....	32
Figura 20-Representação do skechUp das horas de sol no mês de junho com os módulos com inclinação de 30°.....	33
Figura 21- Representação do skechUp das horas de sol no mês de agosto com os módulos com inclinação de 30°.....	33
Figura 22- Valores médios de temperatura no ano seco (2005).....	34
Figura 23- Valores médios de temperatura no ano húmido (2010).....	34
Figura 24- Valores mensais de evapotranspiração para o ano seco (2005).....	35
Figura 25- Valores mensais de evapotranspiração para o ano húmido (2010).....	35
Figura 26- Precipitação e necessidade de rega para 2005	36
Figura 27- Precipitação e necessidade de rega para 2010	36
Figura 28- Identificação das zonas com e sem sombra	37

Índice de Tabelas

Tabela 1- Número de horas de sol para diferentes tipos de culturas	16
Tabela 2- Exemplo de plantas que melhor se adequam a cada local consoante a sua necessidade de horas se radiação solar direta	38
Tabela 3- Tabela complementar à tabela 1 com informação acerca das épocas de sementeira e colheita de cada cultura.....	45
Tabela 4- Tabela resumo das diferentes configurações utilizadas nos casos de estudo analisados (parte 1).....	47
Tabela 5- Tabela resumo das diferentes configurações utilizadas nos casos de estudo analisados (parte 2).....	48
Tabela 6- Tabela- resumo das ferramentas utilizadas nos casos de estudo	49

Nomenclatura

APV- Agrofotovoltaico

DJ - dia Juliano

dr - distância relativa terra-sol

EO - Este-oeste

ET₀ - evapotranspiração

FAO- *Food and Agriculture Organization*

FCUL- Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

FD- densidade total

H- Radiação global no local,

H₀ - é a radiação extraterrestre

HD- densidade média

LER - eficiência de utilização da mesma área de terreno para a produção simultânea de culturas e eletricidade

N - Número de horas de sol possível

NS - Norte-sul

n_s - número de horas de sol

P_{ACc} - produção agrícola na área de controle

P_{APVc} - produção agrícola no sistema APV

P_{APVe} - produção elétrica no sistema APV

PAR - radiação fotossinteticamente ativa

P_{PVe} - produção elétrica num parque PV comum.

PV-Fotovoltaico

R_G - radiação global

RH - humidade relativa

SFC - área totalmente coberta sob os painéis

SFO - área totalmente aberta entre os painéis

SPO - área parcialmente aberta entre painéis

ST- Seguidor Solar

STM - módulo semitransparente

T - Temperatura média do ar

w_s - ângulo horário

δ - declinação

φ- latitude

1 Introdução

1.1 Apresentação do tema

Primeiramente pretende-se realizar uma revisão de literatura focada na análise de projetos AgroPV já realizados, de modo a perceber as ferramentas utilizadas para modelação; as vantagens e desvantagens dos mesmos; as plantas mais adequadas a este tipo de projeto e quais os resultados obtidos. A informação obtida serve de base para um projeto AgroPV que irá ser construído no campus solar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL).

1.2 Enquadramento

A produção de energia elétrica através de energia solar é uma das fontes de energia renováveis com maior potencial para garantir o acesso a uma energia acessível, segura, sustentável e moderna para todos principalmente num país como Portugal que tem condições climáticas excelentes para este tipo de produção de energia. Para além disso, uma das aplicações dos sistemas de energia solar em expansão é a sua combinação com a produção agrícola, nos denominados sistemas agroPV, utilizando o mesmo local tanto para produção de energia, como também de alimentos (Weselek et al., 2019), que no caso da presente dissertação incide na utilização deste tipo de sistemas em meio urbano.

Este tipo de aplicação vai ao encontro de três dos dezassete Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) ilustrados na figura 1, nomeadamente: o 2, que visa a agricultura sustentável; o 7 que defende a produção de energia limpa e acessível e, por fim, o 11 que aponta para um planeta com cidades e comunidades sustentáveis.



Figura 1- Objetivos de desenvolvimento sustentável relevantes (adaptado da imagem [Esta Fotografia](#) de Autor Desconhecido está licenciada ao abrigo da [CC BY-SA-NC](#))

1.3 Objetivos

O principal objetivo da presente dissertação visa responder à seguinte questão:

Qual a disposição ótima dos painéis solares num sistema PV, de forma a maximizar a geração fotovoltaica garantindo as condições ambientais adequadas para a produção agrícola?

Por forma a responder a esta questão, foram elaborados três objetivos de investigação:

- Realizar uma revisão da literatura a incidir sobre o potencial, os desafios e as sinergias no âmbito do conceito agroPV;
- Definir uma ferramenta para a otimização da disposição de uma central solar, de forma a maximizar a geração PV e a criar as condições adequadas de temperatura, humidade e exposição solar para o crescimento de culturas por baixo e em redor dos módulos PV;
- Aplicar esta ferramenta para otimizar um caso de estudo, designadamente uma horta solar em ambiente urbano, a instalar no espaço do Campus solar.

1.4 Organização da dissertação

A dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos, nomeadamente: a introdução, a revisão de literatura, o método, os resultados, a discussão de resultados e a conclusão.

Na introdução, é feita uma breve descrição do que será abordado da dissertação, um enquadramento do conceito de agroPV e objetivos de desenvolvimento sustentável, apresentação da questão de investigação e seus objetivos.

A revisão de literatura está dividida em 9 subcapítulos: definição do conceito AgroPV; identificação das barreiras e soluções para construção de sistemas agroPV; apresentação das possíveis culturas a utilizar num projeto agroPV; Gestão de água- onde foram citadas informações relacionadas com a gestão e consumo de água num projeto agroPV; Monitorização- possíveis formas de monitorizar um sistema agroPV, configuração de sistemas agroPV, PV Bifacial, Ferramentas utilizadas para modelação e por fim Projetos AgroPV- onde irão ser analisados diversos projetos Agro PV já realizados.

No Método estão descritas as ferramentas e fórmulas utilizada para responder aos objetivos da dissertação.

Nos resultados são apresentados os valores obtidos através da utilização da ferramenta SketchUp e dos cálculos realizados.

Na discussão de resultados encontram-se discutidos os dados obtidos e comparados com a revisão de literatura.

Por fim, na conclusão é respondida à questão de investigação e objetivos traçados e são apresentadas possíveis sugestões de trabalhos e investigações futuras.

2 Sistemas agrofotovoltaicos: estado da arte

Esta revisão de literatura está estruturada em diversos subtemas de relevância sobre sistemas agrofotovoltaicos (APV). Começa com a definição do conceito e como configurar um sistema agroPV através do estudo de vários projetos que já foram construídos e outros que estão a ser realizados, identificando as ferramentas utilizadas para modelação e as suas validações experimentais, assim como quais as configurações utilizadas nos mesmos. Em seguida, revêm-se os tipos de culturas que melhor se aplicam a projetos agroPV nos diferentes climas e qual o nível de irradiação solar desejável.

Outro aspeto importante a analisar é o modo como é efetuada a gestão de água das culturas, nomeadamente na rega das plantas em situações de sombreamento dos módulos, bem como no modo de aproveitamento das águas da chuva que caem sobre os mesmos. Seguidamente, faz-se o levantamento dos parâmetros que devem ser monitorizados no PV e nas culturas e de que forma essa monitorização deve ser realizada. Finalmente, realiza-se uma análise crítica dos estudos identificados.

2.1 Definição do Conceito

O conceito de AgroPV¹ surgiu pela primeira vez em 1981 por A. Goetzberguer e A.Zastrow. Segundo os autores, este conceito consiste na utilização da mesma área de terreno para produção de produtos agrícolas e produção de energia (Dupraz et al., 2011; Goetzberger & Zastrow, 1982; Weselek et al.,). Esta definição serviu de base para outras que foram surgindo em grande parte dos artigos que abordam o conceito de AgroPV. Neste artigo defendiam que não era necessário um grande parque agroPV e que este deveria estar ligado diretamente à rede para existir uma fonte de rendimento extra da venda da energia para além da colheita das culturas. Os autores também sugeriam que a zona abaixo dos módulos, para além de ser utilizada para o cultivo de plantas poderia também ser aproveitada para pastoreio de ovelhas, criação de gado ou mesmo para caça, desde que as estruturas dos painéis fossem suficientemente robustas e altas.

No entanto, por ser uma definição ampla, por vezes é difícil perceber o que se pode ou não incluir-se no conceito de agroPV. Exemplos desses casos são a instalação de módulos PV para bombear água para irrigação das culturas, a instalação de módulos PV nos telhados de estufas (Touil et al., 2021) ou a instalação de módulos PV em estábulos de criação de gado para aquecimento e iluminação dos mesmos. Outro exemplo é um parque fotovoltaico com módulos elevados, sem mexer no espaçamento entre si, para poder existir pastoreio de ovelhas/cabras (Dos Santos., 2020) por baixo dos mesmos; neste caso o pastoreio é um subproduto e a produção principal do terreno é a produção de energia. Todos estes casos encaixam na definição original de agroPV, pois utilizam a mesma área de terreno para produção de produtos agrícolas/gado e produção de energia. Todavia a produção de energia não passa de um subproduto que é produzido no mesmo local que tem como produção principal produtos agrícolas, ou gado.

Alguns autores defendem que a definição de agroPV não deve englobar a criação de gado e pastoreio, pois consideram que este tipo de atividade não se encaixa no conceito agroPV, mas sim na instalação tradicional dos módulos PV no chão. Limitando, assim, a definição de agroPV à produção de produtos agrícolas vegetais e produção de energia. (Schindele et al., 2020).

¹ A escolha entre agroPV ou agriPV é desde há muito tempo um assunto que divide a comunidade, estes prefixos têm origem grega e latina respetivamente, ambos estão associados ao conceito de campo e são normalmente usados para conceitos relacionados com a agricultura. No entanto parece existir uma preferência pelo agroPV pois numa pesquisa no google existem mais resultados para este do que para o agriPV (Higino Da Silva, 2016).

Willockx et al. no seu artigo define sistemas que conjugam a produção de produtos agrícolas com produção fotovoltaica como sistemas agrofotovoltaicos e sistemas que conjugam pecuária com produção fotovoltaica como sistemas “rangevoltaics”. Dentro dos sistemas agroPV, os autores ainda dividem os sistemas em AgroPV em campo aberto e estufas. No que se refere à pecuária, os mesmos atribuem uma classificação semelhante, ou seja, em campo aberto a produção de animais realiza-se colocando os animais por baixo ou entre os módulos e em campo fechado onde os animais são criados em locais fechados com módulos nos telhados ou a substituir as cercas (Willockx et al., n.d).

Recentemente a Agência Francesa de Meio Ambiente e Gestão de Energia (Ademe) definiu os sistemas AgroPV como

Uma instalação agrofotovoltaica é um sistema fotovoltaico cujos módulos estão localizados na mesma superfície de uma produção agrícola, ao qual trazem os seguintes serviços, sem causar uma degradação qualitativa e quantitativa significativa do rendimento agrícola, bem como a redução da receita gerada pela atividade agrícola. Os serviços prestados são serviço de adaptação às mudanças climáticas, serviço de proteção a eventos climáticos extremos, serviço de melhoria do bem-estar animal, serviço agrônômico para culturas específicas.(Bellini, 2022^a).

Tal como em França, também Itália publicou novas diretrizes nacionais para a definição de central Agrofotovoltaica, definindo quais as características e requisitos mínimos necessários para considerar que um sistema fotovoltaico é um sistema agrofotovoltaico. Para isso dividirão sistema agrofotovoltaico em dois tipos diferentes:

- a) sistemas agrofotovoltaicos simples, um sistema fotovoltaico que tem soluções destinadas a preservar a continuidade das atividades agropecuárias, no local de instalação ou seja uma definição muito semelhante à original definida por A. Goetzberguer e A.Zastrow e
- b) sistemas Agrofotovoltaicos avançados, sistemas semelhantes aos anteriores, mas que têm de integrar soluções inovadoras como a montagem dos módulos fotovoltaicos elevados do solo a uma determinada altura, tem de existir módulos com rotação, e ainda permitir a aplicação de ferramentas digitais e de agricultura de precisão. Além disso está também prevista a implantação simultânea de sistemas de monitorização de modo a verificar o impacto destas instalações fotovoltaicas nas culturas, no consumo de água, na produtividade agrícola para os diversos tipos de culturas, na continuidade das atividades das fazendas envolvidas, na recuperação da fertilidade do solo, no microclima criado pela instalação e na resiliência às mudanças climáticas.

Por existirem diferentes definições pode ser interessante uma definição alternativa de agroPV apenas com uma pequena alteração da definição original. Assim sugere-se como alternativa de definição, utilização da mesma área de terreno para a coprodução de produtos agrícolas e energia fotovoltaica, ou seja, tanto os produtos agrícolas como a energia são coprodutos daquela área de terreno e não apenas um deles com o outro a ser um subproduto, ambas têm o mesmo peso na estruturação do terreno.

2.2 Barreira e soluções para construção de sistemas agroPV

Existem vários desafios e barreiras na construção e projeção de um sistema agroPV. Toledo & Scognamiglio, (2021) referem que existem dois tipos de solução, uma solução relacionada com o design e outra relacionada com a tecnologia tanto para sistemas em campo aberto como em estufas.

Um dos principais desafios é a minimização da sombra provocada pelos módulos nas culturas, que afeta o rendimento das mesmas. Para a resolução deste desafio, os autores apontam uma solução

relacionada com o design do agroPV, ao definir qual a distância ideal entre as matrizes de módulos e a altura entre o solo e os módulos, em sistemas em campo aberto. Para a instalação dos módulos, foram encontradas diversas soluções de design tais como: colocar os módulos com a intenção de que estes fiquem alinhados ao terreno, causando menos impacto na paisagem; utilizar os módulos como cerca, se estes forem instalados verticalmente; utilizar estruturas baixas, de modo a causar o mínimo de impacto visual; instalar estes sistemas em áreas marginais fora das localidades e, por fim, utilizar sistemas removíveis. De uma forma geral, salienta-se a importância de integrar os sistemas na paisagem onde os mesmos vão ser inseridos. No caso das estufas, os autores referem a importância da procura de diferentes *layouts* por forma a homogeneizar a distribuição de luz no interior da estufa. Além disso, deve-se também aumentar a altura da calha da estrutura para esta ser mais alta e aumentar a distância entre o solo onde estão as culturas e o teto da estufa onde estão localizados os módulos. Já em relação às soluções tecnológicas, os autores referem como uma solução a utilização de sistemas de seguimento solar ou sistemas móveis e também a utilização de módulos semitransparentes (Toledo & Scognamiglio, 2021).

No que toca às barreiras para a implementação deste tipo de sistemas, destaca-se a aceitação social das populações onde estes sistemas vão ser instalados. Para resolver esta questão, é necessário sensibilizar as populações para os ganhos advindos destes sistemas, como por exemplo sensibilizar os agricultores para os possíveis ganhos extra da produção de energia, mas também os benefícios para a economia local com a possível criação de emprego.

2.3 Configuração de sistemas agroPV

A configuração de um sistema agroPV pode ser realizada de diferentes formas, por isso foi realizado um levantamento de vários projetos e estudos realizados nesta área. Nesse levantamento de projetos observou-se quais as culturas utilizadas, onde se localizavam e qual o clima de cada projeto, qual a densidade e o espaçamento dos módulos, quais as ferramentas utilizadas para modelação dos sistemas agroPV, qual a orientação, altura, inclinação e transparência dos painéis, quais os tipos de módulos utilizados, se existia ou não sistema de seguimento solar (*tracking*) e quais os resultados de cada um dos projetos.

2.3.1 Configurações

Para selecionar a geometria ideal para o sistema agroPV temos de ter em conta qual o tipo de cultura a utilizar, quais as condições climáticas existentes no local onde se pretende instalar o sistema, qual a irradiação, qual a altura de montagens necessária e qual o ângulo de inclinação (θ) e orientação ideal, uma vez que os painéis são fixos na estrutura. Estas duas últimas são definidas através de otimização que é feita de forma a aumentar a radiação incidente nos painéis, o que vai proporcionar uma maior produção de energia do módulo, mas tendo em conta a minimização do sombreamento entre as fileiras dos painéis para as culturas também terem irradiação incidente (Dinesh & Pearce, 2016)

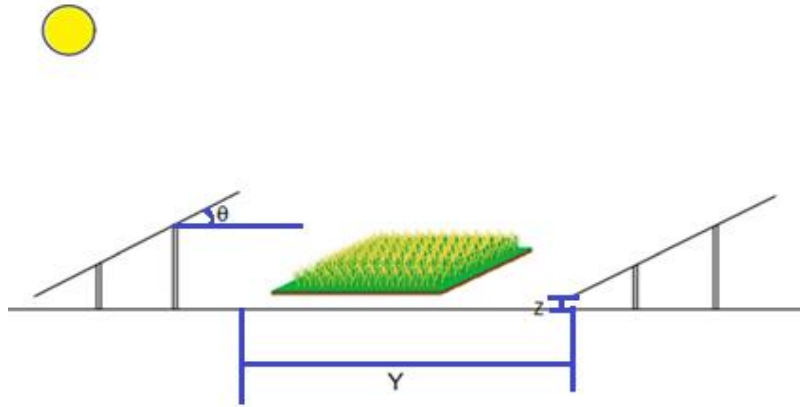


Figura 2- Exemplo de sistema agroPV montado no solo

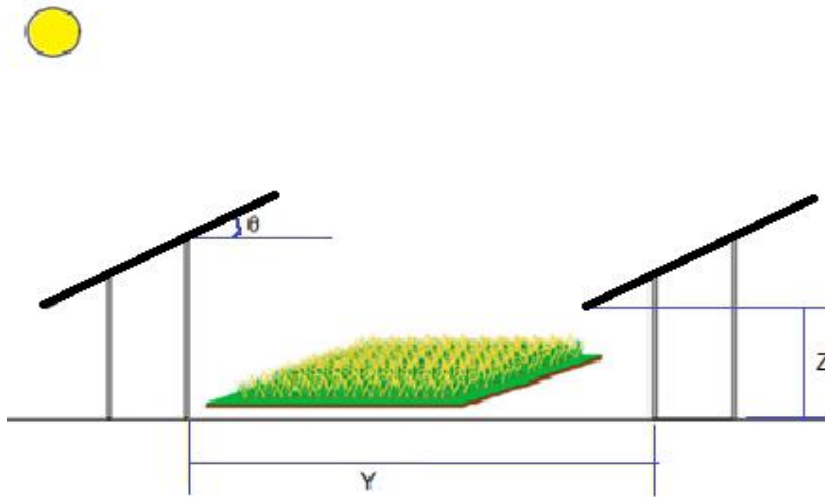


Figura 3- Exemplo de sistema agroPV montado em estrutura com uma altura Z

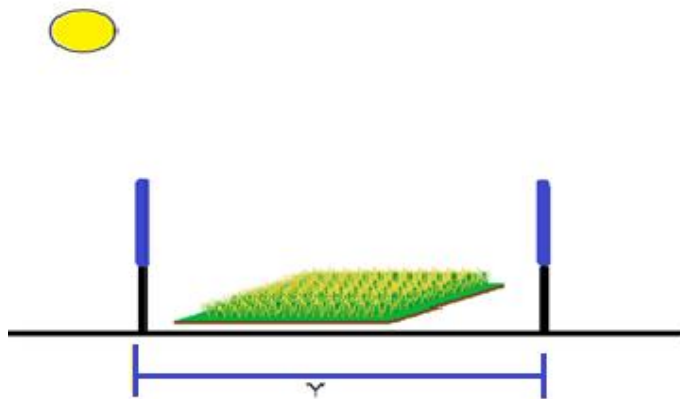


Figura 4- Exemplo de sistema agroPV bifacial colocados numa posição vertical

Para além dos aspetos mencionados anteriormente sobre a configuração dos módulos, outro aspeto importante na sua relação com as culturas é a densidade de painéis, pois a produtividade elétrica e o lucro da mesma podem ser acrescidos com o aumento da densidade dos módulos PV, o que por sua vez reduz a radiação solar que passa para as culturas (Weselek et al., 2019). Por ser um dos principais problemas dos sistemas agroPV, esse aspecto tem sido estudado desde 2010 na *Montpellier experimental agrivoltaic plant* (Abidin et al., 2021; Dupraz et al., 2011), no sentido de se encontrar a melhor estrutura. Através destes estudos, foram criados e testados dois tipos de sistemas: os sistemas de densidade total (FD) e de densidade média (HD). O sistema FD foi projetado de forma a maximizar a produção de energia solar e dessa forma apenas 50% da radiação solar passa para as culturas existentes abaixo dos painéis. Já o sistema HD foi desenhado para existir um equilíbrio entre a produção de energia e a produção das culturas e por esse motivo permite que cerca de 70% da radiação solar chegue ao nível das culturas. Para além desta distribuição a área abaixo dos painéis pode ser dividida em área totalmente aberta entre os painéis (SFO), área parcialmente aberta entre painéis (SPO) e área totalmente coberta sob os painéis (SFC), figura 5. (Abidin, Mahyuddin and Zainuri, 2021).

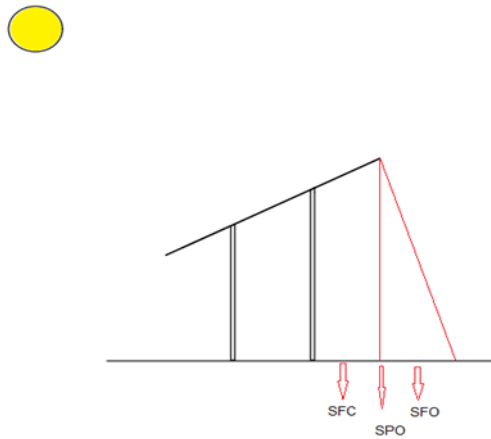


Figura 5- Distribuição da área abaixo dos painéis

Para a colocação dos painéis fotovoltaicos destacam-se duas principais configurações (*layouts*) “tradicionais”. A primeira alternativa é no solo (ou junto ao mesmo) com espaço entre as fileiras (Y), com o objetivo de semear as culturas e cuidar das mesmas através de máquinas, como se pode observar na figura 2. A outra configuração é a montagem dos módulos PV em estruturas com uma certa altura (Z), que podem ir de 1 a 6 metros, segundo os casos estudados, isto possibilita a colocação e cuidado das culturas por baixo dos mesmos. Este método permite um melhor aproveitamento do solo, uma vez que é possível ter as culturas tanto debaixo dos mesmos como entre fileiras, o que não é possível se os painéis estiverem no solo. Por outro lado, pode tornar-se mais dispendioso dado que tem uma estrutura de fixação maior, podemos observar um exemplo desta estrutura na figura 3 (Dinesh & Pearce, 2016).

Para além das configurações supramencionadas, os módulos também podem integrar-se numa estrutura móvel com um sistema de seguimento solar, que pode ser utilizado noutros tipos de sistemas fotovoltaicos, onde se inclui o agroPV. Este seguimento solar pode efetuar-se através de um eixo vertical, horizontal ou ambos.

Recentemente, uma empresa chamada a *Sun Powered Systems*, uma *startup* eslovaca, desenvolveu um braço com módulos PV integrados no mesmo que produz energia que pode ser utilizada para pequenas aplicações agrícolas. Para além de produzir energia, este braço pode ser utilizada para preparar o solo para a sementeira. Este braço traduz-se num sistema que está conectado a um equipamento móvel,

localizado abaixo dos módulos PV, que é capaz de realizar movimentos lineares, combinados com movimentos circulares simultâneos do próprio braço, num padrão espiral (Bellini, 2022b).

No caso dos módulos bifaciais, assunto que irá ser apresentado no subcapítulo seguinte, para além das configurações mais convencionais referidas anteriormente, estes podem ser colocados numa posição vertical com as culturas colocadas entre fileiras de módulos, como se pode observar na figura 4. Esta configuração tem algumas vantagens, nomeadamente na passagem de máquinas agrícolas sem interferência dos módulos; na existência de uma menor deposição de sujidade nos módulos e numa menor resistência em relação à água da chuva, o que permite que esta chegue às culturas mais facilmente. No entanto tem uma grande desvantagem que é a maior resistência à força do vento. (Meyer, 2019; Riaz et al., 2021).

2.4 PV Bifacial

O PV bifacial é cada vez mais uma opção viável e em rápida expansão no mercado dos módulos PV. Esta rápida expansão deve-se ao facto do preço dos módulos bifaciais estar cada vez mais próximo, e em muitos casos igual, ao dos módulos monofaciais. Além disso, caso os módulos bifaciais sejam instalados em larga escala e com uma configuração ideal (esta configuração ideal segundo os autores é serem instalados com borda do módulo inferior instalada > 0,5 m do solo, baixo sombreamento na parte traseira, alta distância de linha, ter um albedo muito alto como por exemplo, neve fresca (Kopecek & Libal, 2021) podem ganhar o máximo de 30% em relação aos módulos monofaciais. No caso do agroPV, este tipo de módulos pode ter extrema importância principalmente em módulos instalados verticalmente como foi realizado pela Next2Sun que desenvolveu uma tecnologia para esse tipo de sistemas (Meyer, 2019).

Para além dos módulos verticais, a integração de PV bifacial no agroPV tem outras possibilidades vantajosas resultantes desta junção, tais como sistemas agroPV montados em estruturas significativamente elevadas em relação ao nível do solo fazendo com que a homogeneidade da irradiação traseira seja assim aprimorada. Outra vantagem da utilização de módulos bifaciais nas centrais agroPV, é o facto da cor das plantas ser o verde durante a maior parte da sua vida, o que significa que refletem luz no comprimento de onda do verde, e esse é precisamente o comprimento de onda onde o silício é mais sensível, existindo assim uma maior eficiência (Katsikogiannis et al., 2022b).

Na modelação de módulos bifaciais é necessário quantificar a irradiação traseira recebida pelos módulos bifaciais, o que aumenta drasticamente o seu grau de complexidade, em comparação com a modelação de módulos monofaciais. A irradiação incidente no plano da parte traseira de um módulo bifacial é determinada por uma série de fatores, tais como o albedo da superfície do solo; a altura de montagem dos módulos acima do solo; o número de módulos na mesma linha do módulo de interesse e a razão entre irradiação horizontal difusa e irradiação horizontal global, chamada de fração de irradiação difusa. No entanto eficiência da parte traseira dos módulos é inferior à da parte dianteira dos mesmos (Kopecek & Libal, 2021).

O albedo pode variar de acordo com as propriedades óticas e morfológicas da superfície, bem como o tipo de configuração PV. Em relação ao caso de sistemas agroPV, o albedo do solo também varia consoante o tipo de cultura, pois cada cultura terá um albedo diferente, logo também se altera sazonalmente consoante o desenvolvimento das plantas nos seus diferentes estados de crescimento. Outras características que influenciam o albedo do solo são a geometria e densidade das culturas e a altura da estrutura dos módulos, pois provocam um sombreamento adicional do solo que leva a uma redução do albedo geral (Katsikogiannis et al., 2022).

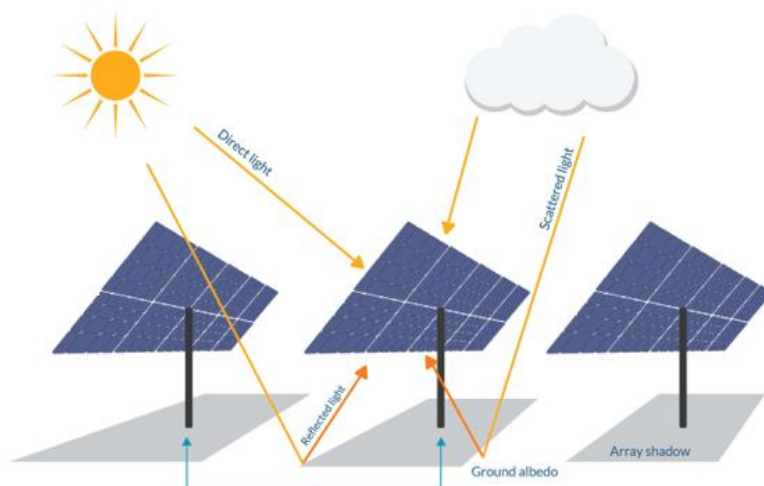


Figura 6-Módulos bifaciais (adaptado da imagem Bifacial modules: are they the future of solar PV? do Autor Laura Rodríguez retirado do site <https://ratedpower.com/blog/bifacial-modules/> no dia 19/09/2022(Rodríguez, 2021))

2.5 Ferramentas utilizadas para modelação

Para a modelação, montagem e validação de um sistema agroPV são necessárias diversas ferramentas, como as ferramentas utilizadas para simulação e cálculo de radiação incidente no local- o Radiance (Trommsdorff et al., 2021) o SoftwareR (Dupraz et al., 2011) e vários tipos de simulações numéricas. Estes tipos de ferramentas são extremamente úteis, pois fornecem informação direta acerca da radiação, que é um dos fatores mais importantes na projeção de um sistema agroPV, em cada ponto do local onde se pretende instalar o sistema agroPV. Outro tipo de ferramentas são as utilizadas para obtenção de dados meteorológicos e de radiação como por exemplo, o solarGis (Trommsdorff et al., 2021). Também existem as ferramentas para previsão de rendimentos elétricos como o ZENIT(Trommsdorff et al., 2021) e o PVSyst(Dinesh & Pearce, 2016b; Dupraz et al., 2011). Na previsão ou simulação do rendimento agrícola a ferramenta utilizada é uma plataforma em Scilab (Amaducci et al., 2018) que é uma linguagem de programação, que realiza uma simulação do crescimento de culturas realizadas abaixo do sistema agroPV em conjunto com um modelo de radiação e sombreamento. Outras formas de previsão baseiam-se na utilização de modelos de simulação de crescimento genérico de culturas e rendimento como o GECROS(Amaducci et al., 2018) e o STICS(Dinesh & Pearce, 2016b; Dupraz et al., 2011)(The Simulateur multidisciplinaire les Cultures Standard). Todas estas ferramentas de simulação tanto da produção elétrica como da produção agrícola são importantes durante a fase de projeto de um sistema agroPV pois fornecem informação sobre as possíveis produções nesses locais de modo a perceber se o projeto é viável e rentável depois de estar a produzir.

São ainda utilizadas ferramentas CAD para gerar modelos do sistema agroPV, tais como o Grasshopper um plugin do Rhinoceros (Katsikogiannis et al., 2022a), o autoCad ou o Sketchup² ferramenta que irá ser utilizada nesta dissertação. Para junção entre a modelação geométrica e a modelação da irradiação pode ser utilizado o software DIVA(Katsikogiannis et al., 2022a) que é uma ferramenta de análise ambiental. Por fim, para se obter a validação das simulações/previsões obtidas podem ser utilizadas ferramentas de aquisição de dados baseadas em Arduino (DAQ) Python (Othman et al., 2020) e para recolher os dados medidos no protótipo através de sensores PAR, equipado com um banco de dados SQL. No que diz respeito às ferramentas CAD estas permitem desenhar e projetar sistema no local onde será inserido e muitas delas através de plugin permitem obter algumas das

informações fornecidas pelas ferramentas mencionadas anteriormente e dessa forma ser mais fácil fazer a otimização de um sistema agroPV.

Dentro de todas estas opções, na presente dissertação optou-se por utilizar o SketchUp, uma vez que é uma das ferramentas que através dos seus diversos plugins permite projetar e otimizar um sistema agroPV com uma única ferramenta facilitando assim o trabalho.

Todas estas ferramentas mencionadas anteriormente estão representadas resumidamente na tabela 6 que se encontra em anexo.

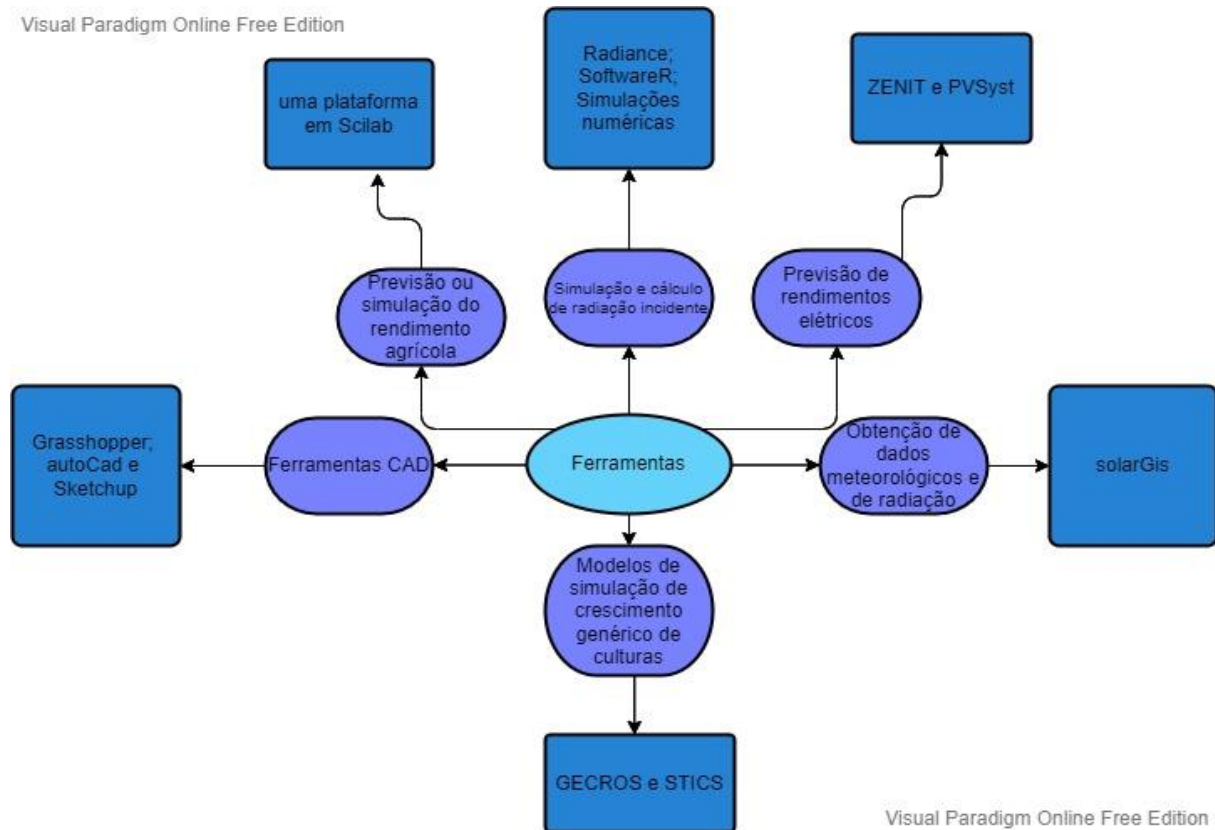


Figura 7- Ferramentas utilizadas para modelação

2.6 Culturas

2.6.1 As necessidades de radiação para o crescimento biológico

As plantas para produzirem biomassa necessitam de realizar a fotossíntese. Este processo depende de luz para ocorrer, principalmente do espectro visível que tem um comprimento de onda entre os 400 e os 700 nm. Esta zona do espectro é, por isso, normalmente denominada por radiação fotossinteticamente ativa. Assim, sabe-se que sistemas fotossintéticos (as culturas) e sistemas fotovoltaicos estão correlacionados, no entanto os dois têm requisitos bastante distintos, pois a radiação absorvida pelos painéis PV pode ser adaptada para captar apenas uma parte específica do espectro e não todo o espectro. Em sentido contrário, os espectros de absorção das plantas são determinados pelos seus pigmentos fotossintéticos dentro do espectro visível. Outro aspeto que distingue os dois sistemas diz respeito à quantidade de luz absorvida, nos módulos PV a energia produzida depende diretamente da radiação incidente nos mesmos. No caso das plantas isso já não ocorre, pois a produção de biomassa não depende apenas da radiação incidente, uma vez que essa produção é limitada por numerosas etapas metabólicas complexas (Abidin et al., 2021).

Para que processo de fotossíntese possa ocorrer com sucesso, as plantas necessitam de absorver CO₂ através dos seus poros. Estes poros são válvulas operadas hidraulicamente que controlam o tamanho da sua abertura de acordo com as condições climáticas externas tais como radiação e temperatura e a disponibilidade de água da planta, ou seja, quando existe mais disponibilidade de água, estes poros aumentam e permitem uma maior absorção de CO₂ ou pelo contrário se existir excesso de radiação e temperatura e uma baixa humidade esses poros tornam-se flácidos e obstruem o processo fotossintético (Burrows & Graper, 2005).

Segundo a literatura, as plantas necessitam em média de 6 horas de radiação solar direta por dia para crescerem de forma saudável. No entanto nem todas as plantas são iguais, já que existem alguns tipos de plantas que toleram melhor o sombreamento do que outras, necessitando assim de um menor número de horas de radiação solar direta por dia. Nas tabelas 1 e 3 é possível observar a necessidade de radiação solar de alguns tipos de culturas, sendo a tabela 3, que se encontra em anexo, apenas um complemento da tabela 1 com indicação da época de sementeira e colheita de cada cultura. O tipo de plantas mais tolerante à sombra são plantas que, quando cultivadas em condições de pouca luz, sofrem uma redução em quantidade e em espessura e um aumento na sua área foliar para conseguirem aumentar a interceção e maior quantidade de luz com mais eficiência. Ao existir maior sombreamento neste tipo de planta existe também uma rede vascular que se torna desnecessária e é substituída por células fotossintéticas. Ou seja, plantas mais folhosas como alfaces ou espinafres necessitam de menos horas de radiação solar direta do que plantas que tenham menos folhas e produzam fruto tais como o tomate ou a abóbora, logo plantas folhosas são mais resistentes ao cultivo com maior sombreamento. Devido a todas estas características este tipo de plantas são as que têm maior potencial para cultivo em agroPV.

Com base nestas diferenças as culturas podem ser divididas em dois tipos, as C3 e as C4. A principal diferença entre culturas C3 e C4, é que as C3 assimilam CO₂ primeiro num composto de 3 carbonos (exemplos deste tipo de plantas são trigo, arroz, batata entre outros) e nas C4, que é mais eficiente, assimila CO₂ primeiro num composto de 4 carbonos (exemplos deste tipo de plantas são milho, cana-de-açúcar, entre outros) (Burrows & Graper, 2005; Heaton et al., 2008; Willockx et al., 2020). No que diz respeito às características referidas anteriormente, as culturas C3 são as mais resistentes ao sombreamento, pois desenvolvem-se melhor em climas frios e com pouca exposição solar, enquanto as culturas C4 que preferem locais quentes e com exposição solar.

Neste sentido, pode concluir-se que ambas podem ser integradas em sistemas agroPV, sendo que as C3 são mais adequadas abaixo dos módulos e as C4 nas zonas circundantes com maior exposição solar (Katsikogiannis et al., 2022).

Apesar de ser escassa a informação que identifica quais as melhores plantas para utilizar em sistemas agroPV, através da análise de vários artigos observou-se que os tipos de plantas são mais utilizados em AgroPV são: o trigo de inverno; trigo duro; milho; trevo capim; aipo; batata; pepino; pimenta chiltepin; pimenta jalapeno; tomate cereja; mirtilos e a alface. Neste conjunto de plantas, algumas têm melhor desempenho na sua relação com os módulos fotovoltaicos, pois têm maior resistência à sombra do que outras. Duas das plantas que são referidas como tendo um bom desempenho em condições de sombra são a alface e a batata. A alface, em locais com sombreamento aumenta a sua área foliar de forma a captar mais radiação e desse modo aumenta a produção, pois o que é utilizado para consumo são as suas folhas. No caso da batata, no estudo de Willockx et al. (2020), os autores observaram que as batatas tal como a alface aumentam sua área foliar total quando crescem abaixo dos módulos fotovoltaicos, de modo a existir uma adaptação às condições de sombra e, assim, conseguem compensar a redução da radiação, obtendo uma maior capacidade de colheita de luz.

Além disso, algumas plantas como os tomates e os pepinos são maioritariamente cultivados em sistemas AgroPV, em estufas. Já no caso do milho, os vários tipos de trigo e as batatas são

maioritariamente cultivados em campo aberto, no caso das alfaces existem muitos exemplos de cultivo em campo aberto, mas também em estufas.

Tabela 1- Número de horas de sol para diferentes tipos de culturas (tabela adaptada de "A Luz e a sua influência nas plantas da horta" de Rau, 2022Rau,)

Cultura	Horas de sol diárias	Cultura	Horas de sol diárias
Abóbora	no mínimo 6 a 7	Ervilha	no mínimo 3 a 4
Acelga	no mínimo 5	Espargos	no mínimo 6
Agrião	no mínimo 3 a 4	Espinafre	no mínimo 4 a 6
Alecrim	no mínimo 6	Fava	no mínimo 4 a 6
Alface	no mínimo 4 a 6	Feijão	entre 7 a 8
Alho	no mínimo 4 a 5	Grão	entre 7 a 8
Alho-francês	no mínimo 6	Hortelã	entre 4 a 6
Batata	mais de 6	Melão	entre 7 a 8
Batata-doce	no mínimo 5	Manjerição	entre 7 a 8
Beringela	no mínimo 6	Melancia	no mínimo 8
Beterraba	no mínimo 4 a 5	Morango	no mínimo 4 a 6
Cebola	mínimo 4 a 6	Nabo/Nabiça	entre 4 a 6
Cenoura	entre 4 a 6	Pepino	entre 7 a 8
Couve lombarda/roxa	no mínimo 4	Pimentos	no mínimo 8
Couve portuguesa	no mínimo 5	Rabanete	no mínimo 4 a 6
Couve flor/brócolo	no mínimo 5	Rúcula	entre 4 a 6
Coentro	entre 4 a 6	Salsa	no mínimo 4 a 6
Curgete	no mínimo 6 a 7	Tomate	no mínimo 8
		Tomilho	entre 4 a 6

2.7 Gestão de água

De acordo com alguns dos estudos analisados, os sistemas agroPV contribuem para uma redução no consumo de água das culturas abaixo dos módulos (Barron-Gafford et al., 2019; Marrou et al., 2013; Touil et al., 2021) .Esta redução no consumo de água das culturas deve-se a uma diminuição da exposição solar direta das culturas, devido ao sombreamento dos módulos PV. Esta situação leva a uma redução da temperatura abaixo dos módulos durante o dia, que tem como efeito uma descida da evapotranspiração das culturas. O que permite às culturas reter mais humidade, em comparação com as culturas em campo aberto, estas observações foram feitas para culturas com irrigação.

Barron-Gafford et al. (2019), no seu estudo verificaram que a humidade das culturas variava consoante o tempo entre cada irrigação e que a humidade antes da próxima rega era maior se as culturas fossem regadas a cada dois dias, do que diariamente.

No entanto o aumento da humidade das culturas abaixo o sistema agroPV não é sempre igual. Weselek et al., (2021) verificou através de medições do solo que a humidade média diária do mesmo abaixo do sistema agroPV era significativamente menor, quando comparado com a cultura de controle em campo aberto durante algumas alturas do ano. Para os autores, este resultado foi considerado surpreendente, pois parecia contrariar todos os outros estudos realizados. Apesar disso, os autores referem que os estudos são difíceis de comparar, dado que foram realizados com diferentes culturas e tipos de irrigação.

Para além das razões referidas anteriormente que ajudam na gestão e poupança de água outra hipótese é a utilização de sistemas de captação de água da chuva nos módulos, de forma a armazenar essa água para ser utilizada mais tarde para irrigação das culturas ou mesmo para a limpeza dos módulos PV. Essa água proveniente da limpeza pode ser novamente armazenada para reutilização aumentando assim a eficiência hídrica do sistema (Abidin et al., 2021; Jain et al., 2021). Esta captação da água das chuvas pode também ser uma solução para um problema relatado por alguns autores que se deve ao “efeito guarda-chuva” das zonas abaixo dos módulos PV, este efeito deve-se à intercetção da água da chuva pela superfície impermeável dos módulos PV. O que leva a uma escorrência para as zonas laterais dos módulos, existindo assim uma grande quantidade de água nesses locais, podendo provocar danos nas culturas e provocar erosão do solo (Elamri et al., 2018).

A combinação dos módulos PV e da agricultura têm também uma grande importância na bombagem de água para irrigação das culturas através da utilização de parte da energia produzida, principalmente em zonas onde os pontos de água se encontram longe dos locais de cultivo. Assim, com o aproveitamento de parte da energia produzida pelos painéis PV, não é necessária a utilização de métodos de bombagem de água que utilizam combustíveis fósseis (Al-Saidi & Lahham, 2019).

2.8 Monitorização

A monitorização de um sistema agroPV deve ser realizada tanto ao nível dos módulos, como das culturas.

No que diz respeito à monitorização dos módulos é importante supervisionar a radiação incidente nos mesmos através de piranómetros, a temperatura e a sua produção. Todos estes três parâmetros são importantes para perceber o desempenho a nível de produção energética do sistema agroPV.

Já em relação à monitorização das culturas, segundo Marrou *et al.* (2013) é importante monitorizar o microclima criado abaixo dos módulos, pois este influencia tanto os módulos, como as culturas. Esse microclima deve ser controlado através da recolha de dados de temperatura e humidade do ar com termómetros capacitivos, mas também da velocidade do vento por intermédio de um medidor de vento mecânico colocado a uma determinada altura. Para além do microclima é também necessário monitorizar a temperatura do solo através de termístores colocado em diferentes zonas do solo, no sentido de perceber a diferença de temperatura entre as diferentes zonas (zona de sombra, radiação direta e zonas com sombra e radiação direta) e também a temperatura das plantas através de termopares colocados nas folhas das mesmas.

É também importante monitorizar a radiação incidente no solo/culturas através de piranómetros colocados horizontalmente à altura da cultura. Por fim, o número de horas solares em cada uma das zonas também poderia ser controladas tanto a nível dos módulos, como a nível das culturas. Apesar

disso em todos os artigos estudados este parâmetro nunca é referido, em seu lugar são geralmente referidas a radiação incidente e as zonas de sombra.

2.9 Descrição de projetos AgroPV

Trommsdorff et al (2021) utilizam como ferramentas o Radiance, o ZENIT e o solarGis. Neste caso de estudo realizado em Herdwangen-Schoenach, no sul da Alemanha verificaram que existiu uma redução de produtividade nas culturas que variavam de ano para ano, devido ao tipo de cultura, as diferentes condições climáticas e o efeito de sombreamento sobre as mesmas. Também existiu uma variação na proporção de rendimentos entre a área de referência e agroPV. Em 2017, a cultura com melhor desempenho sob os módulos fotovoltaicos foi o capim trevo, com uma redução no rendimento de 5% comparado com a área de referência. No que diz respeito ao rendimento da colheita para as culturas de aipo, batata e trigo de inverno estas tiveram uma redução de 18% e 19%, respectivamente. Em contrapartida no ano de 2018, os rendimentos das culturas foram superiores a 2017, com o capim-trevo a ser a cultura com pior desempenho, com uma redução de 8% sob o agroPV. No entanto, os restantes rendimentos da colheita aumentaram 3%, 11% e 12% no trigo de inverno, batata e aipo respectivamente sob agroPV.

Em Amaducci et al., (2018) é referida a plataforma em Scilab em conjunto com o GECROS. Neste estudo localizado em Vale do Pó, no Norte da Itália, através de uma simulação de longo prazo, onde foi comparado o rendimento de uma cultura de milho sob o sistema agroPV com uma em campo aberto. Verificou-se que o rendimento sob o sistema agroPV é ligeiramente menor quando a água não é limitante, e é maior em condições de stress hídrico. Além disso, constatou-se que o rendimento médio do milho de sequeiro foi maior e mais estável sob o sistema agroPV, do que em condições de plena luz em campo aberto. Todos estes dados indicam que os sistemas agroPV têm um efeito positivo no rendimento das culturas, na produção de energia limpa e na economia de água. No que toca ao projeto agroPV, o coeficiente de variação (CV%) da produtividade de grãos foi de 19,3%, 22,3%, 17,8% e 18,4%, para os quatro cenários existentes no painel estático com uma inclinação de 30° (F1), painel estático com uma inclinação de 30° (F2), seguidor solar ST (ST1), seguidor solar ST (ST 2) respectivamente. No campo aberto sem sombra (FL) o resultado foi de 37,9%, o que permite concluir que o sombreamento agroPV tem um efeito de potencial de estabilização do rendimento.

No caso de estudo presente em Dinesh & Pearce (2016) é utilizado o PVSyst e o STICS (The Simulateur multidisciplinaire les Cultures Standard) e na restante caracterização do sistema é utilizado um modelo de otimização de forma a maximizar a radiação incidente nos módulos PV. Neste estudo localizado em Kansas City nos EUA, os autores verificaram que para o ângulo de inclinação calculado a perda de sombra para a configuração montada no solo foi de 0,6% e para a configuração montada em estacas com uma determinada altura acima do solo utilizando uma densidade total foi de 1,3%. Observaram, também, que no caso da alface cultivada no verão houve uma redução de 42% no rendimento em FD (densidade total) e de 19% em HD (densidade média), em comparação com a alface cultivada a céu aberto. Também foi referido que para a alface cultivada na primavera não houve efeito significativo sobre os rendimentos da alface em HD, no entanto existiu uma redução de 21% nos rendimentos para FD o que é significativamente maior para uma cultura de verão, todos estes valores foram simulados através do STICS.

No que diz respeito ao caso de estudo referido em Dupraz et al., (2011), foi utilizado o PVSyst, o modelo de culturas STICS e também o SoftwareR (Free Software Foundation Inc., www.fsf.org), tal como no caso anterior, para calcular a quantidade de radiação diária existente no local de estudo (direta e difusa) que atinge qualquer ponto no nível do solo sob a matriz. No seu caso de estudo localizado em Montpellier em França, os autores observaram que a simulação do STICS previa que os rendimentos de

trigo duro iriam ser baixos nas zonas de sombra dos módulos. No entanto, os resultados variaram consoante as duas densidades de painéis. Na densidade total a matéria seca e a produtividade do trigo duro reduzirão em 29% e 19%, respetivamente, na densidade HD, a produção de trigo quase não foi afetada apenas -11% na matéria seca e -8% na produtividade. Também verificaram que o seguidor solar ST agroPV é mais eficaz para otimizar saídas, ao passo que a densidade fixa HD e o seguidor solar CT foram os mais eficientes na produção de biomassa. Com a realização do estudo comprovou-se que, embora a densidade FD tivesse maiores LER's (quociente equivalente de terreno, *land equivalent ratio* em inglês) do que o sistema HD, devido à maior produção de energia, a densidade HD limitou significativamente as perdas de rendimento da colheita, enquanto mantém um LER acima de 1. Logo, concluíram que o sistema agroPV deve ser projetado para permitir que cerca de 70% de radiação passe para a cultura para prevenir significante restrições nos rendimentos, que devem ser escolhidas variedades de culturas para sistemas agroPV que sejam adaptáveis às condições de sombreamento. Além disso verificaram que sombreamento provocado pelos sistemas agroPV economizou entre 14-29% de água, dependendo do nível de sombra da densidade escolhida FD ou HD.

A eficiência de utilização da mesma área de terreno para a produção simultânea de culturas e eletricidade pode ser calculada através do LER (Abidin et al., 2021; Dinesh & Pearce, 2016; Trommsdorff et al., 2021). O LER permite comparar a produtividade de um sistema agroPV com um sistema de monocultura e um sistema PV em separado na mesma área de terreno (Dinesh & Pearce, 2016). No que diz respeito à produção elétrica, o LER é obtido através da comparação entre a produção de energia do sistema agroPV e um parque PV comum. Se o valor do for $LER > 1$, o sistema agroPV é mais eficaz que o a produção de produtos agrícolas e produção PV em separado na mesma área de terreno. Normalmente, os sistemas agroPV têm LERs entre 1,0 e 1,3.

$$LER = \frac{P_{APVc}}{P_{ACc}} + \frac{P_{APVe}}{P_{PVe}} \quad [1]$$

Onde P_{APVc} é a produção agrícola no sistema agroPV, P_{ACc} é a produção agrícola na área de controle, P_{APVe} é a produção elétrica no sistema agroPV e P_{PVe} é a produção elétrica num parque PV comum.

No caso de estudo indicado em Cossu et al., (2018) foram utilizadas simulações numéricas para calcular a distribuição e a disponibilidade de luz no local de implantação das estufas. Neste estudo localizado em Decimomannu na Sardenha em Itália, verificaram que a taxa de radiação global acumulada anualmente diminuiu em média 0,8% na orientação EO (este-oeste) e 0,6% na orientação NS (norte-sul) para uma taxa de cobertura PV adicional de 1%. A taxa de cobertura fotovoltaica de 100% foi o tipo mais penalizado quando o telhado e por sua vez os módulos estão com a orientação EO pois apenas 35% da radiação global disponível chega à cultura no solo quando comparado com uma estufa convencional; para este tipo de cobertura poderia ser benéfico diminuir a taxa de cobertura fotovoltaica e aumentar a altura da calha, sendo assim a cobertura em xadrez mais benéfica para as culturas pois deixa passar 77% da radiação para o solo. A orientação NS permitiu aumentar radiação média global acumulada na área da estufa em 24%, em comparação com a orientação EO que é a orientação mais comum nos telhados das estufas, no entanto, a produção de energia diminuiu cerca de 15%. Na opinião dos autores estas conclusões são muito importantes para a próxima geração de estufas fotovoltaicas.

Também relacionado com estufas Cossu et al., (2016) refere um estudo realizado na universidade de Shimane no Japão onde são utilizados um protótipo de um módulo semitransparente (STM) formado por micro-células esféricas de silício numa estufa. Nesse estudo verificaram que a eficiência de conversão do módulo semitransparente (STM) foi estável, em comparação com o módulo multicristalino, utilizado no projeto como referência, e que essa eficiência não foi afetada pelo ângulo

de inclinação dos módulos, devido à foto-receção isotrópica das micro-células esféricas. Também verificaram que a sombra da célula nunca cobre as plantas por inteiro quando a distância entre o módulo e a cultura é superior a 1 m.

Wang and Sun, (2018) descrevem um caso de estudo em Zhangjiakou no norte da China, onde é utilizado um algoritmo de otimização para a realização da configuração de um sistema agroPV. Neste estudo, os autores referem que ao observar o trajeto do seguidor solar do sistema agroPV, pode concluir-se que na latitude mais elevada a variação do ângulo de rotação do mesmo é relativamente semelhante durante todos os dias no período de crescimento das culturas. Estes também observaram que quando a radiação solar excede o ponto de saturação de luz ou é inferior a 50% do mesmo, o sistema pode maximizar a área sombreada. Por outro lado, quando a radiação solar está nos 50% do ponto de saturação da luz, o sistema pode minimizar a área sombreada. No entanto, a geração de energia é garantida.

Santra et al., (2017) discutem diferentes opções para um sistema agroPV no clima quente e árido do oeste da Índia, notando que estas opções podem ser muito diferentes para outras regiões com climas diferentes. Para além dessas opções os tipos de cultura também foram escolhidos tendo em conta este clima, mas os autores deixam o aviso que para as diferentes culturas é preciso ter em conta as condições climáticas que predominam no local de implementação do sistema agroPV.

Othman et al., (2020) no seu artigo refere um caso de estudo realizado na Universidade Putra, na Malásia, é feita uma aquisição de dados baseada em Arduino (DAQ), um sensor térmico um sensor de vento e uma câmara térmica para gravar vídeos e imagens de temperaturas. Neste estudo foi desenvolvido um modelo de stresse térmico para sistemas agroPV montadas no solo. O stresse térmico é um processo que ocorre quando as temperaturas dos locais onde estão as culturas sobem acima de um determinado nível num período de tempo concreto e têm efeitos destrutivos e permanentes no ciclo da cultura tendo consequências na produtividade da mesma. Através desse modelo verificaram que a utilização de painéis acima de 1,2 m aumentava em 23% os pontos de stress térmico quando a temperatura era superior à temperatura ambiente entre 10 a 15°C nas horas de pico solar e durante as horas de sol moderado do fim da tarde. Também observaram que se utilizarem uma altura de colocação dos módulos de 1,2 os pontos de stress térmico diminuem nas plantas cultivadas por baixo dos mesmos.

Katsikogiannis et al. (2022) no seu estudo primeiramente utilizou o Grasshopper que é um plugin do Rhinoceros para gerar um modelo CAD do sistema agroPV, de seguida para modelar a irradiância foi utilizado um algoritmo RT da Radiance em combinação com a abordagem do coeficiente de luz do dia de, por fim foi utilizado o software DIVA. Neste estudo localizado em Boston, EUA, os autores retiraram como conclusão que ao aumentar a elevação, o espaçamento entre linhas e a transparência dos módulos existe uma homogeneidade da irradiação na parte de baixo do módulo bifacial e um ganho bifacial. Em sentido contrário, existe uma redução no rendimento elétrico, todavia esta redução parcialmente compensado pelo aumento do rendimento específico. Também verificaram que em relação à orientação do módulo não existem alterações significativas do potencial bifacial. Também verificaram um aumento no rendimento específico de 39%, 18% e 13% nos sistemas de SN (sul-norte) voltados, em asas EO e sistemas verticais respetivamente, em comparação com um sistema fotovoltaico monofacial montado no solo. Finalmente, concluíram que os sistemas virados a sul são os indicados para culturas de verão tolerantes à sombra, pois estes priorizam a produção de eletricidade, disposição vertical EO e melhora a intensidade e a distribuição da radiação, principalmente nos meses de inverno e o sistema em asas EO têm um sombreamento superior e cria um microclima parcialmente controlado. Ou seja, verificaram que a seleção da ordenação da cultura e do sistema agroPV está diretamente ligada, logo é extremamente importante saber qual a disposição, sombreamento e tipo de culturas apropriadas antes de prosseguir com o projeto.

Willockx et al. (2020) no seu estudo que consistiu num pequeno protótipo de sistema agroPV localizado na Bélgica, utilizou como ferramentas um programa de simulação para calcular a radiação solar abaixo dos módulos fotovoltaicos este protótipo foi desenvolvido em Python para recolher os dados medidos através de sensores PAR (radiação fotossinteticamente ativa), utilizou um sistema PLC Siemens S7-1200, equipado com um banco de dados SQL. Como resultado do estudo observaram que após a colheita das batatas, a área foliar total para batatas abaixo dos módulos fotovoltaicos era maior que a área de referência. Isso mostra que as batatas têm a capacidade de se adaptar às condições de sombra e podem compensar a redução da radiação PAR aumentando a sua capacidade de captação de radiação expandido a sua área foliar.

Riaz et al. (2021) apresentam uma investigação computacional sobre sistemas agroPV bifaciais verticais localizadas em Laore, Paquistão, onde exploraram as suas vantagens e compensações relativas comparando com sistemas agroPV monofaciais e bifaciais inclinados. Os autores durante o estudo abordam as seguintes questões, “Quais são as implicações relativas de energia-alimentos à medida que a densidade do arranjo PV é alterada? Como é que o ângulo de inclinação altera a produção relativa da energia/alimentos?”. Concluíram que os rendimentos relativos da energia PV e PAR foram semelhantes no sistema agroPV bifacial vertical e no sistema agroPV monofacial inclinado quando a densidade dos módulos é menor ou metade em relação a sistemas convencionais montados no solo. Para densidades mais elevadas com módulos bifaciais verticais existe uma maior produção a nível das culturas em detrimento da produção elétrica. Os autores verificaram que se a densidade dos módulos continuar a aumentar aproximando-se da densidade máxima, o PAR anual tem uma queda entre os 55 e os 65% e o rendimento relativo PV apresenta uma queda de 80% para os módulos bifaciais. Em relação à variação do ângulo de inclinação para módulos horizontais, verificaram que um pequeno ajuste pode levar a uma modificação da luz solar incidente nos módulos e nas culturas que é necessário para existir um equilíbrio entre o rendimento PV e o PAR. Por fim, observaram que os módulos bifaciais verticais têm algumas vantagens em relação aos módulos bifaciais horizontais tais como a menor deposição de sujidade nos mesmos, menor resistência à água da chuva e uma menor cobertura de terreno provocando assim menos zonas de sombra sobre as culturas.

No seu artigo Randle-Boggis et al. (2021) refere três projetos piloto que estão a ser implementados no Leste de África, mais precisamente no Quênia (Condado de Kajiado), no Uganda (Distrito de Lambwo) e na Tanzânia (Morogoro). Estes três projetos vão ser utilizados para testar os impactos de três estruturas agroPV na produtividade das culturas e o impacto económico para os agricultores com as receitas geradas pela produção de energia mais alimentos. Também irão testar uma variedade de culturas para averiguar a que mais se adequa a terrenos (por exemplo, tomate, repolho, couve, café e frutas tolerantes à sombra), e também analisar quais os modelos de aplicação mais relevantes e que melhor servirão as comunidades locais, por exemplo, os sistemas agroPV serem propriedade das comunidades ou serem propriedade privada. Estes projetos vão ter diferentes tipos de estruturas e design, de modo a testar qual o mais adequado para este tipo de locais, ou seja, verificar quais as estruturas que melhor se aplicam a terrenos semiáridos e húmidos. Outro aspeto interessante é a utilização de caldeiras nos módulos para recolha e armazenamento de água, pois nestes locais a escassez de água é um fator importante no que diz respeito à agricultura. Como são projetos ainda em desenvolvimento não existem ainda conclusões acerca dos mesmos (Randle-Boggis et al., 2021)

Neste capítulo pretendeu-se apresentar e descrever vários aspetos referentes aos sistemas agroPV, começando pela definição do conceito de AgroPV, onde se constatou a existência de múltiplas definições, sendo algumas muito amplas e outras mais restritas. Outro aspeto observado foi as configurações utilizadas nos diferentes casos de estudo analisados e concluiu-se que na sua maioria são utilizados:

- uma estrutura de fixação dos módulos elevada com uma altura entre 2 e 5 m de modo a ser mais fácil a circulação debaixo dos mesmo para se cuidar das culturas;
- um ângulo de inclinação entre os 20 e 40 graus;
- uma orientação a sul.

Todas estas características referentes aos diferentes casos de estudo estão descritas de forma resumida nas tabelas 4 e 5 presentes em anexo.

Em relação ao tipo de módulos são utilizados maioritariamente módulos monofaciais, no entanto os projetos mais recentes utilizam ou ponderam a utilização módulos bifaciais. Estes apresentam características que podem ser potenciadas com a presença das culturas, como é o caso da absorção do silício ser maior na zona da luz verde e é essa a luz emitida pelas plantas durante grande parte da sua vida.

Relativamente às culturas mais utilizadas e que aparecem mais do que uma vez nos vários casos analisados é a alface por ser uma das que melhor se adapta às condições de sombreamento, contudo com recurso à informação recolhida foi possível elaborar uma tabela com informação relativa a diversas plantas que se podem adaptar a esse meio, pois existem pouca informação acerca das que se aplicam especificamente ao agroPV. Também podemos concluir que o agroPV pode ser vantajoso para a poupança de água, pois as plantas ao estarem menos expostas ao sol têm uma necessidade de rega menor e toda a água que cair sobre os módulos pode ser encaminhada para recipientes e utilizada mais tarde para rega quando esta for necessária.

No que diz respeito à localização dos projetos, estes localizam-se maioritariamente em países desenvolvidos como os EUA, Japão, França, Itália ou Alemanha, pois são os países com mais recursos para investir neste tipo de projetos, no entanto apesar de serem poucos também já existem projetos agroPV em países em desenvolvimento o que é muito importante uma vez que nesses locais principalmente, é importante criar novas fontes de rendimento para as populações, maior facilidade no acesso a energia elétrica e a alimentos criando assim melhores condições de vida para as populações.

Apesar de toda a informação recolhida nesta revisão de literatura e de ser uma temática interessante no contexto desta revisão, não foi possível encontrar informação acerca de projetos agroPV em meio urbano, pois não foram encontrados casos de estudo sobre o tema.

3 Método

Neste caso de estudo pretende-se desenvolver e otimizar um sistema agrofotovoltaico que será construído no campus solar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, que se localiza no Campo Grande em Lisboa. Tendo como referência o ano de 2015, uma vez que é o ano utilizado pelo programa Sketchup para obtenção dos dados sobre a radiação, o local supramencionado tem como radiação típica os valores apresentados na figura 8.

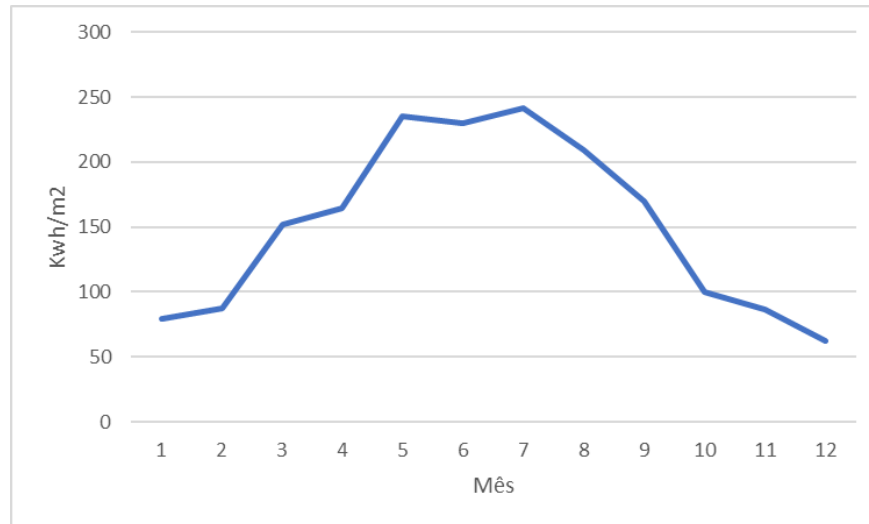


Figura 8-Energia típica no ano de 2015(Informação retirada do PVGIS (https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/) dia 12/09/22)

Pretende-se que este sistema agroPV seja constituído por 12 módulos fotovoltaicos monofaciais de 375Wp da marca LONGI distribuídos por duas filas de 6 módulos cada, separados entre si, e 6 módulos bifaciais de 440Wp da marca LG numa terceira fila atrás das anteriores, como podemos observar na figura 9 e um inversor da marca HUAWEI com uma potência nominal de 6 kW. As estruturas de suporte irão ter uma altura de 2.5m e os postes de sustentação serão colocados com um intervalo de 4m entre cada um, estes ficaram fixos em maciços de betão enterrados no solo.

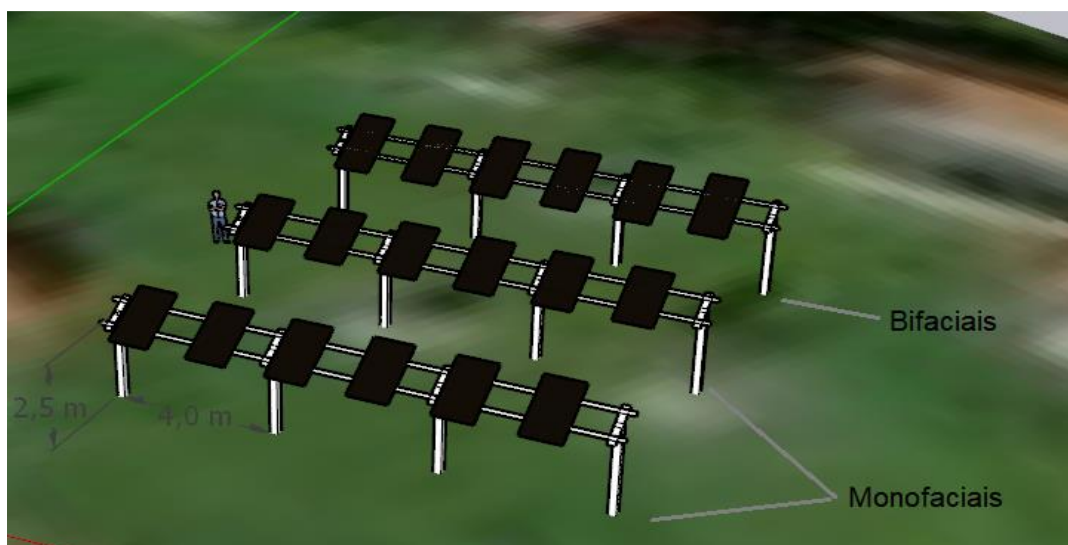


Figura 9- Configuração e disposição de referência dos módulos

Assim, neste capítulo vai ser apresentado o programa SketchUP, bem como seu o plugin Sunhours utilizado para perceber qual o efeito da colocação de módulos PV na radiação solar que chega ao solo. Além disso, estão demonstrados os cálculos necessários a fim de saber qual a radiação que chega ao solo, a evapotranspiração nesse local e a necessidade de rega das culturas.

3.1 Apresentação e descrição do SketchUP

Inicialmente será criado um modelo utilizando o software de modelação 3D SketchUp.

O SketchUP é uma aplicação de modelagem 3D que permite criar e editar modelos 2D e 3D, utilizando diversas ferramentas de desenho principalmente a ferramenta patenteada *Push and Pull*. Esta aplicação inclui funcionalidades de *layout* de desenho, renderização e suporta a utilização de plugins criados por terceiros através do Extension Warehouse. Neste projeto foi utilizado um desses plugins o Sunhours criado por Alex Hall que permite saber quantas horas de sol atingem uma superfície numa determinada área selecionada.

Para o presente trabalho, o SketchUP permitiu criar um modelo 3D dos módulos e da sua estrutura de suporte.

3.2 Descrição detalhada do Plugin Sunhours e aplicação no caso de estudo

O Sunhours é um plugin do SketchUP que permite calcular de que forma a radiação solar interage num determinado local - um edifício, um objeto ou uma área de terreno. Além disso, permite saber com precisão qual a radiação solar em cada ponto, além de fornecer o número de horas de sol nesses locais.

O conhecimento do número de horas de sol em cada ponto do local onde se pretende contruir um projeto agroPV é importante porque possibilita conhecer quais as plantas que mais se adequam em cada local e quais os locais onde existem sombras, de forma a evitar a colocação de módulos nessa zona. Com esta informação é possível calcular a radiação solar incidente em cada local e a evapotranspiração de cada um desses pontos, por forma a identificar a necessidade de rega em cada um deles.

Este plugin utiliza a capacidade integrada do SketchUp para calcular sombras, o que permite a execução de uma simulação em qualquer período, por forma a verificar quantas horas os pontos da grelha estão sob radiação solar direta. Através do recurso de sombras do SketchUp, é possível projetar uma sombra simples ou observar como o sol projeta as sombras de um modelo geolocalizado ou ao redor do mesmo (SketchUp, 2022; Sunhours, 2022).

Para projeção deste tipo de sombras, os cálculos do SketchUp são baseados no seguinte:

- A latitude e longitude do modelo
- A orientação do modelo (norte, sul, leste ou oeste)
- O fuso horário selecionado

A utilização deste plugin implica a sua instalação e, para isso, é necessário abrir o *Extension Manager* do Sketchup, escolher a opção *Install Extension* e selecionar o artigo *SunHours_v2.0.8.rbz*.

Para utilizar o SunHours deve ser escolhida a face com a qual queremos trabalhar e de seguida ajustar a grelha onde o plugin vai ser executado e mostrar qual o número de horas de sol em cada quadrado dessa grelha. O ajuste da grelha é efetuado no separador “*Extension*”, deve selecionar-se SunHours e escolher a opção *Fit grid*, que irá abrir uma caixa de diálogo onde se define:

- A densidade da grelha, ou seja, quantas células /faces regulares vão preencher a grelha na face selecionada. Existem três formas diferentes de definir essa densidade escolhendo a

largura das células em metros nesta opção o plugin vai ajustar as células para estas terem uma largura e comprimentos próximos do valor escolhido. Escolhendo o número de células do lado maior nesta opção as células vão ser ajustadas para que o lado mais longo da grelha tenha o número de células inserido. Ou escolhendo o número de células do lado menor semelhante ao anterior, mas neste caso vai ajustar o número de células no lado menor;

- A altura para levantar a grelha em relação à face selecionada, a sua elevação pode variar consoante a distância inserida na caixa de diálogo em metros;
- A opção de excluir nós interiores, se esta opção for selecionada todos os nós que não estiverem suficientemente próximos de qualquer uns dos lados da grelha irão ser removidos;
- O número de nós, se a opção anterior estiver selecionada, esta irá determinar o mais longe que um nó pode estar dos lados sem ser excluído;
- A distância para compensar a face para dentro, a grelha não será ajustada à face selecionada, mas sim a uma cópia da face original criada como se a ferramenta 'Offset' tivesse sido aplicada à face original, usando a distância inserida em metros. Logo, a grelha ficará a distância inserida longe das bordas da face original.

Depois de definidos todos os parâmetros de ajuste da grelha basta carregar 'OK' na caixa de diálogo e a grelha será criada e selecionada automaticamente.

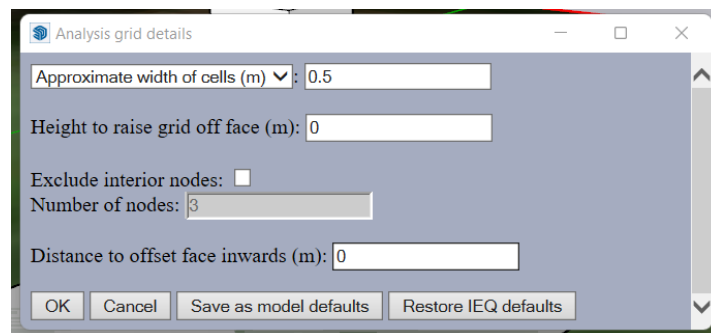


Figura 10-Exemplo da caixa de diálogo onde se define a densidade da grelha

Uma vez definida a densidade da grelha, o passo seguinte é a sua análise. Para isso é necessário selecionar a grelha/grelhas que se pretende(m) analisar e aceder ao separador "Extension", de seguida selecionar SunHours e escolher a opção *calculate sunligh hours*. A análise efetuada pelo plugin irá calcular o tempo que cada nó está ao sol durante o tempo que for determinado na caixa de diálogo que irá aparecer. Nessa caixa de diálogo pode ser definido as datas e horas para as quais a análise é efetuada. Esta funciona em três níveis:

- Escolha dos períodos de tempo dentro de um dia, aqui é possível escolher quais são os horários do dia em que se pretende analisar a grelha, definindo o horário de início e fim para um ou mais períodos. Com os botões 'Add another period within a day' e 'Remove the last period within a day' é possível escolher quantos períodos pretendemos durante o dia. Todos os períodos de tempo devem ser seguidos, devem estar por ordem cronológica e não se podem sobrepor.
- Escolha dos dias da semana, é possível escolher um conjunto de períodos de tempo com base no dia da semana que se pretende, ou seja, é possível selecionar quais os dias da semana que devem ser analisados em cada um dos períodos horários escolhidos anteriormente.

- Escolha dos períodos de data, finalmente depois das seleções anteriores é ainda possível escolher os dias em que a análise é executada indicando vários períodos de dias com datas de início e fim, funciona de forma semelhante à seleção de períodos de tempo num dia. Todos os tipos de dias da semana e seus períodos horários selecionados nos passos anteriores serão usado para cada período de dias. Quando clicar na data abrirá um seletor de data para poder escolher uma data especifica, também é possível escolher um equinócio ou solstício na lista ao lado da seleção do dia.

The image shows a software dialog box titled "Calculation parameters". It is organized into several sections:

- Set times:** Contains two time range settings. The first has a start time of 7:00 and an end time of 18:00. The second has a start time of 9:00 and an end time of 12:00. Each range has buttons to "Add another period within a day" and "Remove the last period within a day".
- Applies to weekdays:** A row of checkboxes for days of the week (Mo, Tu, We, Th, Fr, Sa, Su). In the first section, Mo, Tu, We, Th, and Fr are checked. In the second section, only Fr is checked.
- Set dates:** Includes "Start date" (set to 1 Jan) and "End date" (set to 31 Dec), both with "-- Special date --" dropdown menus. It also has "Add another period of days" and "Remove the last period of days" buttons.
- Additional options:** Includes a "Time step" set to 1 hour, a "CSV file location" field with a "Browse" button, and two checkboxes: "Include daily minimum values in CSV file" and "Include daily maximum values in CSV file", both currently unchecked.
- Buttons:** At the bottom, there are "OK", "Cancel", "Save as model defaults", and "Restore IEQ defaults" buttons.

Figura 11-Exemplo de caixa de diálogo de configuração dos intervalos de tempo

Depois de definidos todos os períodos de tempo pretendidos para a análise da grelha, existem ainda algumas opções adicionais na mesma caixa de diálogo. Essas opções são o passo de tempo que consiste no espaçamento de tempo entre os quais os períodos de tempo escolhidos anteriormente apresentados são analisados. Um passo menor leva a uma análise muito mais precisa, mas demorada, este passo do tempo pode ser definido entre frações de uma hora até ao mínima de frações de um minuto.

Por fim, a análise pode ser guardada num arquivo CSV num determinado local à escolha. Todos os resultados da análise efetuada ficaram contidos nesse único ficheiro. Nesse ficheiro irá estar representado no início o tempo que durou a análise em horas, ou seja, o tempo máximo que cada ponto

esteve ao sol e quantos dias foram analisados, seguidos de três conjuntos de resultados: o *'Totals'* onde está o representado o número total de horas que cada ponto esteve ao sol durante todo o período de análise. O *'Maximum'* e *'Minimum'* que fornecem a informação de qual o maior ou menor número de horas num dia em que cada ponto esteve ao sol. Estes dois últimos conjuntos só aparecem no ficheiro CSV se na caixa de diálogo forem selecionadas estas duas opções, caso contrário só aparecerem os dados do *'Totals'*.

Depois de concluídas todas as configurações, deve clicar-se em “OK” para começar a análise da grelha ou grelhas pretendidas. Este cálculo poderá demorar algum tempo, dependendo se tiver grelhas muito densas e passos de tempo muito baixos ou longos períodos, por esse motivo são de evitar se possível. Durante o cálculo existe uma indicação de progresso na barra de *status*. Quando a análise da grelha estiver concluída, as células da grelha serão coloridas consoante os resultados da mesma num gradiente de cores que pode ser definido. Quando as grelhas têm a mesma configuração de cores, aparece uma pequena escala de cores no canto da tela de forma a fornecer informação de quanto tempo ao sol representa cada uma das cores e no topo dessa escala está o número total de horas na análise efetuada.

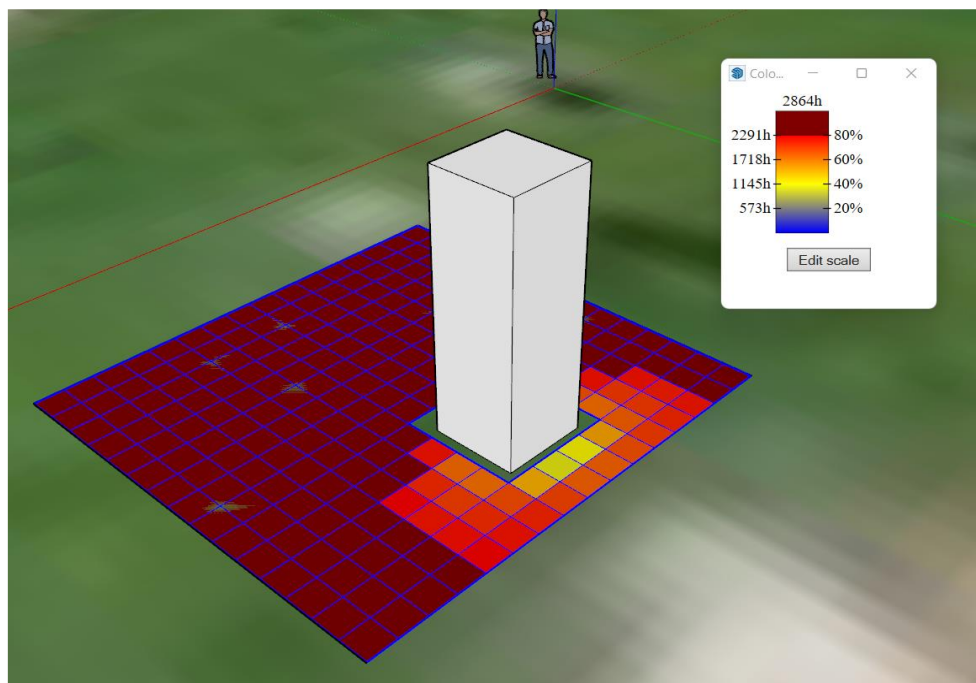


Figura 12- Exemplo de resultados dos cálculos efetuados pelo SunHours no SkechUp

Para editar a escala de cores deve carregar-se em *'Edit scale'* e irá aparecer uma caixa de diálogo onde se efetuaram essas alterações. Nessa caixa de diálogo as cores *catchall* máxima e mínima são cores únicas que as células podem assumir se o tempo que a célula estiver sob a luz do sol for maior que o valor máximo ou menor que o valor mínimo. Nesse gradiente de cores pode-se adicionar ou retirar cores nos botões '+' e '-', o gradiente pode variar entre duas a 7 cores. Se for desmarcada a opção *Maximum catchall* color a cor abaixo dessa na caixa de diálogo assumirá a cor superior no gradiente, o mesmo ocorre para *minimum*. Por defeito a cor de uma face é baseada na média total de horas de sol dos nós nos seus cantos, mas na última opção da caixa de diálogo existe a possibilidade de colorir as células com base no nó de canto que possui o valor mais alto ou mais baixo que for selecionado na lista suspensa. Por fim, carrega-se em *'Apply'* e todas as alterações serão efetuadas (Hall, n.d.).

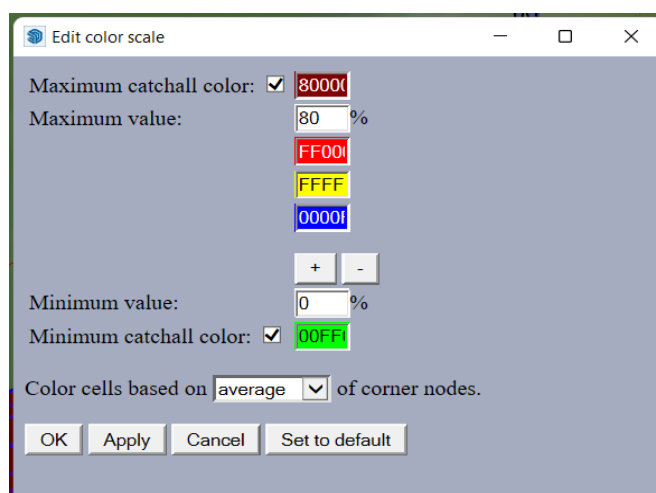


Figura 13- Caixa de diálogo para configuração da escala de cores da grelha

3.3 Cálculo a radiação global através da fórmula Angström-Prescott e os dados obtidos com o Sunhours

Utilizando a fórmula de Angström-Prescott (equação 2) (Kaltiya et al., 2014; Martim et al., 2020a, 2020b; Mendes et al., n.d.; Rahimi et al., 2012) é possível calcular a irradiação global através das horas de sol no local, determinadas pelo Sunhours:

$$\frac{H}{H_0} = a + b \left(\frac{n_s}{N} \right) \quad [2]$$

Onde H é a radiação global no local ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), a e b são coeficientes que são ajustados para cada local, n_s é o número de horas de sol (valor que irá ser dado pelo Sunhours), H_0 é a radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), G_{SC} é a constante solar e é igual a $4.92 \text{ MJ/m}^2/\text{h}$, N número de horas de sol possível. (Martim et al).

A radiação extraterrestre e a duração do dia podem ser calculadas através das equações 3 e 4,

$$H_0 = \frac{24}{\pi} G_{SC} dr (w_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin(w_s)) \quad [3]$$

$$N = \frac{24}{\pi} \cos^{-1}(-\tan \varphi * \tan \delta) \quad [4]$$

Onde φ é a latitude, w_s é o ângulo horário (calculado pela eq.5), dr a distância relativa terra-sol (calculado pela eq.6), δ a declinação (calculado pela eq.7) e DJ o dia Juliano.

$$w_s = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad [5]$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos \left(\frac{2\pi}{365} DJ \right) \quad [6]$$

$$\delta = 0.409 \sin \left(\frac{2\pi}{365} DJ - 1.39 \right) \quad [7]$$

Os valores de a e b da equação 1 podem ser $a=0.25$ e $b= 0.50$ que são os valores recomendados *Food and Agriculture Organization* (FAO) para o cálculo do balanço energético para fins agrícolas caso

não existam valores calculados para o local, no entanto Mendes et al., no seu trabalho referem para Lisboa os valores de $a=0.18$ e $b=0.6$, estes são os valores utilizados neste projeto.

3.4 Evapotranspiração (ET_0) através da fórmula de Turc

Utilizando os valores de radiação obtidos, calculou-se a evapotranspiração através da fórmula de Turc representada na equação 8.

$$ET_0 = c * C(R_G + d) \frac{T}{T + 15} \quad [8]$$

Onde ET_0 é a evapotranspiração em mm dia^{-1} T é a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) $R_G = H$ radiação global calculada pela equação 2 ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$) e as constantes empíricas c e d são $a=0.31(\text{m}^2\text{MJ}^{-1}\text{mm}^{-1})$ e $b=2.094 (\text{MJ m}^{-2})$. O parâmetro C é restringido pela humidade relativa (RH) no local da seguinte forma:

$$C = 1 + \frac{50 - RH}{70} \text{ se } RH < 50\% \quad [9]$$

$$C = 1 \text{ se } RH \geq 50\%.$$

4 Resultados

Neste capítulo constam os resultados dos cálculos realizados através do plugin Sunhours com o número de horas de sol para os diferentes ângulos de inclinação, de modo a definir qual o melhor para duas disposições. Foram também definidos os resultados dos cálculos para o ângulo de inclinação que foi definido como sendo o melhor. Além disso, são apresentados os resultados dos cálculos da radiação global, da evapotranspiração e da quantidade de rega necessária.

4.1 Cálculo do número de horas de sol para diferentes ângulos entre 0° e 90°

Foram realizadas diversas simulações no SketchUp, utilizando o seu plugin Sunhours com o intuito de descobrir o melhor ângulo de inclinação dos módulos PV e a melhor disposição dos mesmos na estrutura de suporte direcionado para o projeto agroPV do campus solar. No caso do ângulo de inclinação, o mesmo pode variar entre 0 e 90 graus. Relativamente às duas disposições estas caracterizam-se da seguinte forma: a primeira com um espaço em vazio entre cada módulo, equivalente à largura de um módulo, distribuídos ao longo da estrutura de suporte (Separado). A segunda com os módulos todos juntos no centro da mesma (Junto), como pode ser observado nas figuras 14 e 15, respetivamente. Esta informação minimiza o impacto dos mesmos sobre a luz solar que chega ao solo, de forma a não afetar nem a produção agrícola nem a produção elétrica.

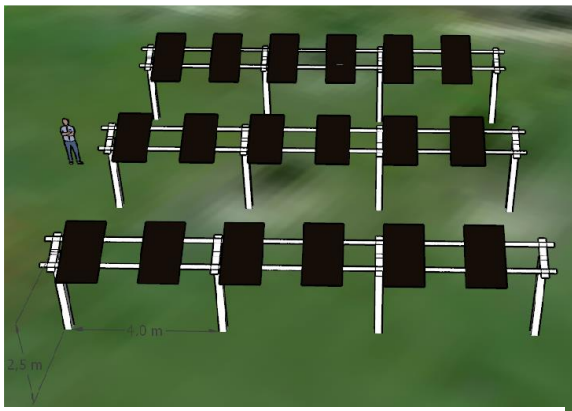


Figura 14- Estrutura de suporte com os módulos separados

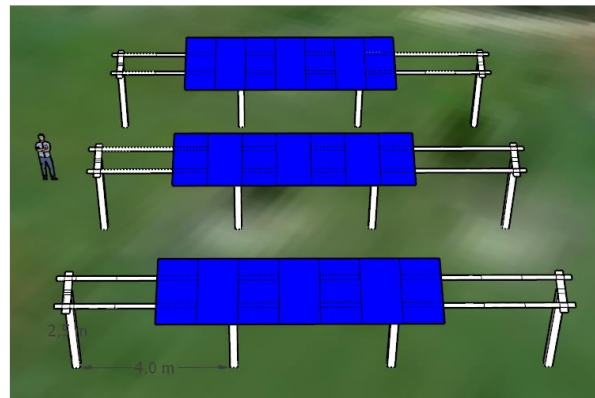


Figura 15- Estrutura de suporte com os módulos juntos

Na figura abaixo, são apresentados os quartis do número de horas de sol numa área de implementação localizada na zona onde estão os módulos e nas zonas em redor dos mesmos, mas na sua proximidade. Para cada um dos ângulos estudados e para as duas disposições utilizadas.

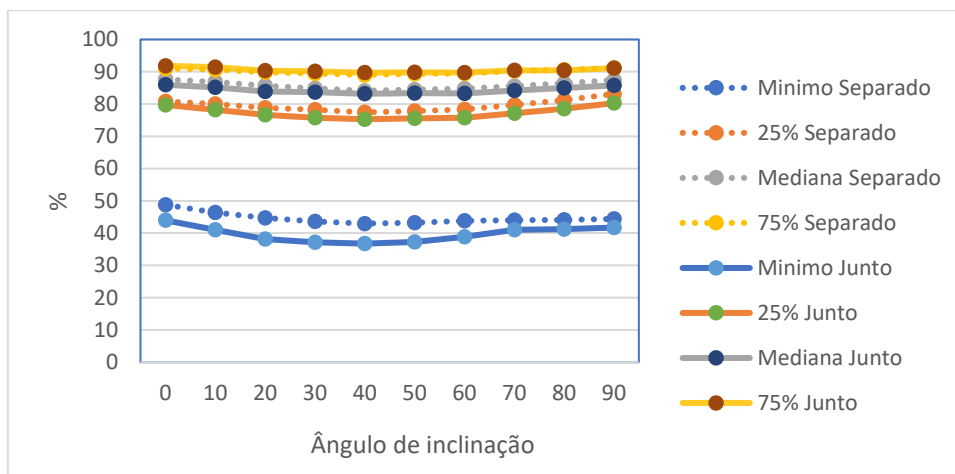


Figura 16- Porcentagem de horas de sol anual para cada ângulo de inclinação e para as diferentes disposições dos módulos

Na figura 16 é possível observar que a diferença entre as duas disposições e os diferentes ângulos não é significativa. Também é possível observar que os ângulos com maiores perdas de horas de sol direto estão entre os 30° e os 60°, pois a sombra nestes ângulos vai ser mais extensa ao longo do dia. No entanto, essa perda não é considerável em comparação aos restantes ângulos em análise.

A porcentagem de horas de sol que chega ao solo na maior parte da área abaixo dos módulos é próxima dos 70% ou superior para a disposição dos módulos separados, logo podemos constatar que para esta disposição a densidade dos módulos é HD existindo assim um equilíbrio entre a produção agrícola e a produção PV, o que vai ao encontro da revisão de literatura do presente trabalho.

Na figura 17 são apresentados os valores da produção PV para o local do caso de estudo para os diferentes ângulos testados.

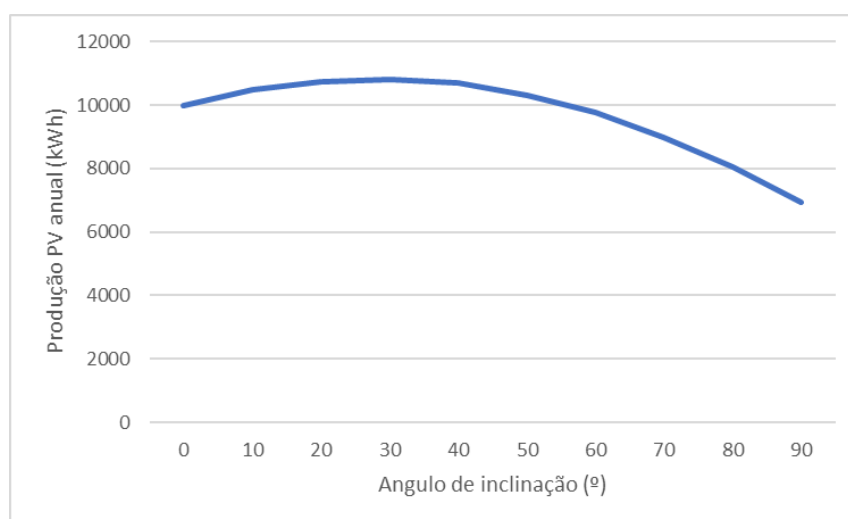


Figura 17- Produção PV anual para diferentes ângulos (Informação retirada do PVGIS (https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/) dia 05/08/22)

Através da análise das figuras 16 e 17, conclui-se que o ângulo de inclinação mais adequado para os módulos seria o de 30°, pois é o que apresenta melhor produção de energia fotovoltaica sem comprometer a produção agrícola pois as perdas entre os diferentes ângulos são semelhantes como foi dito anteriormente.

4.2 Cálculo do número de horas de sol para o ângulo de 30°

O ângulo que maximiza a produção PV para Lisboa é cerca de 30°, por esse motivo foi esse o utilizado para obtenção dos valores mensais de horas de sol ao nível do solo que são apresentados nas figuras seguintes. Na figura 18 são apresentados os dados diários de horas de sol e na figura 19 são apresentados os dados normalizados com o valor de horas de sol fora dos módulos.

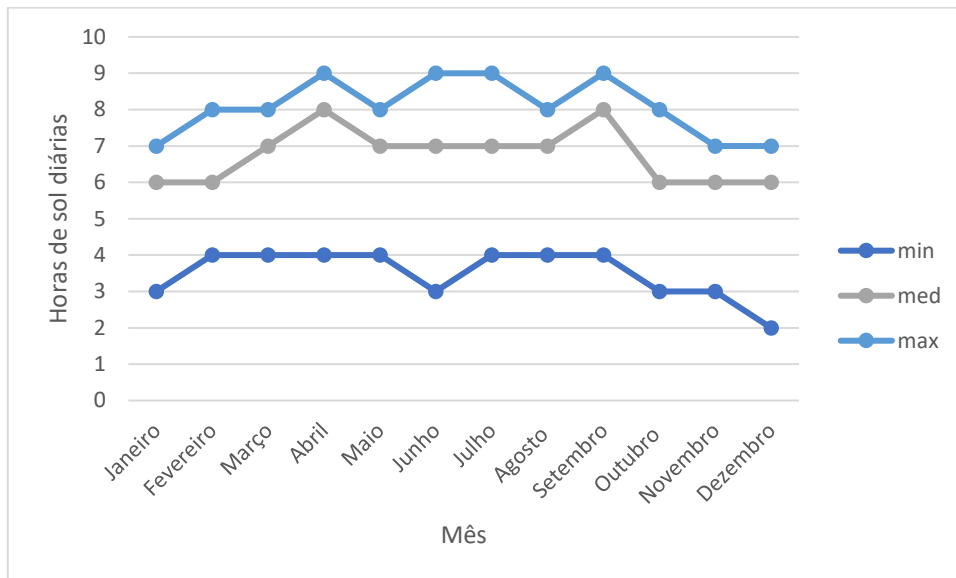


Figura 18- Horas de sol diárias para o ângulo de inclinação 30°

Com os dados referidos na figura 18 podemos observar as horas de sol diárias em média em cada local, o que influencia a escolha do tipo de cultura. Sendo que o máx corresponde à área totalmente aberta entre os painéis; o med significa a área parcialmente aberta entre painéis e o min diz respeito à área totalmente coberta sob os painéis.

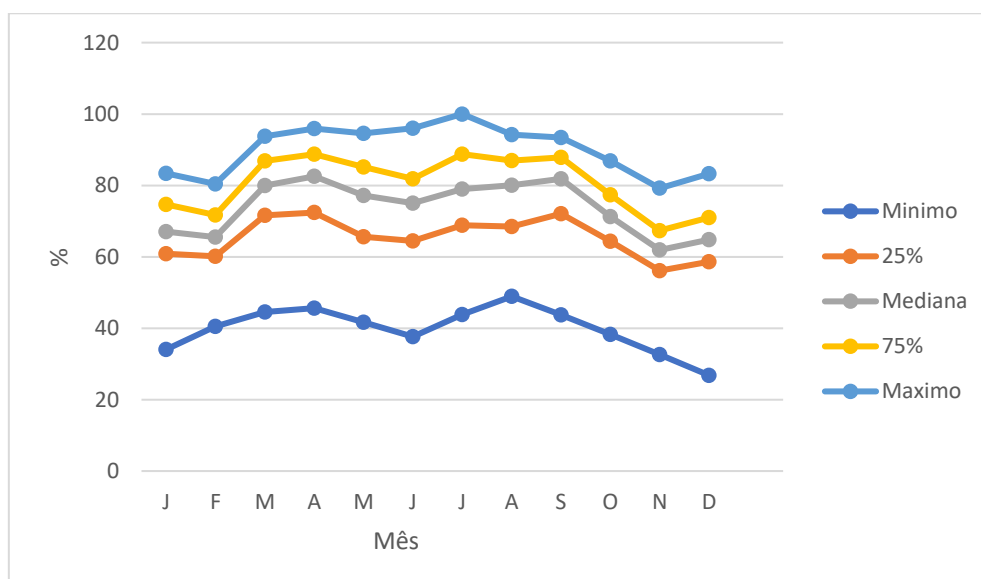


Figura 19- Representação gráfica da percentagem de horas de sol mensais que atingem o solo para o ângulo 30°

Na figura 19 podemos observar que existe um maior número de horas de exposição solar direta nos meses de verão, atingindo o seu pico em agosto, como expectável. Apesar disso, no mês de junho verifica-se uma descida no número de horas de sol, isto deve-se ao facto da posição solar neste mês atingir a sua posição mais alta, bem como a sua declinação máxima de 23.26° no solstício de verão que ocorre no dia 21 junho (Observatório Astronómico de Lisboa, 2015). Devido a esta situação formam-se assim sombras com maior área que se prolongam ao longo do dia. Desta forma, no mês supracitado ocorre uma diminuição das horas de radiação solar direta quando comparado com os restantes meses de verão.

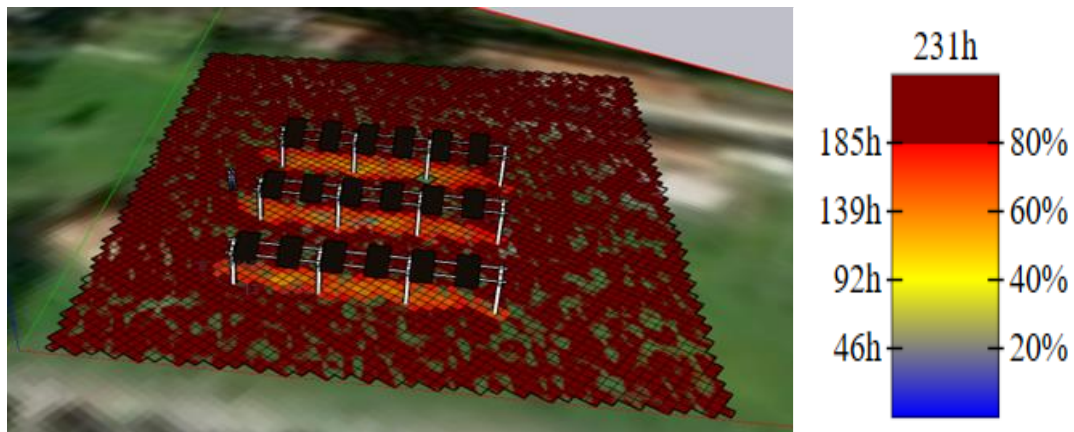


Figura 20-Representação do skechUp das horas de sol no mês de junho com os módulos com inclinação de 30°

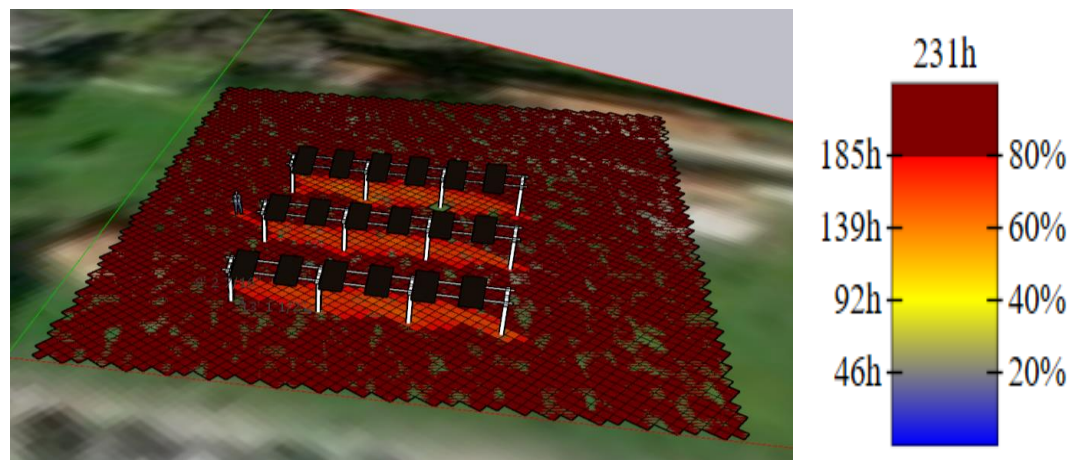


Figura 21- Representação do skechUp das horas de sol no mês de agosto com os módulos com inclinação de 30°

Nas figuras 20 e 21 é possível observar que existem zonas com cores mais claras (zonas com menos horas de sol, zonas de sombra dos módulos) e zonas com cores mais escuras (zonas com maior exposição solar), sendo assim mais fácil identificar quais os locais onde colocar cada tipo de planta em cada mês consoante a necessidade solar de cada uma. Assim, através da análise do número de horas existentes em cada ponto do terreno e com a ajuda das imagens da simulação fornecidas pelo SkechUp identificou-se o melhor local para cada tipo de planta a utilizar no projeto AgroPV.

4.3 Cálculo da evapotranspiração (ET_0) através da fórmula de Turc

Através da equação 8 apresentada anteriormente, das figuras 22 e 23 que representam as temperaturas médias em Lisboa nos anos 2005 e 2010, respetivamente e dos resultados de radiação global obtidos foi possível calcular a evapotranspiração do local em estudo.

Os valores obtidos estão espelhados nas figuras 24 e 25.

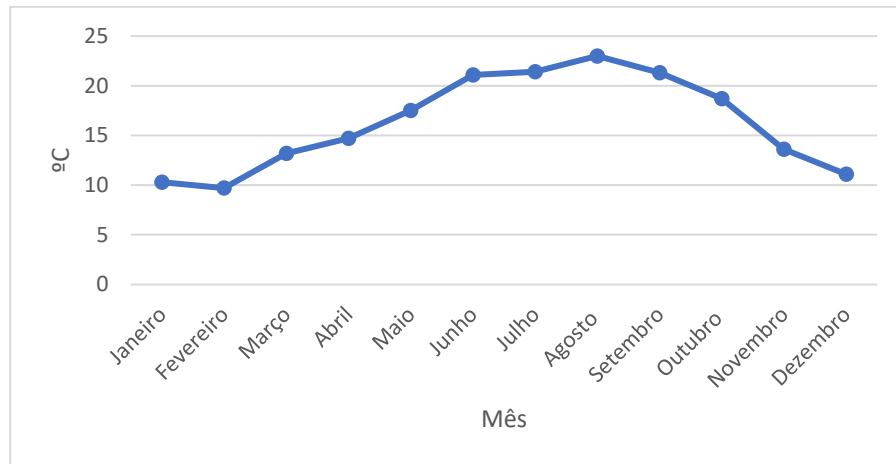


Figura 22- Valores médios de temperatura no ano seco (2005)

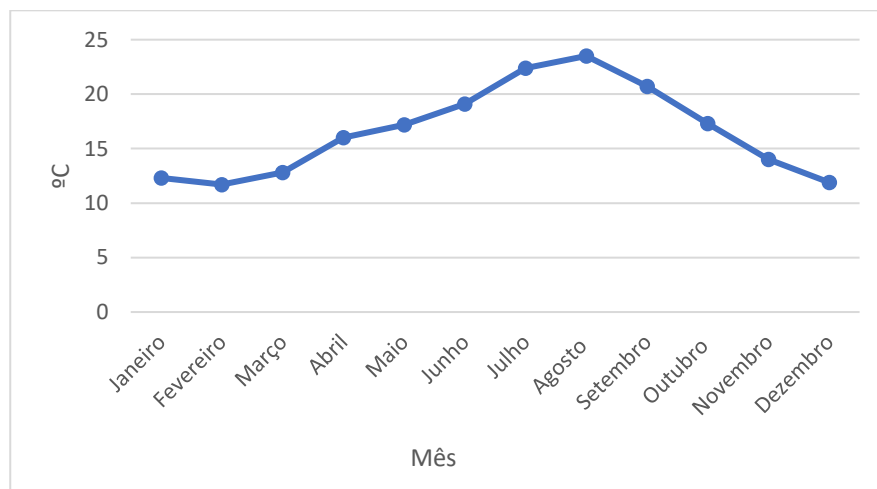


Figura 23- Valores médios de temperatura no ano húmido (2010)

Através da análise das figuras acima, é possível constatar que os valores médios correspondentes à temperatura do ano seco (2005) e do ano húmido (2010) são semelhantes. Em ambos os anos as temperaturas estão situadas entre os 10 e 25°C. Assim, podemos concluir que a temperatura não é um dos fatores que mais diferencia um ano seco e um ano húmido.

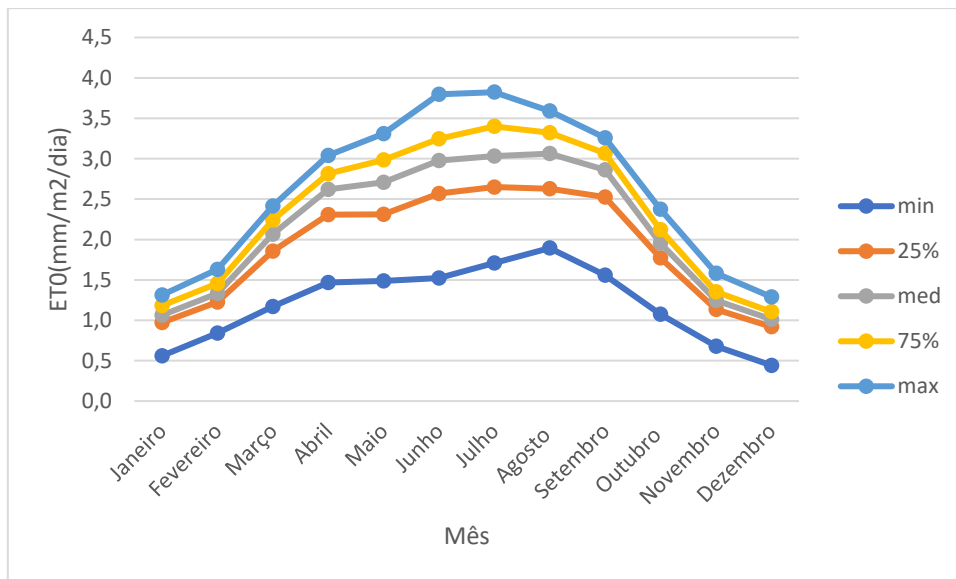


Figura 24- Valores mensais de evapotranspiração para o ano seco (2005)

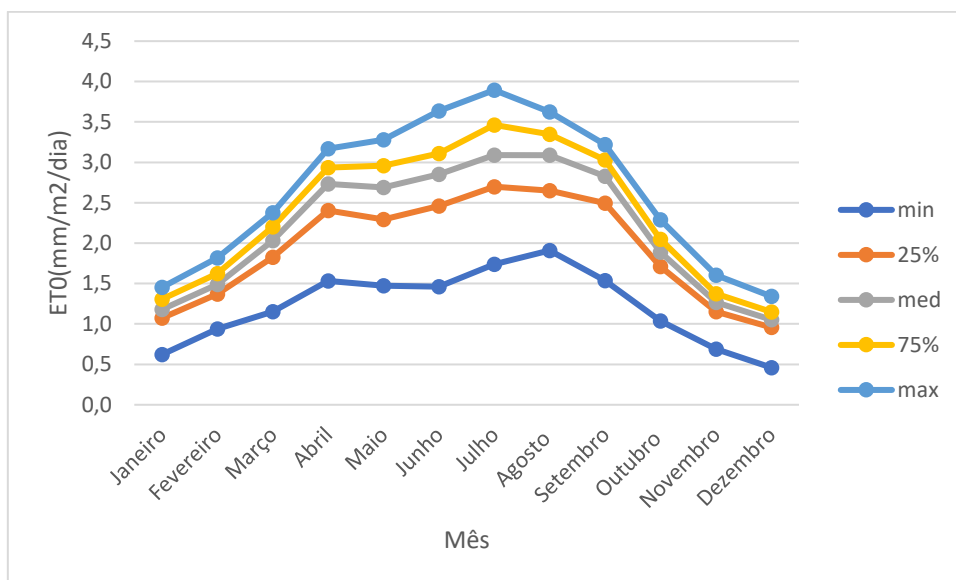


Figura 25- Valores mensais de evapotranspiração para o ano húmido (2010)

No que respeita à evapotranspiração, podemos observar através das figuras 24 e 25 que existe uma variação sazonal na evapotranspiração que ocorre tanto no ano seco como no ano húmido, sendo esta mais elevada nos meses de verão e menor nos meses de inverno. Verificamos também uma variação importante consoante a zona do solo, pois nas zonas totalmente cobertas pelos módulos (min) a evapotranspiração é menor do que nas zonas parcialmente cobertas (med) e/ou totalmente descobertas (max).

4.4 Cálculo da necessidade de rega

A necessidade de rega nas zonas onde existe sombra dos módulos e nas zonas sem sombra onde existe exposição solar total, pode ser estimada através da equação 10:

$$Rega = E_0 - precipitação \quad [10]$$

Para a realização deste cálculo foram utilizados os valores máximos e mínimos da evapotranspiração (E_0), e os valores de precipitação referentes ao ano de 2005 e ao ano de 2010 retirados do site do SNIRH (Sistema Nacional de informação de recursos hídricos)(SNIRH, n.d.). Os valores de evapotranspiração máximos representam zonas totalmente abertas fora dos módulos, onde não existe sombra e os valores mínimos representam zonas em que existe uma zona totalmente cobertas abaixo dos módulos onde existe sombra total.

Como resultado obteve-se os valores presentes nas figuras seguintes.

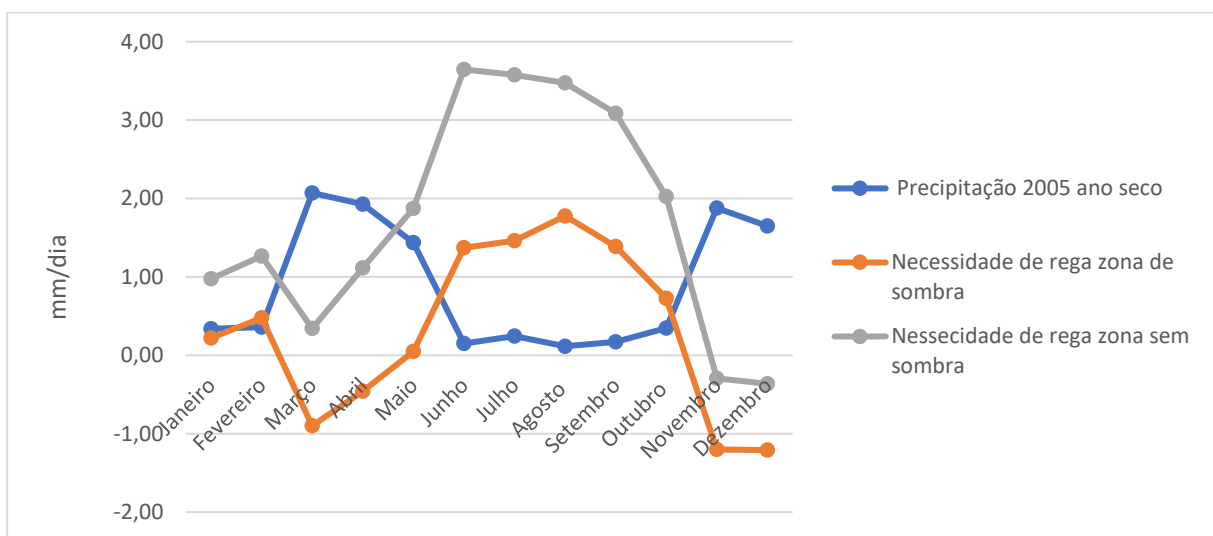


Figura 26- Precipitação e necessidade de rega para 2005

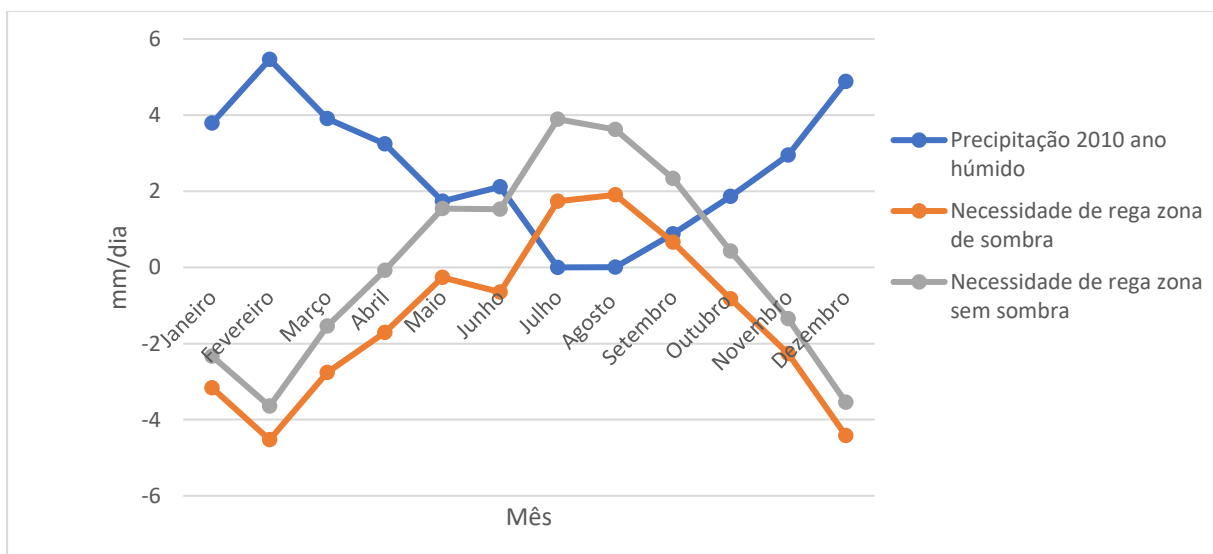


Figura 27- Precipitação e necessidade de rega para 2010

Ao analisar os dados presentes nas figuras 26 e 27 observa-se que nas zonas de sombra (min) existe menor evapotranspiração e conseqüentemente uma menor necessidade na quantidade de água para rega. Em sentido contrário, nas zonas sem sombra a evapotranspiração é maior existindo, assim, uma necessidade de rega maior.

Além disso, existe uma grande diferença na necessidade de rega entre um ano seco e um ano húmido devido à quantidade de precipitação que ocorre em cada um deles, nas figuras referidas observamos que quando existe menos precipitação a necessidade de rega aumenta. Logo, concluímos que a época de rega vai ser significativamente maior nos anos secos do que nos anos húmidos.

Através da análise dos gráficos podemos ainda constatar que nas zonas de sombra a necessidade de rega é menor para os dois anos. No ano húmido, nas zonas de sombra existe necessidade de rega nos meses entre julho e setembro, enquanto nas zonas sem sombra existe essa necessidade entre maio e outubro, assim sendo nas zonas de sombra existe uma poupança de 9.05 mm/dia de água em relação às zonas sem sombra. No ano seco, é possível observar que nas zonas de sombra existe necessidade de rega nos meses de janeiro, fevereiro e entre maio e outubro, enquanto nas zonas sem sombra existe essa necessidade entre janeiro e outubro, nas zonas de sombra existe uma poupança de 14 mm/dia em relação às zonas sem sombra. Assim, com a análise dos dados conclui-se que a sombra causada pelos módulos é importante para a poupança de água principalmente quando existem anos secos. Todavia, pode existir alguma discrepância entre os resultados obtidos e a realidade, visto que não se tem em conta a totalidade da precipitação que atinge as zonas abaixo dos módulos, e à impermeabilização realizada pelos mesmos nessas zonas. Apesar disso, essa situação pode ser resolvida com o encaminhamento da água que cai no módulo para baixo do mesmo.

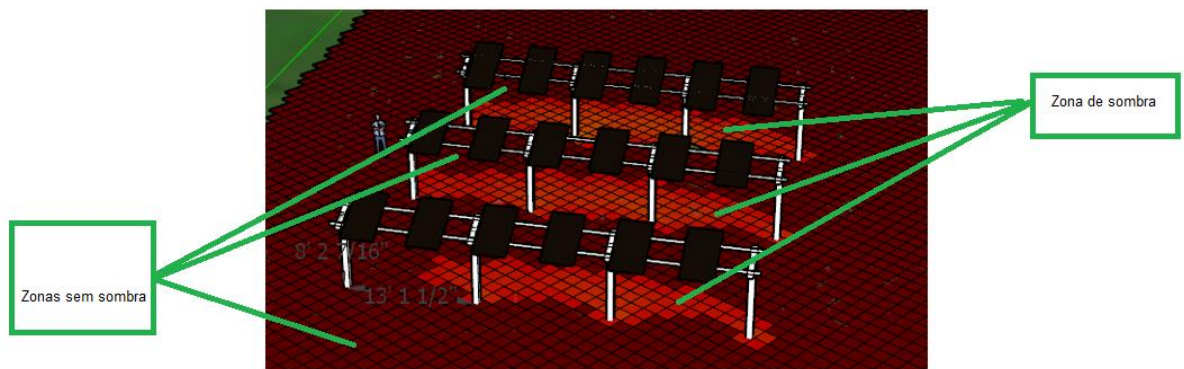


Figura 28- Identificação das zonas com e sem sombra

Na figura 28 podemos identificar as zonas de sombra e as zonas sem sombra mencionadas nas figuras 26 e 27.

5 Discussão dos resultados

5.1 Tipos de culturas que podem ser utilizadas no caso de estudo

No que diz respeito às culturas observou-se através da revisão de literatura que cada planta tem a sua necessidade de radiação solar. No caso de estudo verificou-se que, ao longo da nossa área de interesse, existem locais com diferentes exposições solares. Na tabela 2 podemos observar uma síntese de quais são as plantas que melhor se adequam a cada local consoante a sua necessidade de horas de radiação solar direta.

Tabela 2- Exemplo de plantas que melhor se adequam a cada local consoante a sua necessidade de horas de radiação solar direta

Zona abaixo dos módulos (sombra total) entre 2 e 4 h de sol	Zonas periféricas (sombra parcial) entre 5 e 7 h de sol	Zonas fora das sombras dos módulos (sem sombra) entre 8 e 9 h de sol
Agrião	Abobora	Batata
Alface	Acelga	Espargos
Alho	Alecrim	Feijão
Beterraba	Alface	Grão
Cebola	Alho-francês	Melão
Cenoura	Batata	Manjeriço
Couve-lombarda/roxa	Batata-doce	Melancia
Coentro	Beringela	Morango
Ervilha	Cebola	Nabo/Nabiça
Espinafre	Cenoura	Pimentos
Fava	Couve portuguesa	Pepino
Hortelã	Couve-flor/brócolo	Tomate
Morango	Coentro	
Nabo/Nabiça	Curgete	
Rabanete	Espargos	
Rúcula	Espinafre	
Salsa	Fava	
Tomilho	Feijão	
	Grão	
	Hortelã	
	Melão	

Manjeriçã	
Melancia	
Pepino	
Rabanete	
Rúcula	
Salsa	
Tomilho	

No caso do projeto AgroPV do campus solar da FCUL pretende-se que seja um exemplo de horta urbana onde poderiam ser plantadas debaixo dos módulos plantas aromáticas como a salsa, o tomilho ou os coentros alem dessas alfaces e rúcula, nas zonas periféricas que têm ainda alguma sombra poderiam ser plantados pepinos, curgetes e couve-flor, por fim nas zonas fora dos locais com sombra poderiam ser plantados pimentos e nabos, por exemplo.

5.2 Gestão de água

Através da análise dos resultados representados nas figuras 26 e 27 é possível concluir que nos locais abaixo dos módulos e onde existe sombra a necessidade de rega das plantas é menor, existindo uma poupança de água mesmo em anos de seca.

Os dados obtidos estão de acordo com as informações fornecidas pelos estudos analisados na revisão de literatura que referem que nas culturas abaixo dos módulos iria existir uma poupança nos gastos de água. Estas conclusões são bastante importantes, pois dão uma possibilidade de poupança de água que é cada vez mais importante na atualidade e no futuro, devido aos períodos de secas prolongadas cada vez mais comuns. Para além da poupança de água referente à diminuição da evapotranspiração referida, se durante a construção do projeto forem montados sistemas de aproveitamento de água das chuvas como os que são descritos na revisão de literatura essa poupança poderá ser ainda maior.

5.3 Configuração dos módulos do caso de estudo

Com o teste dos vários ângulos de inclinação, as duas disposições e da análise efetuada na revisão de literatura onde se observou que existem diversas possibilidades de disposição dos módulos, em relação ao ângulo de inclinação e tipo de estrutura. Concluiu-se que os módulos do presente caso de estudo teriam uma orientação a SE, um ângulo de inclinação de 30° e que a sua disposição seria com os módulos separados. Isto deve-se à sua localização, visto que a orientação e o ângulo de inclinação maximizam a produção PV, como podemos observar através da análise da figura 17. Além disso, em comparação com os outros ângulos estudados, não existe uma perturbação significativa no número de horas de sol que atinge o solo como se pode observar através na análise da figura 16.

A opção de colocar os módulos numa estrutura com uma certa elevação é a melhor hipótese, pois será mais fácil plantar e cuidar das plantas e segundo a revisão de literatura pode trazer benefícios para alguns tipos de plantas mais sensíveis à radiação solar prolongada.

7. Conclusão

A presente dissertação tem como principal objetivo responder à questão de investigação: ‘Qual a disposição ótima dos painéis solares num sistema PV, de forma a maximizar a geração fotovoltaica garantindo as condições ambientais adequadas para a produção agrícola?’. No sentido de responder às questões foram utilizadas o SketchUp o seu plugin Sunhours, as informações retiradas da revisão de literatura e do PVGIS. Através destas ferramentas, concluiu-se que a orientação ideal será SE, com uma inclinação de 30°, colocados em estruturas elevadas 2.50m acima do solo.

Também através destas informações foi realizada uma lista de culturas que pode ser utilizada neste tipo de projeto consoante as suas necessidades de exposição solar, e quais podem ser usadas especificamente no projeto agro PV do campus solar da FCUL.

Observou-se também que nos locais onde existe uma menor evapotranspiração devido à existência de sombra formada pelos módulos PV existe também uma menor necessidade de rega, em comparação aos locais com uma exposição solar direta ao longo do dia, permitindo assim uma poupança de água nesses locais.

Apesar das conclusões obtidas, não foi possível alcançar todas as informações pretendidas inicialmente, tais como: as condições de temperatura e humidade que são geradas nas zonas abaixo dos módulos e qual a sua influência na produção de hortícolas e de energia. Assim, sugere-se como área de interesse de trabalhos futuros, a realização de pesquisa de outros trabalhos onde utilizem outras ferramentas e que realizem a construção e monitorização do projeto. Além disso, seria também interessante obter informação acerca da produção dos módulos bifaciais que se pretende utilizar no projeto agroPV do campus solar. Além disso, sugere-se a realização de trabalho que visasse a obtenção de dados que validassem algumas das conclusões tiradas nesta dissertação.

8. Referências bibliográficas

- A senhora do monte. (n.d.). *Como semear rúcula em canteiros ou vasos*. A Senhora Do Monte . Retrieved August 20, 2022, from <https://asenhoramonte.com/2020/04/19/como-semear-rucula/>
- Abidin, M. A. Z., Mahyuddin, M. N., & Zainuri, M. A. A. M. (2021). Solar photovoltaic architecture and agronomic management in agrivoltaic system: A review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 14). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/su13147846>
- AGROBIO. (n.d.-a). *BATATA: FICHA DE CULTIVO*. Revista Jardins. Retrieved August 20, 2022, from <https://revistajardins.pt/batata-ficha-cultivo/>
- AGROBIO. (n.d.-b). *COUVE PORTUGUESA*. Revista Jardins. Retrieved August 20, 2022, from <https://revistajardins.pt/couve-portuguesa/>
- AGROBIO. (n.d.-c). *HORTÍCOLA DO MÊS: BATATA-DOCE*. Revista Jardins. Retrieved August 20, 2022, from <https://revistajardins.pt/horticola-do-mes-batata-doce/>
- Al-Saidi, M., & Lahham, N. (2019). Solar energy farming as a development innovation for vulnerable water basins. *Development in Practice*, 29(5), 619–634. <https://doi.org/10.1080/09614524.2019.1600659>
- Amaducci, S., Yin, X., & Colauzzi, M. (2018). Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Applied Energy*, 220, 545–561. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.081>
- Barron-Gafford, G. A., Pavao-Zuckerman, M. A., Minor, R. L., Sutter, L. F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D. T., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A. K., Nabhan, G. P., & Macknick, J. E. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, 2(9), 848–855. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>
- Bellini, E. (2022a, April 28). France defines standards for agrivoltaics. *PV Magazine*.
- Bellini, E. (2022b, June 6). Solar arm for agrivoltaic applications. *PV Magazine*.
- Burrows, R., & Graper, D. (2005). *Vegetable Gardening*. http://openprairie.sdstate.edu/extension_circhttp://openprairie.sdstate.edu/extension_circ/437
- Caseiro, S. (n.d.). *Acelgas – como cultivar e utilizar!* Cultivos Da Caseiro. Retrieved August 20, 2022, from <https://cultivosdacaseiro.pt/plantas-da-horta/accelgas-como-cultivar-e-utilizar/>
- Chambel, T. (n.d.-a). *APRENDA A CULTIVAR MORANGUEIROS*. Revista Jardins. Retrieved August 20, 2022, from <https://revistajardins.pt/aprenda-cultivar-morangos/>
- Chambel, T. (n.d.-b). *COMO CULTIVAR ALECRIM*. Revista Jardins. Retrieved August 20, 2022, from <https://revistajardins.pt/como-cultivar-alecrim/>
- Chambel, T. (n.d.-c). *COMO CULTIVAR HORTELÃ*. Revista Jardins. Retrieved August 20, 2022, from <https://revistajardins.pt/como-cultivar-hortela/>
- Chambel, T. (n.d.-d). *COMO CULTIVAR MANJERICÃO*. Revista Jardins. Retrieved August 20, 2022, from <https://revistajardins.pt/como-cultivar-manjericao/>
- Cossu, M., Cossu, A., Deligios, P. A., Ledda, L., Li, Z., Fatnassi, H., Poncet, C., & Yano, A. (2018). Assessment and comparison of the solar radiation distribution inside the main commercial photovoltaic greenhouse types in Europe. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 94, pp. 822–834). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.001>
- Cossu, M., Yano, A., Li, Z., Onoe, M., Nakamura, H., Matsumoto, T., & Nakata, J. (2016). Advances on the semi-transparent modules based on micro solar cells: First integration in a

- greenhouse system. *Applied Energy*, 162, 1042–1051. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.002>
- Dinesh, H., & Pearce, J. M. (2016a). *O potencial dos sistemas agrivoltaicos*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.0241364-0321>
- Dinesh, H., & Pearce, J. M. (2016b). The potential of agrivoltaic systems. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 54, pp. 299–308). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>
- Dos Santos, C. (2019). *Agrivoltaic system: a possible synergy between agriculture and solar energy*.
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., & Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*, 36(10), 2725–2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>
- Elamri, Y., Cheviron, B., Mange, A., Dejean, C., Liron, F., & Belaud, G. (2018). Rain concentration and sheltering effect of solar panels on cultivated plots. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(2), 1285–1298. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1285-2018>
- Goetzberger, A., & Zastrow, A. (1982). On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. *International Journal of Solar Energy*, 1(1), 55–69. <https://doi.org/10.1080/01425918208909875>
- Hall, A. (n.d.). *Manual for SunHours Sketchup plugin*. <https://github.com/alexmojaki/sunhours>.
- Heaton, E. A., Flavell, R. B., Mascia, P. N., Thomas, S. R., Dohleman, F. G., & Long, S. P. (2008). Herbaceous energy crop development: recent progress and future prospects. In *Current Opinion in Biotechnology* (Vol. 19, Issue 3, pp. 202–209). <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2008.05.001>
- Observatório Astronómico de Lisboa. (2015, June 22). *Solstício de Verão 2015*. Observatório Astronómico de Lisboa, Museus Da Universidade de Lisboa. <https://oal.ul.pt/solsticio-de-verao-2015>
- Jain, P., Raina, G., Sinha, S., Malik, P., & Mathur, S. (2021). Agrovoltatics: Step towards sustainable energy-food combination. *Bioresource Technology Reports*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100766>
- Kaltiya, M. S., Abubakar, M. S., & Itodo, I. (2014). Prediction of Global Solar Radiation Using Angstrom-Page Equation Model for Makurdi Benue State, Nigeria. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 03, 145–150. www.ajer.org
- Katsikogiannis, O. A., Ziar, H., & Isabella, O. (2022a). Integration of bifacial photovoltaics in agrivoltaic systems: A synergistic design approach. *Applied Energy*, 309, 118475. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118475>
- Katsikogiannis, O. A., Ziar, H., & Isabella, O. (2022b). Integration of bifacial photovoltaics in agrivoltaic systems: A synergistic design approach. *Applied Energy*, 309. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118475>
- Kopecek, R., & Libal, J. (2021). Bifacial photovoltaics 2021: Status, opportunities and challenges. In *Energies* (Vol. 14, Issue 8). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en14082076>
- Maciel, B. (n.d.). *Cultura do Espargo: das Técnicas de Produção à Importância Económica*. Agrotec. Retrieved August 20, 2022, from <http://www.agrotec.pt/noticias/cultura-do-espargo/>
- Marrou, H., Guilioni, L., Dufour, L., Dupraz, C., & Wery, J. (2013). Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agricultural and Forest Meteorology*, 177, 117–132. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.012>

- Martim, C. C., Nogueira, J. de S., Guia, L. E. B. da, & Curado, L. F. A. (2020a). Estimativa da radiação global pelo modelo de Angström-Prescott para Tocantins. *Research, Society and Development*, 9(7), e549974139. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i7.4139>
- Martim, C. C., Nogueira, J. de S., Guia, L. E. B. da, & Curado, L. F. A. (2020b). Estimativa da radiação global pelo modelo de Angström-Prescott para Tocantins. *Research, Society and Development*, 9(7), e549974139. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i7.4139>
- Mendes, M., Abreu, F. G., Neto, J., & FNunes, L. (n.d.). *DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE ANGSTRÖM PARA VÁRIOS LOCAIS DE PORTUGAL Determination of the Angström Coefficients for some locations in Portugal*.
- Meyer, C. (2019). *Agro PV – Next2Sun’s vertical installations*.
- Moreira, R. (n.d.). *Como plantar alhos na sua horta: saiba por onde começar*. Acientistaagricola. Retrieved August 20, 2022, from <https://acientistaagricola.pt/como-plantar-alhos/>
- Othman, N. F., Yaacob, M. E., Su, A. S. M., Jaafar, J. N., Hizam, H., Shahidan, M. F., Jamaluddin, A. H., Chen, G., & Jalaludin, A. (2020). Modeling of stochastic temperature and heat stress directly underneath agrivoltaic conditions with orthosiphon Stamineus Crop Cultivation. *Agronomy*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/agronomy10101472>
- Planfor. (n.d.). *Calendário de sementeira de hortaliças*. Planfor. Retrieved August 20, 2022, from <https://www.planfor.pt/jardim-conselhos/calendario-de-semeadura-de-hortalicas.html>
- Rahimi, I., Bakhtiari, B., Qaderi, K., & Aghababaie, M. (2012). Calibration of angstrom equation for estimating solar radiation using Meta-Heuristic Harmony Search Algorithm (Case study: Mashhad-east of Iran). *Energy Procedia*, 18, 644–651. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.078>
- Randle-Boggis, R. J., Lara, E., Onyango, J., Temu, E. J., & Hartley, S. E. (2021). Agrivoltaics in East Africa: Opportunities and challenges. *AIP Conference Proceedings*, 2361. <https://doi.org/10.1063/5.0055470>
- Rau, P. (n.d.-a). *CULTURA BIOLÓGICA DO TOMILHO*. Revista Jardins. Retrieved August 20, 2022, from <https://revistajardins.pt/cultura-biologica-do-tomilho/>
- Rau, P. (n.d.-b). *CULTURA DO GRÃO-DE-BICO*. Revista Jardins. Retrieved August 20, 2022, from <https://revistajardins.pt/cultura-do-grao-de-bico/>
- Rau, P. (n.d.-c). *FICHA TÉCNICA DA CULTURA DO AGRIÃO-DA-TERRA*. Revista Jardins. Retrieved August 20, 2022, from <https://revistajardins.pt/ficha-tecnica-da-cultura-do-agriao-da-terra/>
- Rau, P. (2022). *A LUZ E A SUA INFLUÊNCIA NAS PLANTAS DA HORTA*. Jardins.
- Riaz, M. H., Imran, H., Younas, R., Alam, M. A., & Butt, N. Z. (2021). Module Technology for Agrivoltaics: Vertical Bifacial Versus Tilted Monofacial Farms. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 11(2), 469–477. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.3048225>
- Rodríguez, L. (2021, February 26). *Bifacial modules: the future of solar PV? A comprehensive guide on financial and technical performance of the next hot thing in solar*. Rated Power.
- Santra, P., Pande, P., Kumar, S., Mishra, D., & Singh, R. (2017). *Agri-voltaics or Solar farming: the Concept of Integrating Solar PV Based Electricity Generation and Crop Production in a Single Land use System* (Vol. 7, Issue 2). <http://pveducation.org/>:
- Schindele, S., Trommsdorff, M., Schlaak, A., Oberfell, T., Bopp, G., Reise, C., Braun, C., Weselek, A., Bauerle, A., Högy, P., Goetzberger, A., & Weber, E. (2020). Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Applied Energy*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114737>
- SketchUp. (2022, September 13). *CASTING REAL-WORLD SHADOWS*.
- SNIRH. (n.d.). *Precipitação*. Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos. Retrieved September 1, 2022, from <https://snirh.apambiente.pt/index.php?idMain=1&idItem=1.1>

- Sunhours. (2022, September 10). *Calculate Hours of Sunlight*.
- Toledo, C., & Scognamiglio, A. (2021). Agrivoltaic systems design and assessment: A critical review, and a descriptive model towards a sustainable landscape vision (three-dimensional agrivoltaic patterns). In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 12). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/su13126871>
- Touil, S., Richa, A., Fizir, M., & Bingwa, B. (2021). Shading effect of photovoltaic panels on horticulture crops production: a mini review. In *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* (Vol. 20, Issue 2, pp. 281–296). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s11157-021-09572-2>
- Trommsdorff, M., Kang, J., Reise, C., Schindele, S., Bopp, G., Ehmann, A., Weselek, A., Högy, P., & Obergfell, T. (2021). Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110694>
- Wang, D., & Sun, Y. (2018). Optimizing Light Environment of the Oblique Single-axis Tracking Agrivoltaic System. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 170(4). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/170/4/042069>
- Weselek, A., Bauerle, A., Hartung, J., Zikeli, S., Lewandowski, I., & Högy, P. (2021). Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(5). <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00714-y>
- Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P. (2019). Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. In *Agronomy for Sustainable Development* (Vol. 39, Issue 4). Springer-Verlag France. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>
- Willockx, B., Herteleer, B., & Cappelle, J. (2020). Combining photovoltaic modules and food crops: First agrovoltaic prototype in belgium. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 18, 266–271. <https://doi.org/10.24084/repqj18.291>
- Willockx, B., Uytterhaegen, B., Ronsijn, B., Herteleer, B., & Cappelle, J. (2020). A *STANDARDIZED CLASSIFICATION AND PERFORMANCE INDICATORS OF AGRIVOLTAIC SYSTEMS*.

6 Anexos

Tabela 3- Tabela complementar à tabela 1 com informação acerca das épocas de sementeira e colheita de cada cultura (A senhora do monte, n.d.; AGROBIO, n.d.-b, n.d.-c, n.d.-a; Caseiro, n.d.; Chambel, n.d.-a, n.d.-d, n.d.-c, n.d.-b; Maciel, n.d.; Moreira, n.d.; Planfor, n.d.; Rau, n.d.-a, n.d.-b, n.d.-c, 2022)

Cultura	Horas de sol diárias	Época para semear	Época de colheita
Abobora	no mínimo 6 a 7	Mar,Abr,Mai,Jun	Jul,Ago,Set,Out,Nov,Dez
Acelga	no mínimo 5	Mar,Abr,Mai,Jun,Julh	Jun,Jul,Ago,Set,Out
Agrião	no mínimo 3 a 4	Set,Out,Nov	Jan,Fev,Mar
Alecrim	no mínimo 6	Mar,Abr	Todo o ano
Alface	no mínimo 4 a 6	Todo o ano	Todo o ano
Alho	no mínimo 4 a 5	Mar,Abr,Mai,Nov,Dez (melhor produção se for semeado no início do inverno)	Jul,Ago,Nov,Dez
Alho-francês	no mínimo 6	Fev,Mar,Abr,Mai	Jan,Fev,Jul,Ago,Set,Out,Nov,Dez
Batata	mais de 6	Fev,Mar,Abr,Mai (consuante a região)	Jul,Ago,Set,Out
Batata-doce	no mínimo 5	Semear em Mar,Abr,Mai,Jun, Jul,Ago, plantar em Mai,Jun	Set,Out
Beringela	no mínimo 6	Jan,Fev,Mar,Abr	Jul,Ago,Set,Out
Beterraba	no mínimo 4 a 5	Mar,Abr,Mai,Jun	Jul,Ago,Set,Out
Cebola	mínimo 4 a 6	Fev,Mar,Abr,Ago,Set,Out	Abr,Mai,Jun,Jul,Ago,Set,Out,Nov
Cenoura	entre 4 a 6	Fev,Mar,Abr,Mai,Jun,Jul,Ago	Jun,Jul,Ago,Set,Out,Nov, Dez
Couve-lombarda/roxa	no mínimo 4	Mar,Abr,Mai,Jun,Jul,Ago	Mar,Abr,Mai,Jun,Jul,Ago,Set,Out,Nov,Dez
Couve portuguesa	no mínimo 5	semear em Jun,Jul plantar em Set	Dez, Jan, Fev
Couve-flor/brócolo	no mínimo 5	Mar,Abr,Mai,Jun	Set,Out,Nov,Dez
Coentro	entre 4 a 6	Todo o ano	Todo o ano
Curgete	no mínimo 6 a 7	Abr,Mai,Jun	Jul,Ago,Set,Out
Ervilha	no mínimo 3 a 4	Fev,Mar,Abr,Mai,Set,Out,Nov	Abr,Mai,Jun,Jul,Ago
Espargos	no mínimo 6	Mar, Abr	Jan,Fev,Mar,Abr,Mai
Espinafre	no mínimo 4 a 6	Fev,Mar,Abr,Mai,Jun,Ago,Set,Out	Fev,Mar,Abr,Mai,Jun,Jul,Ago,Set,Out,Nov,Dez
Fava	no mínimo 4 a 6	Fev,Mar,Abr,Mai,Set,Out,Nov	Abr,Mai,Jun,Jul,Ago

Feijão	entre 7 a 8	Abr,Mai,Jun,Jul,Ago	Jun,Jul,Ago,Set,Out
Grão	entre 7 a 8	Mar,Abr	Jul,Ago
Hortelã	entre 4 a 6	Todo o ano	Todo o ano
Melão	entre 7 a 8	Mar,Abr,Mai,Jun	Jul,Ago,Set,Out
Manjeriço	entre 7 a 8	Todo o ano	Todo o ano
Melancia	no mínimo 8	Mar,Abr,Mai	Ago,Set,Out
Morango	no mínimo 4 a 6	Semear em jan,fev, plantar a partir de março	Mar,Abr,Mai,Jun,Jul,Ago,Set (existem algumas variedades que dão fruto todo o ano)
Nabo/Nabiça	entre 4 a 6	Mar,Abr,Mai,Jun,Jul,Ago,Set	Jun,Jul,Ago,Set,Out,Nov,Dez
Pepino	entre 7 a 8	Abr,Mai,Jun	Jun,Jul,Ago,Set
Pimentos	no mínimo 8	Fev,Mar,Abr	Jul,Ago,Set,Out,Nov
Rabanete	no mínimo 4 a 6	Fev,Mar,Abr,Mai,Jun,Jul,Ago,Set	Mar,Abr,Mai,Jun,Jul,Ago,Set,Out,Nov,Dez
Rúcula	entre 4 a 6	Todo o ano	Todo o ano
Salsa	no mínimo 4 a 6	Todo o ano	Todo o ano
Tomate	no mínimo 8	Fev,Mar,Abr,Mai	Jul,Ago,Set,Out
Tomilho	entre 4 a 6	Mar	Abr,Mai,Ago

Tabela 4- Tabela resumo das diferentes configurações utilizadas nos casos de estudo analisados (parte 1)

Ano	Local de estudo	Culturas	Densidade dos painéis solares	Espaçamento entre linhas de painéis	Orientação	Elevação	Inclinação	Tipo de módulo	Tracking	Referência
2016/2017 /2018	Herdwangen-Schoenach, sul da Alemanha (47-85' N, 9-13' E)	Campim trevo, trigo de inverno, aipo e batata	-	Foram utilizadas várias distâncias, mas foi calculada uma distância ideal para o local de 2,2 m	52,5º SW	5,5 m	20º	módulos bifaciais Sunmodule Bisun SW 270 duo (fabricante: SolarWorld AG)	Não	M. Trommsdorff <i>et al.</i> , Apr. 2021
2015	Kansas City (Lat: 39.0997° Longo: 94,5783° Alt: 311 m)	Alface	Elevados numa estrutura: meia densidade (HD) e densidade total (FD)	No solo: 20 mx5 m entre módulos Elevados por uma estrutura: Em HD espaçamento de 6,4 m; Em FD o espaçamento é de 3,2 m	-	No solo 4 m acima do solo	25º	painéis semitransparentes com uma taxa de transmissão de radiação de 50%; Módulos fotovoltaicos Trinia	Não	H. Dinesh and J. M. Pearce, .2015
	Estado de Oregon Universidade, EUA		SFO, SPO, SFC (*4)	6 m	Sul	1,1 m acima do solo	18º	Policristalino	Não	M. A. Z. Abidin, M. N. Mahyuddin, and M. A. A. M. Zainuri Jul. 02, 2021.
2010	Montpellier, França (43-65Ne3-87E)	alfaces (ciclo curto colheita), pepinos (cultura de ciclo curto), e trigo duro (colheita de ciclo longo)	uma parte de densidade total (FD) que otimiza a produção elétrica (*3)	1,6 m	14° E	4 m acima do solo	25º	módulos monocristalinos (JT185Wc, Jettion Solar Holdings Limited, Jianguo, China)	Não	Dupraz, C. et al. (2011).
			meia densidade (HD) que permite que mais radiação atinja as lavouras (*3)	3,2 m						
			FD, HD, ST e CT (*6)		rotação do painel: 50 graus E e 50 graus W	5 m	-		sim (eixo único)	
2018	Vale do Po, Norte da Itália	Milho (Zea mays EU.)	Densidade simples (área do painel / terreno proporção de área) de 0,135 e duplo densidade de 0,36	-	tinha ângulos diferentes ao longo do dia	4,5 m acima do solo	30º	Painel policristalino	Sim (2 eixos)	M. A. Z. Abidin, M. N. Mahyuddin, Jul. 02, 2021.
									Não	Amaducci, S., Yin, X. & Colauzzi, M. (2018).
2018	Decimomannu, Sardenha, Itália; 39° 19'59" N, 8° 59'19" E	-	Variando taxas de cobertura de PV de 25% a 100% (*10) Padrão quadriculado	-	orientações norte-sul e este-oeste, telhado de duas águas (*10)	altura da estufa: 2,5 m exeto as de tipo 2(*10) 4,5m	inclinação do telhado	Multicristalino e Monocristalino	Não	M. Cossu <i>et al.</i> , Oct. 01, 2018.

Tabela 5- Tabela resumo das diferentes configurações utilizadas nos casos de estudo analisados (parte 2)

2014	Japão, campus da Universidade Shimane (35-290N, 133-040E)	-	4800 células condensidade celular foi de 2 células cm-2 (*11)	-	6º sul a partir de oeste	3 m acima do solo, altura do telhado da estufa	inclinação do telhado a 26,5º	Modulo semitransparente módulo (STM), Células fotovoltaicas esféricas de silício monocristalino de 1,2 mm de diâmetro (Sphelear; Sphelear Power Corp., Kyoto, Japão)	Não	M. A. Z. Abidin, M. N. Mahyuddin, and M. A. A. M. Zainuri, Jul. 02, 2021. Cossu, M. <i>et al.</i> (2016).
2018	Zhangjiakou (41,1 ° N, 114,7 ° E) está no norte da China	-	-	3 metros	PV oblíquo, com orientação este-oeste virados a sul	2,5 metros do solo	ângulo de inclinação do eixo único é de 39 graus	-	sim (eixo único)	M. A. Z. Abidin, M. N. Mahyuddin, and M. A. A. M. Zainuri, Jul. 02, 2021.
2017	Índia, Jodhpur, (73-E e 26,2-N)	sugerem várias culturas para cultivar entre as fileiras dos painéis	SFO, SPC	6 m	inclinação a sul	0,5 m	26 °		Não	M. A. Z. Abidin, M. N. Mahyuddin, and M. A. A. M. Zainuri, Jul. 02, 2021. Santra, P., Pande, P., Kumar, S., Mishra, D. & Singh, R. (2017).
2020	Universidade Putra Malásia, clima tropical	-	-	-	-	1 m a 1,5 m	-	-	-	Othman, N. F., Yaacob, M. E., Su, A. S. M., Jaafar, J. N., Hizam, H., Shahidan, M. F., Jamaluddin, A. H., Chen, G., & Jalaludin, A. (2020). Toledo, C., & Scognamiglio, A. (2021).
2018	Dirmingen, South-West Germany	-	-	Entre 10 a 15 m	-	0,6 a 1 m	Posição vertical	Bifacial frameless glass-glass modules	Não	Meyer.C. (2019)

Tabela 6- Tabela- resumo das ferramentas utilizadas nos casos de estudo

Ferramentas utilizadas	Referência	Ferramentas utilizadas	Referência
Radiance (*1)	M. Trommsdorff <i>et al.</i> , "Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany," <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , vol. 140, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110694.	-	M. A. Z. Abidin, M. N. Mahyuddin, and M. A. A. M. Zainuri, "Solar photovoltaic architecture and agronomic management in agrivoltaic system: A review," <i>Sustainability (Switzerland)</i> , vol. 13, no. 14, MDPI AG, Jul. 02, 2021, doi: 10.3390/su13147846.
ZENIT(*2)			
SolarGIS			
A configuração do PV é determinada pela formulação de um problema de otimização com o objetivo de maximizar a irradiação solar incidente no PV	H. Dinesh and J. M. Pearce, "O potencial dos sistemas agrivoltaicos", doi: 10.1016/j.rser.2015.10.0241364-0321.	Utilização de um algoritmo de otimização	M. A. Z. Abidin, M. N. Mahyuddin, and M. A. A. M. Zainuri, "Solar photovoltaic architecture and agronomic management in agrivoltaic system: A review," <i>Sustainability (Switzerland)</i> , vol. 13, no. 14, MDPI AG, Jul. 02, 2021, doi: 10.3390/su13147846.
PVSyst (versão 6.34)			
The Simulateur multiDisciplinaire les Cultures Standard. (STICS) modelo de cultura é usado para obter dados de rendimento de cultura para vários tipos de culturas			
-	M. A. Z. Abidin, M. N. Mahyuddin, and M. A. A. M. Zainuri, "Solar photovoltaic architecture and agronomic management in agrivoltaic system: A review," <i>Sustainability (Switzerland)</i> , vol. 13, no. 14, MDPI AG, Jul. 02, 2021, doi: 10.3390/su13147846.	Utilização de um algoritmo de otimização	M. A. Z. Abidin, M. N. Mahyuddin, and M. A. A. M. Zainuri, "Solar photovoltaic architecture and agronomic management in agrivoltaic system: A review," <i>Sustainability (Switzerland)</i> , vol. 13, no. 14, MDPI AG, Jul. 02, 2021, doi: 10.3390/su13147846.
software PVsyst			
software R (Free Software Foundation Inc., www.fsf.org) (*5)			
STICS	Dupraz, C. et al. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. <i>Renewable Energy</i> 36, 2725–2732 (2011) M. A. Z. Abidin, M. N. Mahyuddin, and M. A. A. M. Zainuri, "Solar photovoltaic architecture and agronomic management in agrivoltaic system: A review," <i>Sustainability (Switzerland)</i> , vol. 13, no. 14, MDPI AG, Jul. 02, 2021, doi: 10.3390/su13147846..	aquisição de dados baseado em Arduino (DAQ), sensor térmico e sensor de vento	Othman, N. F., Yaacob, M. E., Su, A. S. M., Jaafar, J. N., Hizam, H., Shahidan, M. F., Jamaluddin, A. H., Chen, G., & Jalaludin, A. (2020). Modeling of stochastic temperature and heat stress directly underneath agrivoltaic conditions with orthosiphon <i>Stamineus</i> Crop Cultivation. <i>Agronomy</i> , 10(10). https://doi.org/10.3390/agronomy10101472
Para simular o crescimento e a produção de culturas cultivadas à sombra de um Agrovoltaicosistema, foi desenvolvida uma plataforma de software em Scilab(*8)acoplado um modelo de radiação e sombreamento ao simulador genérico de crescimento de culturas GECROS		M. A. Z. Abidin, M. N. Mahyuddin, and M. A. A. M. Zainuri, "Solar photovoltaic architecture and agronomic management in agrivoltaic system: A review," <i>Sustainability (Switzerland)</i> , vol. 13, no. 14, MDPI AG, Jul. 02, 2021, doi: 10.3390/su13147846.	
Radiação difusa e direta foram calculados com o modelo descrito por Collares-Pereira	Amaducci, S., Yin, X. & Colauzzi, M. Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. <i>Applied Energy</i> 220, 545–561 (2018).		
-			
simulações numéricas para calcular a distribuição e disponibilidade de luz	M. Cossu <i>et al.</i> , "Assessment and comparison of the solar radiation distribution inside the main commercial photovoltaic greenhouse types in Europe," <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , vol. 94, Elsevier Ltd, pp. 822–834, Oct. 01, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.06.001.M. A. Z. Abidin, M. N. Mahyuddin, and M. A. A. M. Zainuri, "Solar photovoltaic architecture and agronomic management in agrivoltaic system: A review," <i>Sustainability (Switzerland)</i> , vol. 13, no. 14, MDPI AG, Jul. 02, 2021, doi: 10.3390/su13147846.		