

Contributos para a conceção de uma estufa para produção de canábis medicinal

Trabalho de Projeto

Curso de Mestrado em Agricultura Sustentável

Aluno: João Manuel Sena Janeiro

Orientador:

Professor Doutor José Manuel Rato Nunes

Co-orientador:

Professor Doutor Shery Lev (The Hebrew University of Jerusalem)

JOÃO MANUEL SENA JANEIRO

Projeto: Contributos para a conceção de uma estufa para produção de canábis medicinal.

Trabalho de Projeto apresentado para obtenção do grau de mestre em Agricultura Sustentável conferido pelo Instituto Politécnico de Portalegre.

Orientadores

Professor Doutor José Manuel Rato Nunes (ESAE)

Professor Doutor Shery Lev (The Hebrew University of Jerusalem)

Arguente principal: Professor Doutor Rui Machado (UE)

Arguente: Professor Doutor Luís Alcino da Conceição (ESAE)

Presidente do Júri: Professora Doutora Carolina Balão da Silva (ESAE)

Classificação: 19 valores

Escola Superior Agrária de Elvas

2023

Agradecimentos

É tacitamente aceite que o “conhecimento não ocupa espaço”, contudo, o processo de aquisição e consolidação desse conhecimento, obriga a muitos sacrifícios e abnegações!

Numa fase do meu percurso académico onde enveredei por caminhos para mim desconhecidos, foi fundamental a orientação e incondicional apoio de todos os meus Colegas de Mestrado, naturalmente complementada por todos os excelsos Professores da Escola Superior Agrária de Elvas, com quem tive o privilégio de privar e muito aprender.

Uma palavra de enorme apreço e agradecimento para o meu orientador, Professor Doutor José Manuel Rato Nunes, pela inabalável disponibilidade, douta e esclarecida maneira de me apresentar soluções e respostas para as questões e dúvidas que me surgiram ao longo do presente trabalho.

Ao Professor Doutor Shery Lev agradeço todos os momentos de discussão técnica e académica, sempre num ambiente de pesquisa e definição de soluções cada vez mais completas e tecnologicamente sustentáveis.

À minha Família, agradeço profundamente todo o apoio, incentivo e dedicação durante esta caminhada, com um especial sentimento de gratidão pelo apoio incondicional que me deram, exortando-me em todos os momentos a continuar e chegar ao fim desta etapa.

A todos, o meu MUITO OBRIGADO!

Resumo

O presente relatório de projeto, realizado durante as fases de engenharia e construção de uma estufa com aproximadamente 10.000 metros quadrados, visa definir um conjunto de princípios fundamentais para definir um possível modelo de estufa para produção de cânabis para fins medicinais, adequado à região sul da Península Ibérica. Após efetuarmos o diagnóstico inicial, elencamos alguns princípios básicos relativos às instalações de cultivo e localização do mesmo, analisando de seguida os principais fatores que influenciam o cultivo em estufa, nomeadamente: a climatização, a luz e a radiação e a fertirrega. O resultado final constitui um conjunto de considerações para o desenvolvimento de um potencial modelo funcional, que conjuga diversas componentes, desenvolvidas sempre com base nas necessidades da cultura, com o impacto na qualidade e especificações necessárias à produção de matérias-primas de base para o fabrico de medicamentos para uso humano, integrando ainda a componente de uso eficiente dos recursos materiais e financeiros.

Palavras-chave: *canábis sativa* L.; estufas; controlo de condições climáticas; eficiência energética.

Abstract

This project report, carried out during the engineering and construction phases of a greenhouse with approximately 10,000 square meters, aims to define a set of fundamental principles for a possible greenhouse model for the production of cannabis for medicinal purposes, suitable for the southern region of the Peninsula Iberian. After carrying out the initial diagnosis, we list some basic principles relating to cultivation facilities and their location, then analyzing the main factors that influence greenhouse cultivation, namely: climate control, light and radiation and fertigation. The final result constitutes a potential functional model that combines several components, always developed based on the needs of the culture, with the impact on the quality and specifications necessary for the production of basic raw materials for the manufacture of medicines for human use, also integrating the component of efficient use of material and financial resources.

Keywords: cannabis sativa L.; greenhouses; control of weather conditions; energy efficiency..

Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

- Ce – Condutividade elétrica
- DLI – (*Daily Integral Light* – Integral diário de luz)
- DPV – Défice de Pressão de Vapor
- GACP – *Good Agricultural and Collection Practice*
- EPAR – (*extended photosynthetically active radiation*) – Radiação fotossinteticamente ativa estendida)
- PAR – (*photosynthetically active radiation*) – Radiação fotossinteticamente ativa
- pH – (Potencial de Hidrogénio)
- PPFD – (*photosynthetic photon flux density*) – Densidade do fluxo de fótons fotossintéticos)

Índice Geral

1. Introdução e Objetivos	1
1.1. Introdução	1
1.2. Objetivos	2
2. Abordagem metodológica	3
3. Caracterização e diagnóstico da situação de partida	4
3.1 Diagnóstico inicial	4
3.2 Tipos de instalações de cultivo	5
3.3 Localização das instalações	5
4. Descrição do projeto	7
4.1. Climatização	7
4.1.1. O clima: temperatura e humidade no interior da estufa.	8
4.1.2. Possíveis reações a elevadas amplitudes térmicas	8
4.1.3. O impacto da humidade relativa e da temperatura nas fases do ciclo de crescimento da planta	9
4.1.4. O controlo e monitorização das variáveis	10
4.2. Luz e radiação	11
4.2.1. A radiação solar disponível no sul da Península Ibérica	12
4.2.2. O impacto da radiação nas fases de crescimento da planta	12
4.2.3. Fotoperíodo e tecnologia de controlo	14
4.3. Rega e fertilização	17
4.3.1. Fertirrega de precisão: variáveis ao longo do ciclo de produção	17
4.3.2. Uso eficiente da água: da qualidade à quantidade	18
4.3.3. Evapotranspiração e necessidades de rega: sistemas autónomos	18
4.4. Eficiência energética	19
4.4.1. Dimensionamento da estufa e necessidades energéticas	20
4.4.2. Aproveitamento de energia para vários usos	21
4.4.3. A pegada ecológica	21
5. Implementação e controlo: Contributos para um modelo	23
5.1. Estrutura e dimensões	23
5.2. Climatização	26
5.3. Luz e radiação	27
5.4. Fertirrega e aproveitamento da água	29

5.5. Tecnologias de controlo	31
5.6. Eficiência energética.....	34
5.7. Custos de instalação e exploração	35
Bibliografia	39

Índice de Quadros

Quadro 1 - Valores de DLI	15
Quadro 2 - Estimativa de custos operacionais por ano de funcionamento	37

Índice de Figuras

Figura 1 - Relação entre a temperatura e a humidade relativa	8
Figura 2 - Mapa de radiação global horizontal na Península Ibérica	12
Figura 3 - Espectro da luz solar	13
Figura 4 - Valores médios DLI na Europa	14
Figura 5 - locais escolhidos para analisar o DLI	16
Figura 6 - Gráfico dos Valores de DLI Médios	16
Figura 7 - Trocas de calor numa estufa	20
Figura 8 - Tipologia de estufa instalada	23
Figura 9 - Dimensões da estrutura construída	24
Figura 10 - Comportamento da estufa em relação ao vento e fluxos de ar	24
Figura 11 - Ventilador de extração	25
Figura 12 - Sistema de nebulização por alta pressão	26
Figura 13 - Gerador de ar quente	27
Figura 14 - Telas de sombra recolhidas (branca - 49% e preta 98% de sombra)	28
Figura 15 - Tipo de sistema de fertirrega instalado	30
Figura 16 - Diagrama de controlo de uma estufa de alta tecnologia - adaptado.	32

I. Introdução e Objetivos

I.1. Introdução

O cultivo de canábis para fins medicinais tem vindo a aumentar significativamente nos últimos anos. Por várias razões, Portugal apresenta-se como um país com excelentes condições para o desenvolvimento desta atividade, pois além da base legal estar definida existem outros fatores fundamentais, como é o caso das excelentes condições climáticas, o valor da mão de obra e a sua posição estratégica ao nível comercial. Além de Portugal, existem outros países em fase de legalização da utilização desta planta para fins medicinais e, nalguns casos, até para uso recreativo. Entre estes países encontra-se Espanha, outro potencial produtor a curto prazo e que, em caso de avançar, se poder tornar num dos maiores países produtores do mundo.

As técnicas de cultivo desta planta são, na sua maioria, ditadas pela qualidade final desejada do produto, uma vez que a produção de matéria-prima para o fabrico de medicamentos carece de exigentes níveis de controlo. Neste contexto, além das normas muito rígidas impostas pelos reguladores de cada país, surge a necessidade de garantir, em toda a cadeia de produção, o cumprimento dos mais elevados padrões de higiene e limpeza, que permitam mitigar os riscos de contaminação da planta, a par do registo permanente de todos os dados que permitam verificar a rastreabilidade do produto, desde a semente ao paciente!

O presente projeto visa apresentar um conjunto de especificações técnicas associadas ao cultivo da planta de canábis em estufa, com aplicabilidade no sul da Península Ibérica, tendo por base a experiência do aluno que, durante os últimos 3 anos, tem desempenhado funções técnicas e de gestão em duas empresas produtoras de canábis para fins medicinais.

Será utilizada uma metodologia que conjuga a teoria, descrita por investigadores das diversas áreas a abordar, com a componente prática, materializada no desenho, desenvolvimento e construção efetiva de duas estufas com uma área superior a 9500 m².

Durante a descrição do projeto será efetuada uma revisão da bibliografia e a apresentação do estado da arte no início de cada capítulo, permitindo assim efetuar uma

abordagem mais detalhada de cada componente a estudar, ao mesmo tempo que nos permite apresentar conclusões parcelares e evidenciar os aspetos mais importantes do projeto.

No final será apresentado um conjunto de especificações para um modelo possível, baseado numa estufa construída durante o ano 2022, onde se pretende conjugar a eficiência energética, com a eficácia das diversas componentes no processo de cultivo, numa lógica de otimização de custos e garantia de qualidade permanentes.

1.2. Objetivos

O presente projeto tem como objetivo geral a apresentação dos princípios base para o desenvolvimento de um modelo de estufa para cultivo de canábis para fins medicinais, passível de ser instalada no sul da Península Ibérica. Como objetivos específicos, a definição e análise dos elementos: climatização, onde se inclui a ventilação, aquecimento e arejamento; luz e radiação; rega e fertilização e eficiência energética.

Cumulativamente, será apresentada uma pequena análise custo-benefício do modelo proposto comparado com os atualmente utilizados, de modo a sustentar a importância do investimento inicial face à sustentabilidade global da atividade.

2. Abordagem metodológica

A apresentação do presente projeto será dividida em duas partes distintas: na primeira, descrita ao longo do capítulo 4, serão apresentados os conceitos teóricos relevantes para cada uma das áreas a implementar, o estado da arte e, sempre que conveniente, o impacto de cada um dos componentes no resultado final desejado; ficando a segunda parte reservada à apresentação dos contributos para um modelo, descrito ao longo do capítulo 5, tendo por base um projeto desenhado, desenvolvido e construído pelo aluno, durante o ano de 2022.

Durante a realização do presente trabalho verificámos que o estado da arte, onde, especificamente, sejam referidas estufas específicas para cultivo de canábis para fins medicinais, é muito reduzido ou mesmo inexistente. Para mitigar esta possível fragilidade, recorreremos à análise de estufas para outras culturas, onde foram conjugadas com as necessidades específicas da planta de canábis para ser possível apresentar as conclusões.

3. Caracterização e diagnóstico da situação de partida

3.1 Diagnóstico inicial

As décadas de escuridão que “ocultaram” esta planta aos olhos da comunidade científica e industrial fizeram com que, naturalmente, ela se tornasse uma ilustre desconhecida, ao mesmo tempo que proliferavam “cultivadores ilegais” um pouco por toda a parte. Esses, por não disporem de conhecimentos, tecnologia e recursos adequados, acabaram por definir modelos de cultivo adaptados à produção para “consumo próprio”, não necessitando de replicar os parâmetros necessários para a indústria farmacêutica: qualidade e constância do produto colocado à disposição dos pacientes.

Quando, a partir de 2015, o Mundo assistiu à descoberta do “Ouro Verde¹”, ninguém estava preparado para conseguir o que era realmente necessário: qualidade do produto. Paralelamente, a experiência recolhida em alguns países com cultura de canábis para fins recreativos, começava a ser importada para uma indústria que carece de especiais cuidados e aplicação de metodologia perfeitamente definidas.

A cultura desta planta obedece a complexos processos de licenciamento e funcionamento, uma vez que a substância resultante da atividade é controlada por lei. O cumprimento rigoroso das *Good Agricultural and Collection Practice (GACP)*, além de diversos normativos técnicos e legais, estabelecem um referencial complexo a respeitar, ao longo de todo o processo produtivo, desde o licenciamento, até à manutenção anual das respetivas licenças (INFARMED, 2023).

Pese embora a atividade de produção de flor de canábis pudesse ser realizada ao ar livre, a única forma de serem garantido todos os parâmetros associados às plantas para uso medicinal, é desenvolver o cultivo em ambientes controlados. Aí nasce o nosso projeto. Desenhar uma estufa eficiente, dos pontos de vista energético, ambiental e social, que permita o cumprimento de todas as normas e uma produção regular, que gere capital para a sua sustentabilidade.

¹ Termo utilizado pelos órgãos de comunicação social nacionais quando se começou a noticiar a alteração legal em Portugal e os valores altamente lucrativos do cultivo de canábis para fins medicinais.

3.2 Tipos de instalações de cultivo

A garantia de qualidade das operações de cultivo da planta de canábis para fins medicinais tanto pode ser mantida em estufas de cultivo, como em instalações completamente fechadas, denominadas por *indoor*, existindo algumas diferenças entre as duas tipologias. Podemos ainda assistir a operações de cultivo desta planta ao ar livre, contudo, face às exigências associadas ao fabrico de medicamentos para uso humano, apenas será viável para produção de biomassa para posterior extração de princípios ativos e não para a produção de flor seca.

O cultivo em estufa permite utilizar a energia do Sol de forma direta, fator muito importante tanto ao nível do desenvolvimento da cultura, como do ponto de vista energético, bem como o CO₂, naturalmente disponível no meio onde está instalada. Já o cultivo *indoor*, necessita de iluminação artificial, mas permite a completa filtração do ar, fator muito importante na prevenção de pragas e doenças.

Em ambos os casos é possível controlar todos os parâmetros com impacto direto no desenvolvimento das plantas, nas diversas fases do cultivo, existindo tecnologia adequada para cada tipo de instalação.

Ao nível dos valores de investimento, para uma capacidade de produção idêntica, uma instalação *indoor* pode custar o dobro de uma estufa. Este fator é preponderante no momento da tomada de decisão, uma vez que a rentabilidade do negócio terá que ser assegurada e mantida ao longo de todo o tempo da operação.

3.3 Localização das instalações

No momento de se definir a tipologia de estufa a construir importa, antes de tudo, conhecer muito bem os dados climáticos do local onde se vai instalar. Esta informação é fundamental para o sucesso global de operação. Se nos climas mais frios uma estufa do tipo “holandês” pode ser a mais adequada, num clima seco e quente o mesmo já não sucede, podendo a tecnologia instalada ser o maior inimigo do investidor. Muita tecnologia não significa maior capacidade produtiva. A tecnologia adequada, que muitas vezes até pode ser mais rudimentar que outras existentes, pode ser o maior fator de sucesso numa instalação.

Depois de definidos os requisitos tecnológicos adequados ao local onde se pretende instalar a estufa, será necessário verificar outros elementos fulcrais para o sucesso do projeto. A disponibilidade de água para a rega, a possibilidade de dispor de energia elétrica da rede, as limitações associadas ao ordenamento do território, bem como a identificação de culturas vizinhas que possam ter impacto no cultivo da planta de canábis, serão elementos a ter em linha de conta previamente ao início do investimento, de modo a mitigar riscos associados à localização (Ponce, *et al.*, 2015). A todos estes elementos acrescem ainda os fatores sociais, pois a disponibilidade de pessoas para trabalhar na estufa é outro fator vital, uma vez que a necessidade de mão de obra, muita dela bastante especializada, é fundamental para garantir a capacidade de produção.

4. Descrição do projeto

O presente projeto, realizado no âmbito do Mestrado em Agricultura Sustentável, surgiu de uma situação real de investimento, realizado no concelho de Elvas, durante o ano 2022. O resultado desse investimento foi a construção de uma estufa para cultivo de canábis para fins medicinais, com uma área de aproximadamente 10.000 m², dividida em áreas de cultivo, desde a propagação até à floração, dotada de tecnologia de controlo climático, desde a radiação até à humidificação e zonas técnicas de apoio. Por motivos de confidencialidade não podemos apresentar dados concretos da mesma, contudo, alguns dos princípios referidos ao longo do presente projeto, foram de facto verificados nessa estufa, servindo como elemento de verificação e pré-validação da técnica. A estufa em causa é, aos dias de hoje, exclusiva, pelo que ainda não será possível estabelecer dados de validação concretos, pois não existe informação anterior sobre os mesmos.

Apenas foram apresentados alguns dos principais elementos constituintes de uma estufa, de forma a especificar os principais fatores com influência no crescimento e manutenção das plantas. Os aspetos relacionados com a higienização, limpeza, contaminação cruzada, entre outros, referentes ao cumprimento das especificações impostas pelo regulador, não serão apresentadas, uma vez que a forma de as implementar em nada afeta a vertente agronómica.

4.1. Climatização

A climatização de estufas agrícolas, e a forma de gerir os parâmetros que afetam o cultivo de forma muito significativa, tem sido alvo de estudos e investigação ao longo de séculos. A definição de modelos ótimos não é uma simples resposta a uma equação, onde sejam relacionados os valores de algumas variáveis e, no final, nos seja apresentada uma resposta. Por exemplo, a investigação de Henten (Henten, 1994) tentou definir modelos dinâmicos para a cultura da alface. Contudo, a sua replicabilidade noutras culturas e noutras localizações geográficas não será possível, pois os fatores em análise serão completamente diferentes.

No nosso entender, além das necessidades específicas de cada cultura, os dados mais importantes a introduzir num possível modelo de apoio à decisão são os que derivam

das características climáticas de cada região. Essa singularidade é crucial para a cultura de canábis, pois os requisitos necessários para a sua aplicação ao nível medicinal obrigam à manutenção de valores de contaminação microbiológica muitíssimo reduzidos. As variações provocadas pela adição de uma “simples” rede de sombra, numa estufa, podem ter um impacto enorme em todos os valores registados no interior da mesma (Ahmed *et al.*, 2019).

4.1.1. O clima: temperatura e humidade no interior da estufa.

Os valores da temperatura e da humidade relativa no interior da estufa são, naturalmente, muito afetados pelas condições climáticas do local onde esta se encontra instalada. Se a possibilidade de utilização da energia solar é um fator benéfico ao nível da disponibilidade de luz e radiação, pode ser uma enorme dor de cabeça na hora de controlar a temperatura e a humidade no interior da estufa.

Os fatores externos, tais como: temperatura do ar, humidade relativa e vento, afetam claramente a temperatura e a humidade no interior da estufa. As curvas que relacionam a temperatura e a humidade, para valores de pressão atmosférica iguais, são representadas de forma assimétrica, como mostra a figura 1 (Allen, *et al.*, 1998):

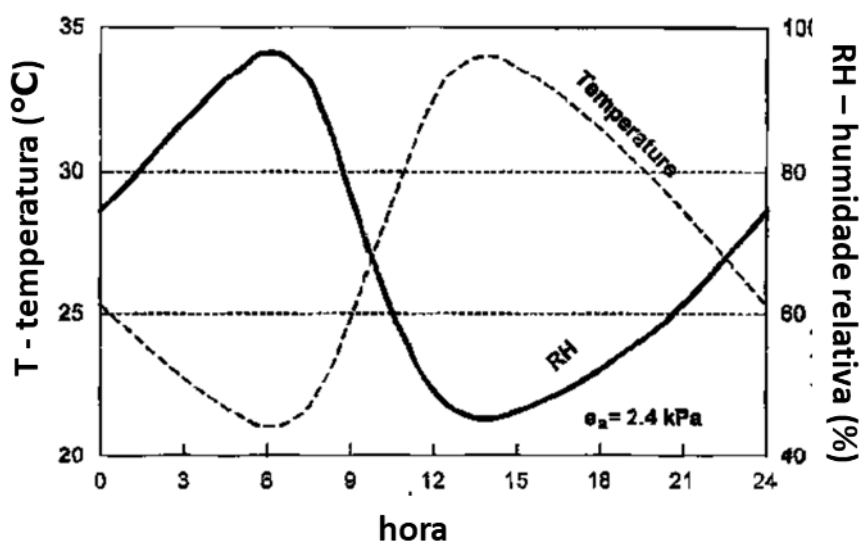


Figura 1 - Relação entre a temperatura e a humidade relativa

4.1.2. Possíveis reações a elevadas amplitudes térmicas

Os dados climatológicos registados no sul da Península Ibérica mostram-nos que, repetidamente, os valores da temperatura facilmente podem variar entre os -5° C e os

45° C (IPMA, 2023) (AEMET, 2023), ao longo do ano. Este intervalo de temperaturas tem um grande impacto na planificação técnica de uma estufa.

O desafio colocado pelo elemento “temperatura ambiente” é fundamental para a escolha do tipo de cobertura a utilizar, bem como para os sistemas de arrefecimento, aquecimento, ventilação, desumidificação, humidificação e rega. A garantia de controlo das condições climáticas no interior de uma estufa não é absoluta, ao invés do que sucede na modalidade *indoor*.

A escolha dos materiais de cobertura, bem como da tipologia de estrutura, representará um fator preponderante no resultado final. A utilização de vidro, por exemplo, não será a opção mais adequada para o sul da Península Ibérica, tal como a tipologia de estrutura “holandesa”. A colocação de janelas zenitais e laterais, conjugada com o estudo dos ventos predominantes no local, associada à altura (e naturalmente ao volume) da estufa, deverão ser devidamente calculados para maximizar a eficiência térmica do equipamento (Mesmoudi, *et al.*, 2017). A incerteza associada ao controlo da temperatura e da humidade deve ser calculada de acordo com as condições específicas de cada local, de modo a mitigar os possíveis impactos negativos do fator temperatura do ar.

4.1.3. O impacto da humidade relativa e da temperatura nas fases do ciclo de crescimento da planta

Um dos elementos mais importantes no cultivo de canábis para fins medicinais é a garantia da qualidade do produto final. Para atingir os mais elevados níveis de qualidade global, tanto ao nível da eventual contaminação microbiológica registada no produto final, normalmente flor seca, como no próprio desenvolvimento e crescimento da planta, é necessário garantir um controlo muito rigoroso dos valores da humidade relativa e da temperatura, em todas as fases do cultivo (Chandra, *et al.*, 2017).

Os valores ideais da temperatura para a planta variam entre os 10 e os 27° C (Small, *et al.*, 2002). Contudo, dependendo das variedades, estes valores podem ser ligeiramente distintos, podendo os valores variar 20%, situando o intervalo entre os 12 e os 32°C (Galic, *et al.*, 2022).

Os valores de humidade relativa ótimos, nas diversas fases de crescimento e desenvolvimento da cultura, variam entre os 90%, na fase de propagação vegetativa e os

55%, para a fase final da floração. Na fase de crescimento vegetativo, os valores de humidade relativa deverão ser de aproximadamente 75% (Chandra, *et al.*, 2017).

O balanço entre a temperatura e a humidade tem que ser sempre garantido, de modo a evitar a propagação de fungos, bem como para manter as plantas em condições ótimas e sem stress.

Para se garantir o controlo destas duas variáveis é necessário instalar sistemas adequados. Por um lado, a temperatura pode ser controlada através da utilização de sistemas de aquecimento e de arrefecimento. Para aquecer o ar da estufa podem ser utilizados sistemas de geração de ar quente, bem como sistemas de circulação de água quente, que utilizam combustíveis diversos (combustíveis fósseis, eletricidade ou biomassa). Já o arrefecimento é garantido com a instalação de sistemas de exaustão de ar quente adequados, que podem ir desde simples janelas a extratores de ar de elevada capacidade, podendo ainda ser conjugados com sistemas de humificação por alta pressão ou por paredes húmidas.

O controlo de humidade é efetuado através da instalação de desumidificadores, que permitem reduzir substancialmente os valores de humidade relativa, bem como de sistemas de alta pressão para humificar o ar ambiente.

A eficiência destes sistemas depende sempre de uma boa estrutura de circulação de ar interior, que permita a homogeneização do ar e a sua condução de e para os sistemas de controlo de temperatura e humidade.

A ventilação interior, além de ser vital para o rendimento dos sistemas de controlo de temperatura e humidade, é fundamental para a promoção do arejamento no interior da cultura, favorecendo, entre outros aspetos, o crescimento e fortalecimento dos ramos das plantas.

4.1.4. O controlo e monitorização das variáveis

A garantia de que os valores de humidade e temperatura estão dentro dos limites definidos é vital para todo o processo. O clima exterior afeta tremendamente o desempenho dos sistemas dedicados à climatização da estufa, facto que obriga a um cuidado controle dos mesmos. Além disso, os níveis de humidade gerados pelas plantas, excesso de rega e condensação, são outros fatores a ter em conta no dimensionamento dos sistemas de controlo (Katsoulas & Stanghellini, 2019).

Os níveis de ventilação forçada, extração e volume das trocas de ar interior, humidificação e corte de radiação solar são as técnicas mais comuns para baixar a temperatura interior de uma estufa. Por sua vez, a humidade é controlada através de sistemas de desumidificação, aquecimento de ar e ventilação forçada (Villarreal-Guerrero, *et al.*, 2020).

No seu conjunto, todos estes equipamentos são comandados por um sistema central, cuja atuação depende de sondas de temperatura e humidade relativa, posicionadas em pontos estratégicos e cuja representatividade dos dados recolhidos seja a mais adequada.

No caso concreto do cultivo da planta de *Cannabis Sativa* L. para fins medicinais, o controlo da temperatura e da humidade apresenta duas vertentes distintas: em primeiro lugar é fundamental reduzir o risco de proliferação de fungos e bactérias, de modo a garantir a qualidade do produto final; em segundo, a eficiência do cultivo depende em grande medida da capacidade de otimizar os valores de temperatura e humidade no processo, pois o custo de produção é um fator muito importante na rentabilidade das operações desta natureza.

4.2. Luz e radiação

A luz e a radiação solar são dois aspetos muito importantes no resultado final da operação. A quantidade de luz e energia disponíveis é um fator preponderante na rentabilidade global do processo de cultivo. A atividade fotossintética está diretamente relacionada com estes dois elementos, sendo o principal fator para o crescimento e desenvolvimento das plantas (Bilodeau, Wu, *et al.*, 2019). Além disso, o espectro de luz apresenta-se como outro fator a ter em conta nas diversas fases do cultivo, de acordo com as recentes investigações sobre o tema.

O estudo do impacto da radiação solar em estufas é uma das disciplinas que mais se tem desenvolvido nos últimos tempos. Não basta ter uma estufa cuja cobertura é um plástico qualquer! A difusão do material utilizado para a cobertura, bem como o seu comportamento térmico e refletivo, são fundamentais para a eficiência do equipamento (Liu, *et al.*, 2021).

A radiação solar disponível, bem como a luz associada à mesma, afetam de sobremaneira os valores da temperatura e da humidade registadas no interior da estufa (Ahmed, *et al.*, 2019).

Ao nível do desenvolvimento vegetativo das culturas, a PAR (*Photosynthetically Active Radiation* – radiação fotossintética ativa) é a unidade de medida mais utilizada na definição dos valores necessários de radiação e conseqüente espectro associado ao crescimento das plantas, de uma maneira geral. A adição ou utilização dos níveis de PAR e demais comprimentos de onda de luz necessários às diversas fases do ciclo de cultivo, de forma consistente, é um dos desafios de engenharia mais complexos nos dias de hoje (Pazuki, *et al.*, 2017).

4.2.1. A radiação solar disponível no sul da Península Ibérica

A posição geográfica da Península Ibérica, especialmente a zona sul, oferece uma exposição solar muito favorável à utilização da radiação disponível para diversos fins². Esta vantagem competitiva constitui um fator muitíssimo importante no momento de definir a tecnologia a utilizar, especialmente na escolha e definição de materiais de cobertura e de privação de radiação. Como se pode verificar na figura 2 (Bank, 2023), os valores acumulados de energia disponibilizada pelo sol variam entre os 4,6 e os 5,4 kWh/m², o que significa muita energia para gerir.

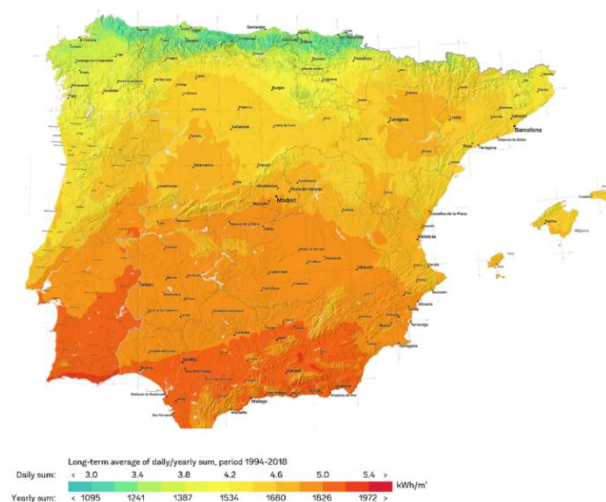


Figura 2 -Mapa de radiação global horizontal na Península Ibérica

² Os dados da radiação solar apresentados referem-se à Radiação Global Horizontal, como principal indicador da capacidade de utilização da radiação solar para a geração de energia e outras aplicações (Bank, 2023).

4.2.2. O impacto da radiação nas fases de crescimento da planta

A gestão da energia solar disponível tem uma abordagem mais complexa do que possa parecer. Primeiro, porque o aproveitamento dessa energia para o crescimento das plantas, num ambiente de estufa de cultivo, tem um enorme impacto no clima da estufa, especialmente nos meses de primavera e verão; segundo porque o excesso de radiação tem impacto na evapotranspiração registada (Katsoulas & Kittas, 2011). É necessário adaptar os valores das duas parcelas em cada fase de crescimento e desenvolvimento da cultura. O espectro da radiação solar contém as faixas visíveis da luz (entre os 400 e os 700 nm), bem como as faixas de ultravioleta e infravermelhos (Hossain, 2023, p. 14).

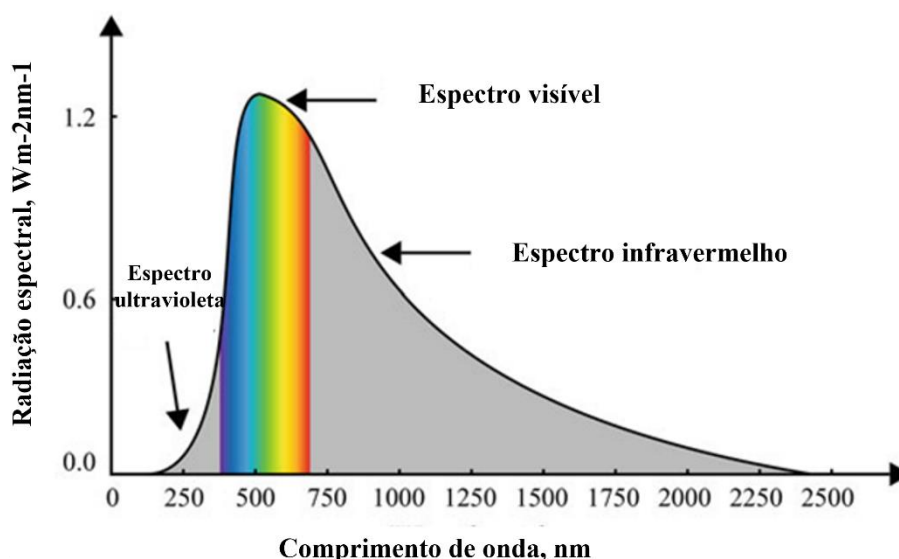


Figura 3 - Espectro da luz solar

As quantidades de energia necessária, bem como o espectro mais adequado, variam claramente entre as fases de crescimento vegetativo e de floração da planta de *Cannabis Sativa L.* As conclusões dos estudos disponíveis sobre a influência do espectro da luz nas fases de crescimento de plantas referem que, na fase de crescimento vegetativo, a faixa mais adequada situa-se entre 450 e os 520 nm, incluindo valores na gama dos 400 nm. Já a fase final da floração, a faixa mais adequada situa-se entre os 625 e os 700 nm., o PPF (photosynthetic photon flux density – densidade do fluxo de fótons fotossintéticos) adequado para o crescimento e desenvolvimento da planta da *Cannabis Sativa L.* varia entre os 300 e os 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Bilodeau, et al., 2019), dependendo da fase de desenvolvimento em que se encontra.

4.2.3. Fotoperíodo e tecnologia de controlo

A bibliografia descreve de forma unânime que, no cultivo de *Cannabis Sativa L.*, a definição do fotoperíodo é fundamental para a maximização do rendimento da cultura. Na fase de crescimento vegetativo, o período de privação de luz não pode ser superior a 6 horas, enquanto que na fase de floração esse período duplica, para 12 horas. Esta é a única forma de se conseguir “enganar” a planta e produzir vários ciclos de cultivo anuais (Amrein, et al., 2020).

Em relação ao PPFD disponível teremos dois cenários distintos. O primeiro resulta da utilização e gestão dos valores naturalmente disponibilizados pelo sol; o segundo surge apenas nas situações em que, para garantir o fotoperíodo, existe necessidade de adicionar luz artificial durante o cultivo.

Além do PPFD, cuja medida nos indica valores instantâneos, importa verificar também o DLI (*Daily Integral Light* – Luz integral diária). O DLI representa a quantidade de luz recebida numa determinada área, num período de 24 horas. Tem uma relação direta com a PAR e expressa-se em $\text{mol m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Os valores de DLI registados ao ar livre, num dia sem nuvens, apresentam reduções drásticas no interior de uma estufa, podendo ser 50% inferiores, dependendo do tipo de cobertura utilizada na estufa. Na figura 4 podemos verificar que a Península Ibérica, especialmente o Sul, é uma região que tem um DLI médio bastante elevado.



Figura 4 - Valores médios DLI na Europa

Com estes dados será possível calcular não só o período necessário de iluminação para a cultura, mas também, o tipo e a qualidade da luz que deveremos ter disponível.

Recorrendo a uma ferramenta de cálculo de DLI ³ por mês, verificado no exterior, é possível apurar quais os meses em que é necessário efetuar alguma operação de controlo de fluxo luminoso.

Os dados apresentados no quadro seguinte referem-se ao DLI registado em 8 pontos, dispersos pelo sul da Península Ibérica (representados na figura 5).

Meses	Local 1	Local 2	Local 3	Local 4	Local 5	Local 6	Local 7	Local 8
Jan	17,97	16,73	17,87	17,63	17,87	17,77	17,94	19,16
Fev	22,87	21,52	20,44	20,09	22,92	21,7	22,47	23,99
Mar	33,18	33,67	30,43	30,37	35,14	31,67	30,43	32,56
Abr	39,54	39,95	38,59	37,43	40,86	39,36	36,91	40,27
Mai	50,18	51,26	51,44	47,52	51,61	49,01	47,16	48,62
Jun	52,24	52,34	52,57	50,94	53,46	53,02	52,27	54,3
Jul	55,89	55,3	56,8	52,22	56,85	55	51,68	54,56
Ago	46,68	47,85	46,56	45,12	48,42	47,54	43,53	46,89
Set	37,62	36,97	37,26	34,72	39,72	37,39	34,05	37,76
Out	24,47	23,41	21,05	24,01	25,33	24,73	25,15	26,38
Nov	20,55	17,74	19,11	18,55	19,7	20,57	19,07	20,81
Dez	16,11	13,12	14,82	14,56	14,96	16,03	15,34	17,65

Quadro I - Valores de DLI

³ Foi utilizada a ferramenta disponibilizada pela empresa Suntracker Technologies (SunTracker, 2023).

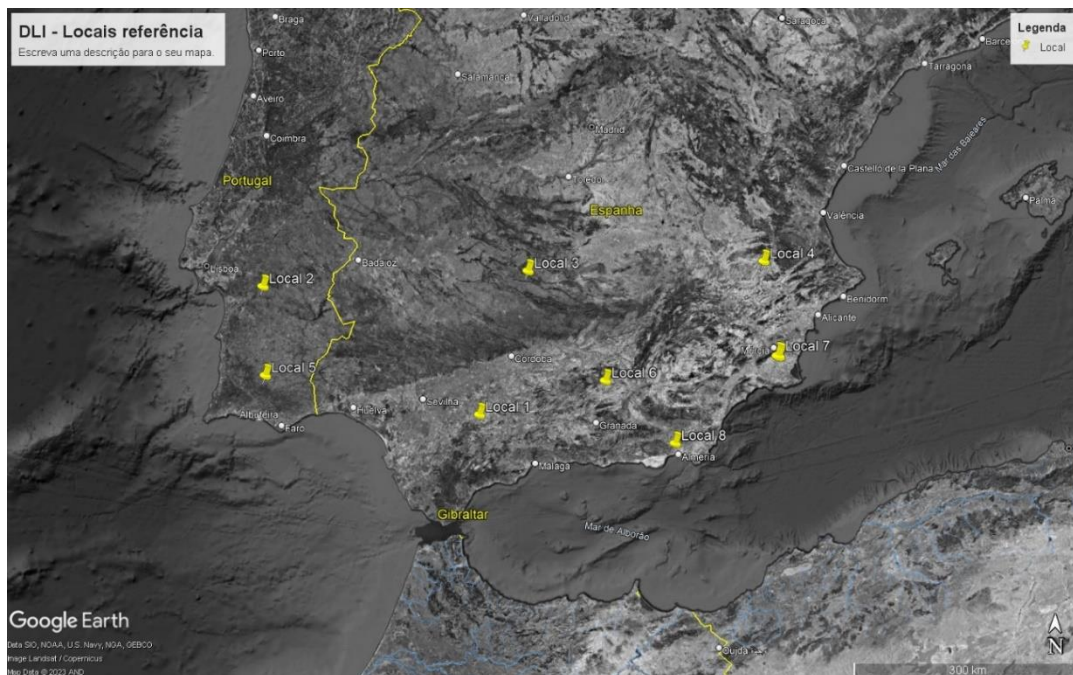


Figura 5 - locais escolhidos para analisar o DLI

Da análise dos dados, representados no gráfico abaixo, podemos constatar que em termos médios, entre março e setembro, todos os locais apresentam valores de DLI superiores a 30. Quer isto dizer que, para se conseguir atingir um DLI adequado, entre outubro e fevereiro, será necessário adicionar luz ao cultivo, mesmo que o número de hora de luz do sol permita garantir o fotoperíodo da floração, por exemplo.

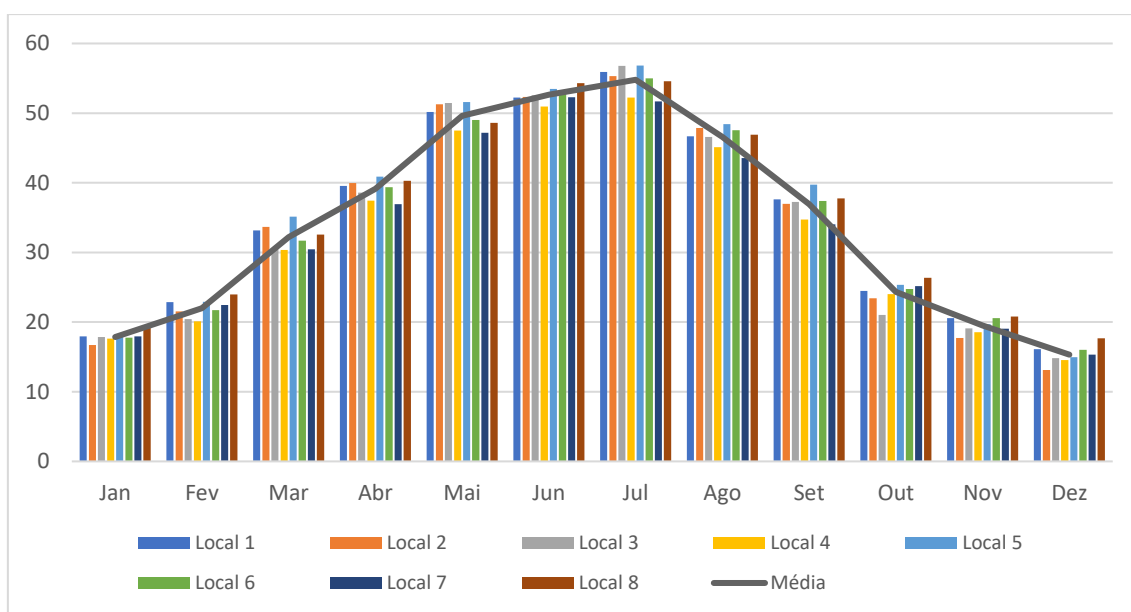


Figura 6 - Gráfico dos Valores de DLI Médios

4.3. Rega e fertilização

O cálculo das necessidades hídricas de qualquer cultura praticada em estufa depende de diversos fatores que, cumulativamente, concorrem para a dificuldade em calcular as reais necessidades de água para cada cultura (Nikolaou, *et al.*, 2019). O tipo de cultivo, a temperatura interior, a radiação solar disponível, a densidade da plantação, conjugada com os sistemas de controlo de humidade instalados, entre outros fatores, são elementos fundamentais para definir corretamente as necessidades de água e o tipo de sistema de rega a instalar (Allen, *et al.*, 1998).

Para o cultivo de canábis para fins medicinais, além destas premissas gerais, será necessário verificar a permanente garantia de qualidade final do produto, claramente influenciado pela humidade e pela qualidade da água utilizada na irrigação da cultura.

4.3.1. Fertirrega: variáveis ao longo do ciclo de produção

As necessidades de água variam ao longo das fases de desenvolvimento vegetativo de qualquer cultura, independentemente da mesma se desenvolver ao ar livre ou em ambiente controlado (Koukounaras, 2021).

A conjugação dos fatores climáticos como temperatura e humidade do ar, a disponibilidade de radiação solar, com o estado de desenvolvimento vegetativo da planta, serão determinantes para a correta definição das quantidades de água a aplicar, definindo uma estratégia de irrigação adequada (Zabeltitz, 2011).

Já a disponibilização de nutrição, ao nível de macro e micronutrientes, deve ser ajustada a cada fase de crescimento da planta, de modo a potenciar os parâmetros desejados em cada etapa do cultivo. Neste processo o substrato de cultivo é crucial para a definição do modelo e da estratégia de rega. As necessidades de adição de nutrição numa cultura realizada em substrato orgânico são substancialmente diferentes das efetuadas em fibra de coco, por exemplo. O conhecimento dos valores de nutrientes existentes no substrato de cultivo são fundamentais para o uso eficiente dos recursos, além de permitir um maior controlo dos valores de condutividade elétrica (Ce) e do potencial de hidrogénio (pH), ao longo de todo o processo de cultivo.

A fertirrega a aplicar à cultura está diretamente dependente das condições e do estado de desenvolvimento da planta, ao nível nutricional, bem como dos dados climáticos

registados no interior da estufa, que permitam em todo o momento gerir o stress hídrico de acordo com o pretendido (Chandra, *et al.*, 2017).

4.3.2. Uso eficiente da água: da qualidade à quantidade

A água utilizada na rega da cultura de canábis para fins medicinais carece de especiais cuidados especiais. Primeiro porque, para que a relação rega vs nutrição seja realmente eficiente, é necessário que os valores de Ce e pH sejam permanentemente controlados, a par dos valores de metais e outros resíduos biológicos presentes na água. Para tal, a utilização de filtragens especiais e osmose inversa para tratamento da água, na cultura de canábis para fins medicinais, é muito frequente. Os parâmetros da água de rega são regulados por legislação específica, que define os valores máximos admissíveis de metais pesados e bactérias presentes antes da adição de fertilizantes.

O controlo do “veículo de nutrição” é muito importante e apresenta-se como um investimento que, a curto prazo, facilmente se torna rentável. Esta será a melhor forma de garantir a precisão da fertilização, baixando o risco de salinização do meio de cultura, o que irá ter um impacto positivo no rendimento da mesma (Yep, *et al.*, 2020).

A quantidade de água necessária para a cultura está diretamente relacionada com a tipologia de cultivo. Se a opção for cultivar em mesas, com plantas de pequeno porte e ciclos de vegetação curtos, será necessária menos água do que se se optar por cultivar plantas grandes e com ciclos longos. Contudo, as opções por estas duas tipologias de cultivo também têm impacto na quantidade anual de produto final. Por outro lado, o tipo de substrato de cultivo também tem muito impacto na quantidade de água necessária, sendo a retenção de água no substrato o fator que mais impacto tem. Tudo isto deverá ser conjugado com os sistemas de controlo de temperatura e humidade, pois os valores de evaporação dependem dos mesmos (Nikolaou, *et al.*, 2019).

4.3.3. Evapotranspiração e necessidades de rega: sistemas autónomos

A evapotranspiração registada no interior da estufa varia ao longo do ciclo de produção, tanto por influência dos fatores do clima exterior, como pela variação de tamanho e necessidades de água da planta ao longo do crescimento. O conhecimento exato da transpiração é muito difícil de obter, uma vez que fatores como a ventilação de circulação aplicada no interior da estufa, a humidade relativa e a temperatura, o diferencial de pressão, o efeito da radiação e da luz, as quantidades de CO₂ disponíveis,

entre outras, têm impacto direto na atividade estomática, o que altera os valores de abertura e perda de água durante o processo de fotossíntese: quanto maiores forem os valores de humidade relativa do ar menor será a capacidade de transpiração da planta ou, no sentido oposto, valores muito baixos irão obrigar ao fecho dos estomas (Zabeltitz, 2011).

As necessidades de rega no interior de uma estufa estão dependentes de vários fatores conjugados. As variáveis temperatura e humidade relativa são duas das grandezas que mais afetam as necessidades de água, contudo, numa ótica de maximização de produção em estufa, teremos que verificar também os valores do Défice de Pressão de Vapor (DPV).

O valor do DPV não depende apenas da aplicação de rega e da água disponível no meio de cultivo. Podemos ajustar o DPV através da alteração da temperatura e da humidade. Esta capacidade é especialmente importante quando queremos manter os níveis hídricos na cultura, de acordo com a fase de crescimento e desenvolvimento e potenciar todos os fatores produtivos (Villarreal-Guerrero, Pinedo-Alvarez, *et al.*, 2020).

Assim, as necessidades de rega da cultura serão determinadas pela atividade estomática da cultura e pela ação de sistemas autónomos de controlo de condições interiores: fertirrega, ventilação, humidade, radiação e temperatura; o que permite otimizar o consumo de água.

4.4. Eficiência energética

O uso eficiente da energia é um dos maiores desafios do século XXI. A sustentabilidade de qualquer sistema produtivo depende, cada vez mais, da sua proficiência no uso da energia. Pese embora as estufas sejam unidades de aproveitamento da energia do sol, a sua operação necessita muito mais que energia solar para funcionar corretamente. Uma estufa de baixa tecnologia, com uma área entre 8000 e 12000 m² necessita de 145 kWh de energia elétrica para funcionar (Ponce, *et al.*, 2015). Quando falamos de estufas de alta tecnologia, com sistemas de ventilação forçada, humidificação de alta pressão, desumidificação e iluminação artificial, esses valores podem ser 10 vezes superiores.

4.4.1. Dimensionamento da estufa e necessidades energéticas

A fase de projeto e desenho funcional de uma estufa é fulcral para o sucesso da sua implementação e construção. A definição dos sistemas de ventilação, da estrutura, do material de cobertura, entre outros aspetos relevantes, bem como a localização, irá permitir calcular a eficiência energética da estufa (Costantino, *et al.*, 2021).

A localização da estufa, conjugada com a escolha do material de cobertura, serão os elementos mais importantes na definição das necessidades de energia. Por absurdo, podemos tentar imaginar o que sucede às necessidades de ventilação e humidificação se instalarmos uma estufa de vidro em Sevilha!

As componentes de aquecimento e arrefecimento estão diretamente relacionadas com outro fator: o volume total a climatizar. Dependendo da técnica de cultivo utilizada, em mesas ou no solo, será necessário alterar, entre outros elementos, a altura livre da estrutura. Cada 10 cm de altura numa estufa com 1 ha de superfície representam 1000 m³ de volume (0,1 m (altura) x 10000 m (área) = 1000 m³). Será que esses 10 cm devem ou não ser construídos? O mesmo sucede em relação ao cálculo da ventilação natural e da ventilação forçada a instalar: o aproveitamento do vento dominante pode ajudar a baixar a temperatura sem necessidade de instalar ou utilizar sistemas de extração forçada.

Ponce apresenta um esquema simples onde identifica alguns dos aspetos com impacto no balanço de energia de uma estufa (figura 7) (Ponce, *et al.*, 2015).

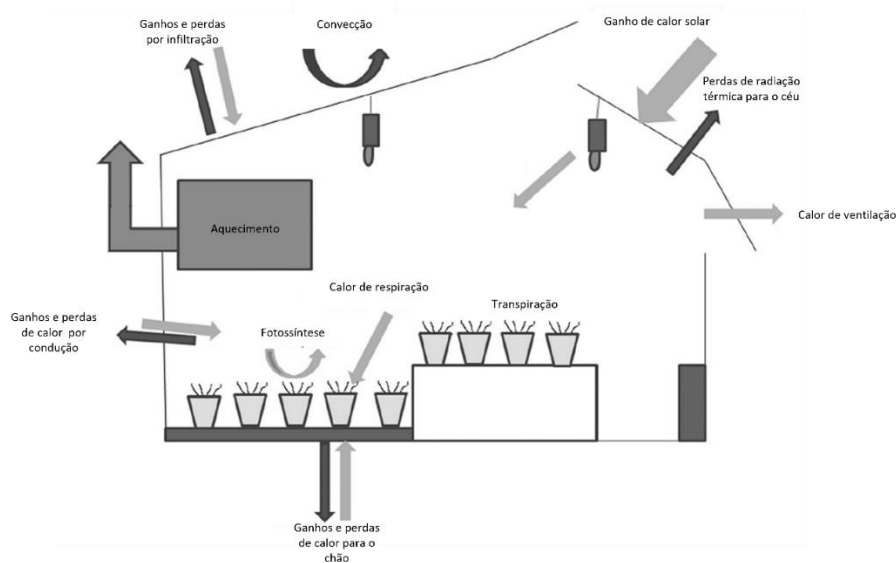


Figura 7 - Trocas de calor numa estufa

Numa estufa de alta tecnologia poderemos incluir alguns elementos que podem mitigar parte dos ganhos de temperatura. A instalação de telas de sombra, com graus de opacidade adequados à cultura e à radiação solar, bem como a utilização de sistemas de humidificação por alta pressão, contribuem significativamente para o equilíbrio térmico de uma estufa.

Claro que, do ponto de vista do consumo de energia elétrica, quantos mais equipamentos instalarmos maior será o consumo.

4.4.2. Aproveitamento de energia para vários usos

Um dos maiores desafios ao nível da engenharia é conseguir utilizar a mesma energia para mais que um fim. No caso das estufas de alta tecnologia, onde se pretende que o investimento da construção se torne num rendimento no menor espaço de tempo, esta premissa ocupa um lugar importante.

Um sistema de aquecimento instalado numa estufa, independentemente do combustível que utiliza, contribui para dois aspetos fundamentais no crescimento e desenvolvimento da cultura: mantém a temperatura nos níveis ideais para o crescimento e desenvolvimento, ao mesmo tempo que “ajuda” o sistema de desumidificação, uma vez que, como já foi referido, os valores da temperatura e da humidade são simétricos para pressões atmosféricas iguais. O mesmo sucede com os sistemas de humidificação. Além de contribuírem para a redução da temperatura, adequam o DPV à cultura e favorecem o crescimento. A conjugação de tecnologias é fundamental, pois o rendimento de muitos sistemas está diretamente relacionado com a sua integração com outros complementares. Por exemplo, se instalarmos um desumidificador com excelente capacidade mas não existir ventilação de circulação adequada, o rendimento do mesmo pode ser muito reduzido e tornar-se ineficaz.

4.4.3. A pegada ecológica

O consumo de energia elétrica associada à produção de canábis pode ser enorme, especialmente em instalações de cultivo *indoor*. Em 2012, por exemplo, eram emitidos 4600 kg de CO₂ por cada quilograma de flor seca produzida (Mills, 2012). Contudo, graças à evolução tecnológica, especialmente ao nível da iluminação e dos sistemas de ar condicionado e ventilação, este valor reduziu-se substancialmente.

A produção de canábis para fins medicinais em estufa, embora tenha um consumo energético bastante menor do que na modalidade *indoor*, representa um importante custo operacional. Além dos custos financeiros elevados, a pegada de carbono está muito longe de ser neutra (Mills & Zeramby, 2022).

O funcionamento dos sistemas de aquecimento e arrefecimento, ventilação, humidificação e desumidificação, iluminação e controlo de radiação, carecem de enormes quantidades de energia (Mehboob, *et al.*, 2020). A otimização de todos os sistemas, juntamente com a utilização de energias verdes, será a chave para a redução de consumos energéticos e a maximização da eficiência do processo produtivo.

Para minimizar o impacto ecológico da produção de canábis em estufa terão que ser implementadas medidas compensatórias, baixando custos de produção, tanto a nível monetário como de CO₂ emitido.

5. Implementação e controlo: Contributos para um modelo

Depois de identificados os principais componentes necessários à construção de uma estufa para cultivo de canábis para fins medicinais, apresentam-se neste capítulo as características propostas para a sua construção, salvaguardada a informação confidencial.

Assim, ao longo do presente capítulo, iremos definir os componentes básicos da construção de uma estufa de alta tecnologia, destinada a produzir uma cultura classificada como substância controlada, que carece de especiais cuidados no seu manuseio e controlo.

5.1. Estrutura e dimensões

O cálculo das dimensões úteis de uma estufa destinada a cultivar canábis para fins medicinais está intimamente relacionada com a capacidade de processar o produto final. Tratando-se de uma cultura cujo produto final é flor fresca⁴, importa estabelecer os requisitos técnicos para a sua obtenção.

Atendendo às condições climáticas registadas no local onde foi instalada a estufa, nomeadamente à velocidade e direção predominante do vento, bem como à exposição solar, optou-se por uma estrutura tipo multitúnel em capela, de acordo com o exemplo da figura 8 (Ponce, *et al.*, 2015). A classe de construção escolhida foi a B (são estufas cujo sistema de cobertura e revestimento permitem as oscilações da estrutura), de acordo com a norma EN 13031-1 (Maraveas, 2020).

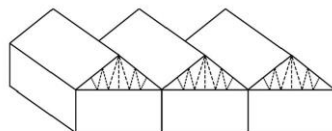


Figura 8 - Tipologia de estufa instalada

⁴ A apresentação da planta de canábis, como ingrediente ativo para o fabrico de medicamentos, é flor seca, contudo, o resultado intermédio ao nível do cultivo é flor fresca, pronta para ser processada. As definições e requisitos da fase de secagem e embalagem não são alvo de análise no presente projeto, sendo apenas necessário referir o seu impacto em algumas questões da fase de cultivo.

O cálculo da dimensão dos arcos interiores foi efetuado tendo em conta o tamanho dos lotes que se queriam plantar em cada sala de cultivo. Assim, a opção por vãos de 12,8 metros foi a mais adequada ao projeto.

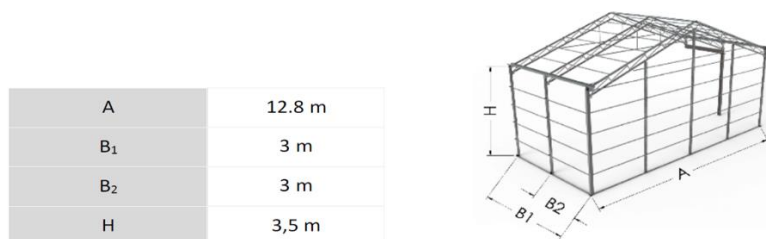


Figura 9 - Dimensões da estrutura construída

A escolha desta tipologia de estrutura permite a implementação de sistemas de ventilação natural mais eficiente, nomeadamente através da instalação de janelas laterais e no telhado, que permitem um melhor fluxo de ar no interior da estufa, ao mesmo tempo que contribui para a manutenção do diferencial de pressão provocado pela utilização de sistemas de extração forçada. Na figura 10 podemos observar a simulação efetuada por Ponce para este tipo de estufas, onde é possível verificar a ação do vento e dos fluxos de ar numa estufa desta natureza (Ponce, *et al.*, 2015).

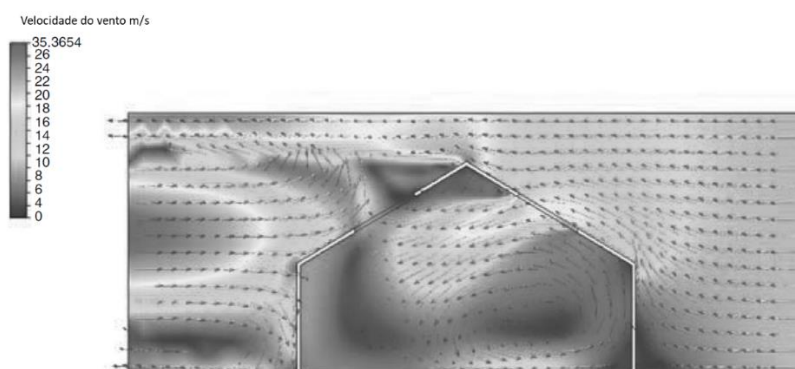


Figura 10 - Comportamento da estufa em relação ao vento e fluxos de ar

Para melhorar a circulação de ar lateral foram instaladas janelas verticais e sistemas de exaustão e circulação de ar interior.

A estufa executada durante o projeto tem um volume total de aproximadamente 45.000 m³. Atendendo às necessidades de renovar o ar interior da estufa, de modo a promover o arejamento e a exaustão de ar quente, foram instalados 45 ventiladores (figura 11),

com capacidade de extração de 34.000 m³/h cada um, possibilitando uma média de 32 renovações do ar da estufa por hora.



Figura 11 - Ventilador de extração

Os fluxos de ar interior foram garantidos com a instalação de 60 ventiladores de circulação interior, com capacidade de moverem mais de 420.000 m³/h de ar interior.

A estrutura é construída em aço galvanizado e tem capacidade de suporte para todos os equipamentos necessários ao funcionamento da estufa. Este é um fator muito importante pois, a estrutura, além de, segundo o fabricante, garantir a resistência ao vento até aos 115 km/h e a cargas de neve de 30 kg/m², deverá permitir instalar, entre outros, sistemas de sombra, desumidificação e iluminação artificial.

Quanto às dimensões das salas de cultivo, apenas referimos que a relação entre as áreas das salas de vegetação e as de floração é de 1 para 2 (os dados das salas são confidenciais e não podem ser apresentados no presente trabalho), sendo a sala de plantas-mãe dimensionada de forma a permitir o abastecimento de clones e a manutenção de plantas-mãe suficientes para o processo produtivo desejado.

O dimensionamento da estrutura e das áreas da estufa é um exercício que carece de muito detalhe e cuidado. Primeiro porque tem que permitir que as operações se desenvolvam de modo a garantir a qualidade do produto final, nomeadamente ao nível do desenho funcional de fluxos de pessoas e materiais, reduzindo ao máximo o risco de contaminação e entrada e proliferação de pragas e doenças. Segundo porque, ao nível de custos de instalação e funcionamento, devem ser avaliados todos os parâmetros de construção e consumo de energia onde, como já foi referido, cada 10 cm de altura representam mais de 2% de energia consumida e material de estrutura e cobertura instalado, para uma estufa de 10.000 m².

5.2. Climatização

Um dos desafios do presente projeto foi o desenho do sistema de climatização da estufa. A grande amplitude térmica sentida na região obriga à instalação de sistemas de aquecimento e de arrefecimento verdadeiramente potentes.

Para garantir o arrefecimento, a estufa está equipada com sistemas de exaustão de ar (forçado e natural), complementados por um sistema nebulização por alta pressão com capacidade para libertar 2000 l h⁻¹ de água (figura 12). Esta massa de água, aplicada sempre que a temperatura de trabalho da estufa ultrapassa os valores determinados para cada fase do cultivo, irá aumentar a humidade relativa no ar, fazendo a temperatura descer. Os ciclos de nebulização são intercalados com a pausa da ventilação de extração, para reduzir o desperdício de água, sendo a homogeneização do ar húmido feita através do sistema de circulação de ar interior.



Figura 12 - Sistema de nebulização por alta pressão

A temperatura pode ainda ser controlada através da utilização das telas de sombra. Estas telas, instaladas em toda a estufa, garantem um corte de radiação solar de 50%, servindo como rede sombra e, quando utilizadas com o tempo frio, servem para reduzir o volume útil das salas de cultivo, para um total de 34.000 m³, maximizando a eficácia dos sistemas de aquecimento e de desumidificação (entre os meses de outubro e março).

Para garantir uma temperatura interior entre os 12 e os 32° C durante os meses de outono e inverno, a estufa necessita de aquecimento, especialmente durante a noite e nos dias nublados. Para tal, foram instalados 9 geradores de ar quente (figura 13), cujo combustível é caroço de azeitona e com uma capacidade de 157 kW/h cada um. Estes geradores recolhem ar de dentro da estufa, aquecem-no e voltam a injetar esse ar novamente. Esta operação permite, além de aquecer o ar interior da estufa, desinfetar esse mesmo ar, pois a temperatura no interior da caldeira de aquecimento atinge os

120° C. O fluxo de ar destas máquinas permite que todo o ar da zona de cultivo seja renovado 3,2 vezes por hora, num total de 108.000 m³/h. A distribuição do ar quente é assegurada pelos ventiladores de circulação interior.



Figura 13 - Gerador de ar quente

Para controlar a humidade nas salas de cultivo, foram instalados 22 desumidificadores, com uma capacidade total de 7.370 l/dia de funcionamento. Esta capacidade de extração é equivalente a 200 gramas de água por cada metro cúbico de ar interior, por dia.

A conjugação do sistema de aquecimento de ar, com os ventiladores de circulação interior e os desumidificadores, permite uma maior eficácia da capacidade de desumidificação, além de um balanço de humidade relativa vs temperatura adequado às fases do cultivo, garantindo dessa forma que, mesmo no inverno, com valores exteriores de humidade relativa bastante altas, no interior da estufa se consigam garantir o DPV adequados à cultura.

5.3. Luz e radiação

Como referido, o aproveitamento da luz solar é uma das maiores vantagens das estufas face ao cultivo *indoor*. Mas esta vantagem não é absoluta, pois o excesso de radiação pode ser um problema no desenvolvimento de uma planta que não é autóctone.

O material de cobertura desempenha um papel fundamental na definição da metodologia de controlo de radiação solar. Importa referir que a escolha deve recair sobre um material que permita uma boa transmissão da luz, uma vez que nos meses de

inverno será necessário aproveitar toda a energia que o Sol nos fornece gratuitamente, com uma maior vida útil possível.

O material que oferece a melhor relação entre a durabilidade, transmissão luminosa e transmissão térmica é o policarbonato (Bartok, 2001). Com uma duração que varia entre os 10 e os 15 anos e uma transmissão luminosa de 90%, foi essa a escolha para o projeto desenvolvido.

A camada interior que permite controlar a radiação solar e, conseqüentemente a luz natural disponível para as plantas, é garantida por telas de abertura e fecho automático, com 49% de sombreamento, que permitem uma economia de energia de aproximadamente 45%. Estas telas ajustam-se de acordo com a radiação solar incidente e com a temperatura do ar interior, servindo para acumular ou reduzir a temperatura interior, dependendo da estação do ano.

Para o controlo do fotoperíodo nas zonas de floração foi necessário instalar telas de escurecimento, com uma percentagem de sombreamento de 98%. Esta tela também desempenha um duplo papel, pois, ao estar instalada por debaixo da tela de sombra, permite baixar ainda mais o pé direito útil, o que se traduz numa maior capacidade de climatizar as salas de floração.

Na figura 14 apresentamos uma imagem onde as duas telas se encontram na posição de aberto.



Figura 14 - Telas de sombra recolhidas (branca - 49% e preta 98% de sombra)

Ao nível da iluminação artificial, fundamental para a cultura de canábis para fins medicinais, foram instalados dois tipos: luz de crescimento vegetativo, instalada nas salas de vegetação e de plantas-mãe; e luz de floração, nas salas onde se desenvolve a última fase do cultivo.

De toda a tecnologia instalada numa estufa desta natureza, a iluminação é mais dispendiosa, tanto no valor de investimento inicial de aquisição e instalação, como no seu funcionamento, pois consome uma importante parte de toda a energia elétrica utilizada numa estufa.

A solução de iluminação instalada, com recurso a tecnologia LED (*Light Emitting Diode*) foi desenhada e projetada no âmbito deste trabalho, tendo sido fabricada especificamente para este projeto. O objetivo foi garantir que a quantidade de luz artificial, nas várias fases do cultivo, era um suplemento à luz naturalmente disponível, de modo a garantir os níveis de DLI e o PPFD para cada fase de crescimento da planta. Nesta definição foram analisados os valores de radiação solar disponível, a orientação da estufa, as zonas de sombra e os espectros luminosos mais adequados a cada fase de crescimento (Bilodeau, *et al.* 2019).

Nota: As especificações da iluminação não podem ser apresentadas, pois constituem segredo industrial e são objeto de confidencialidade.

5.4. Fertirrega e aproveitamento da água

Garantir o uso eficiente da água, a par da sua quantidade e qualidade, é uns dos desafios mais importantes para qualquer atividade agrícola, independentemente do meio em que esta se desenvolva. As questões do preço e da disponibilidade da água e fertilizantes deve ser cuidadosamente geridas, ao mesmo tempo que as necessidades hídricas e nutricionais sejam devidamente supridas.

Da análise de risco do projeto, resultou uma evidência muito importante: os sistemas de tratamento de água e de fertirrega deveriam ser duplicados, cada um com capacidade para, em caso de avaria ou fase de manutenção, garantir o fornecimento de água e nutrientes a todas as plantas. Esta decisão tem um impacto significativo no valor do sistema de rega a instalar contudo, o impacto de uma eventual falta de água poderia ser

catastrófico e comprometer toda a cultura. A capacidade de produção de água tratada por osmose inversa tem que ser suficiente para alimentar os sistemas de fertirrega e de humidificação por alta pressão.

No cálculo da capacidade do sistema de fertirrega (figura 15 (Novagric, 2022)) foram incluídas as variáveis mais importantes para determinar os caudais necessários, nomeadamente o volume e tipo de substrato de cultivo (o sistema está apto a ser utilizado com substrato orgânico de cultivo ou fibra de coco), e o tipo, quantidade e débito dos gotejadores utilizados na rega.



Figura 15 - Tipo de sistema de fertirrega instalado

Ao nível da adaptabilidade do sistema ao projeto em concreto, de modo a que a gestão da fertirrega fosse ajustada ao processo produtivo, foram definidos os setores de rega, um para cada sala de cultivo, bem como a quantidade de depósitos de solução nutritiva ligados ao sistema (8 depósitos para nutrição e um depósito para solução ácida).

No final, foram integrados outros dados de cada sala, tais como volume de ar, quantidade máxima de plantas, capacidade de humidificação e desumidificação, de modo a garantir que a quantidade de água adicionada na rega é a necessária para as necessidades da cultura em todos os momentos. A determinação das necessidades é feita com base na monitorização constante dos valores de temperatura, humidade relativa e DPV de cada sala, conjugada com o conhecimento do estado de desenvolvimento vegetativo do lote instalado na mesma.

Os valores de pH e Ce são medidos de forma permanente, tanto na fase de tratamento de água como na de injeção no sistema de fertirrega. Desta forma é possível garantir que os valores de pH e Ce da solução nutritiva ou água aplicadas na rega, quando chegam ao substrato, não adulteram o equilíbrio do meio de cultivo, maximizando o rendimento global das plantas. Em complemento ao sistema de fertirrega, são efetuadas medidas de pH, Ce, humidade e temperatura do substrato, permitindo efetuar eventuais correções de forma atempada, para cada variedade de planta cultivada.

A tecnologia instalada no projeto permite um uso mais eficiente da água e da nutrição, na medida em que o cálculo de necessidades é efetuado utilizando todas as variáveis registadas em cada sala de cultivo (Villarreal-Guerrero, Pinedo-Alvarez *et al.*, 2020), sendo possível ajustar os valores de água adicionada na rega ou na gestão da humidade relativa no ar, de acordo com necessidades reais da cultura.

O excedente da água da rega, seja por aplicação de regas de lavagem ou por outros motivos, é recolhido através de um sistema de drenagem e conduzido para depósitos dedicados exclusivamente ao armazenamento deste tipo de águas. Tratando-se de uma solução com elevada concentração de nutrientes, a mesma é utilizada na hidratação do sistema de compostagem de resíduos orgânicos, instalado na exploração.

A fertirrega e o uso eficiente da água têm que ser calculados numa lógica holística, pois as necessidades da cultura variam com outros fatores que, se não forem considerados, podem afetar drasticamente o desempenho global do sistema produtivo, tendo um grande impacto no rendimento global da cultura e, conseqüentemente, no desempenho da operação.

5.5. Tecnologias de controlo

A escolha da tecnologia operacional tem que ser apoiada por capacidades de controlo e monitorização adequadas e ajustadas aos fins a que se destinam. No caso das estufas para cultivo de canábis apresentadas, a vertente de controlo assume um papel primordial na sua eficácia. O diagrama desenvolvido por Ponce, apresentado na figura 16, esquematiza os princípios base da interligação entre sensores, variáveis e áreas a controlar (Ponce, *et al.*, 2015).

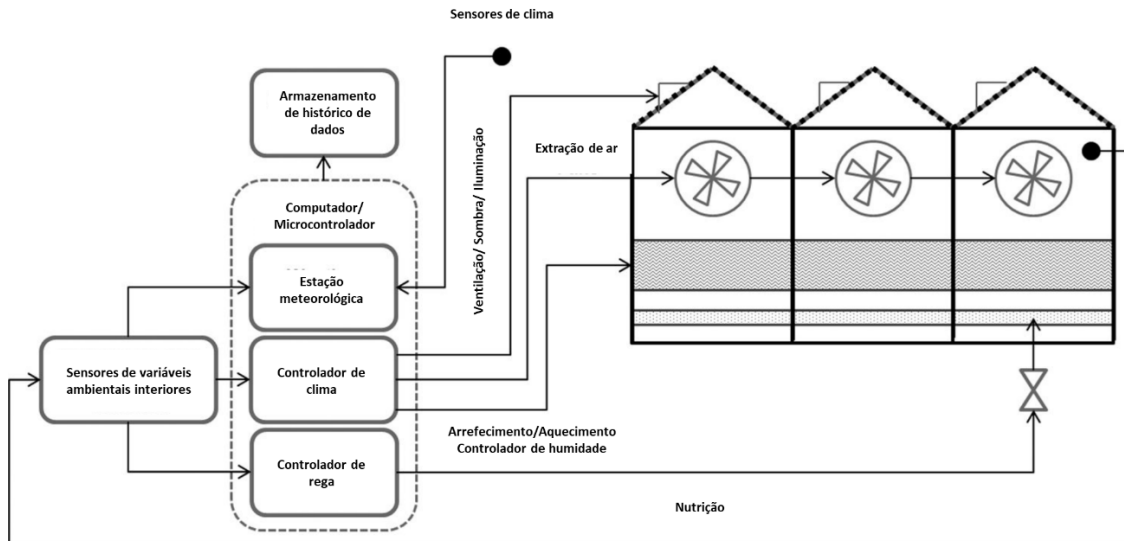


Figura 16 - Diagrama de controlo de uma estufa de alta tecnologia - adaptado.

Para se garantir um controlo eficaz de todas as variáveis que afetam o desempenho da estufa é necessário, entre outras coisas, uma infraestrutura de comunicações enorme, alimentada eletricamente por uma potência adequada ao pleno funcionamento da instalação. Todos os sensores têm que ser ligados por cabo, uma vez que a precisão pretendida na recolha e processamento de dados não se coaduna com falhas de comunicação ou ligação.

Este é um dos principais aspetos em que uma estufa de alta tecnologia se diferencia das suas irmãs mais simples. Para ligar todos os sensores, alimentar com corrente elétrica todos os automatismos e sistemas de atuação nas diversas componentes da estufa, são necessários milhares de metros de cabo elétrico e de comunicação.

No projeto implementado, para uma área de aproximadamente 10.000 m², foram instalados milhares de metros de cabo elétrico e de comunicações, responsáveis por alimentar mais de 150 motores elétricos, 1750 LED e ligar mais de 60 sensores de temperatura, de humidade, de radiação solar, de velocidade do vento, de precipitação e de CO₂.

O comando e controlo dos motores e atuadores, bem como de outros sistemas de gestão da estufa e da fertirrega, que determinam o arranque ou paragem dos diversos sistemas, é gerido por um supercontrolador ligado a um computador.

As ligações lógicas entre sistemas garantem uma operacionalidade cujas dependências garantem a eficiência do sistema. Por exemplo, não faz sentido que o sistema acione a

humidificação se os valores de humidade relativa, conjugados com DPV, estiverem dentro dos limites definidos para o funcionamento.

Esta programação lógica é desenvolvida num software específico, onde são definidas todas as variáveis, precedências, tempos de atuação, espera ou alarme, para cada um dos sistemas responsáveis pelo controlo da estufa.

Esta interação permanente, onde os dados lidos pelos sensores são processados e, dependendo dos valores, originam uma determinada ação, constituem uma importante fonte de informação. Com estes dados, onde são integradas as variáveis climáticas registadas no interior e no exterior da estufa, com o seu impacto na cultura, é possível gerar modelos de análise de dados que ajudem a prever comportamentos no futuro.

No projeto implementado, está a ser desenvolvido um modelo de recolha e análise de dados que permita, a curto prazo, estabelecer modelos de apoio à tomada de decisão, ao mesmo tempo que auxilia na definição de custos associados a cada fase de cultivo e a sua máxima rentabilização.

Esta situação só é possível porque o modelo de dados desenhado para o funcionamento da estufa foi definido com uma abrangência mais alargada. Por exemplo, os valores da radiação solar disponível, medidos em Wh m^{-2} , podem servir para calcular as necessidades de aumento ou diminuição de temperatura no interior da estufa. O histórico desses dados, ao fim de algum tempo de análise, permite definir mapa de previsão de necessidades, podendo ser aplicados tanto ao nível da logística, por exemplo, no momento de contratar o fornecimento de energia, como para a vertente manutenção, onde esses dados podem auxiliar no cálculo do ciclo de vida de determinado equipamento.

O desenvolvimento do sistema de comando e controlo da estufa baseou-se numa recolha de dados, provenientes de sensores ou fontes humanas, cuja integração e exploração permita responder a diversas questões, tanto de cariz agronómico, como de controlo de qualidade, de gestão de manutenção, logística ou mesmo recursos humanos.

Numa atividade onde os custos de operação são significativamente elevados, é fundamental realizar uma correta e ajustada gestão de todos os meios e aproveitar toda a informação disponível, em prol da melhoria contínua e garantia de qualidade.

5.6. Eficiência energética

A otimização do consumo de energia, através da utilização de diversos sistemas e técnicas, traduz-se em eficiência energética. Como já foi referido anteriormente, o consumo de energia associado à produção de canábis para fins medicinais é bastante significativo. Para se conseguir uma eficiência geral do funcionamento de uma estufa, sem prejudicar o seu desempenho operacional, carece de uma integração de diversas áreas da engenharia.

Desde logo, a vertente agronómica parece ser a que mais se destaca nesta equação. O conhecimento da cultura, das suas necessidades e do seu ciclo de vida, é fundamental para definir a estratégia de cultivo. Tratando-se de um cultivo realizado num ambiente onde é possível ajustar e simular a grande maioria dos fatores produtivos, a sua máxima rentabilidade ocorrerá de uma forma mais simples.

Para tal, a engenharia de detalhe do projeto deve incorporar as componentes de engenharia civil, crucial para o desenho e implementação da parte estrutural da estufa, conjugada com a engenharia eletrotécnica e eletrónica, fundamental para a definição dos sistemas de potencia e de comando e controlo, a par da termodinâmica e hidráulica, responsável por definir os parâmetros de clima, pressões e valores dimensionamento de sistemas de simulação e ajuste climático.

Só com esta sinergia é que será possível desenhar e implementar um projeto que, simultaneamente, garanta as condições ótimas de desenvolvimento e crescimento da cultura, ao mesmo tempo que rentabiliza a utilização de energia para os diversos sistemas.

No caso do projeto implementado, verificou-se que o desenho e definições da estrutura, do controlo climático, da utilização da luz, da fertirrega e do comando e controlo, foram efetuados de forma integrada, com observação e rentabilização de todas as disciplinas, de modo a tornar a estufa mais eficiente.

Por exemplo, a definição da potência elétrica dos LED de iluminação suplementar, conjugada com o PPFd disponibilizado pela mesma é, quiçá, o elemento mais importante na vertente de eficiência energética. O desconhecimento das necessidades reais da planta, assim como dos dados climáticos do local onde se vai instalar a estufa, associados a uma escolha errada do material de cobertura, por exemplo, podem ditar o insucesso

na hora de instalar o sistema. Existem casos em que a potencia instalada é 3 vezes superior às necessidades da cultura, obrigado a enormes investimentos em infraestruturas elétricas, de média e baixa tensão, bem como de sistemas de arrefecimento para controlar a temperatura dentro das salas de cultivo.

Além da componente da engenharia do projeto, fundamental para a sustentabilidade do mesmo, a estufa construída funciona com fontes de energia limpas e que promovem a redução da pegada de carbono. Os geradores de ar quente que funcionam com caroço de azeitona são um dos exemplos, a par da instalação de uma estação fotovoltaica de produção e energia elétrica, com aproximadamente 1 MW de potencia instalada, que permite o funcionamento integral da estufa e injetar o remanescente de energia produzida na rede de distribuição.

A garantia de eficiência energética em toda a fase de projeto e operação de uma estufa, tem que ser permanente, pois os custos de operação serão muito mais reduzidos, ao mesmo tempo que se reduz a pegada de carbono e se contribui para um ambiente mais saudável.

5.7. Custos de instalação e exploração

Uma estufa para cultivo de canábis para fins medicinais, dependendo da tecnologia instalada, pode ter custos⁵ de construção entre os 300 €/m², sem iluminação, e chegar facilmente aos 650 €/m², com a instalação de luz artificial.

A grande vantagem da utilização de tecnologia de controlo de fotoperíodo é a possibilidade de realizar cerca de 3,5 ciclos de cultivo anuais. Caso contrário, apenas será possível realizar uma plantação anual, iniciando-se a plantação em março e a colheita em setembro, aproximadamente.

O investimento inicial, para uma exploração que pretende maximizar a sua produção, rapidamente se transforma em retorno. Uma estufa com 10.000 m², equipada com tecnologia de controlo de fotoperíodo, pode produzir entre 2 e 4 toneladas de flor seca por ano, ao invés de um máximo de 1 tonelada, num único ciclo. Se o preço de mercado

⁵ Os custos referidos são meramente indicativos e têm por base os valores de mercado, obtidos em 5 orçamentos, referentes a janeiro de 2022, mês em que a estufa construída no presente projeto foi adjudicada.

da flor seca, processada e embalada, for de 2 €/gr, teríamos os seguintes resultados de investimento/vendas (os dados financeiros referem-se apenas ao investimento e às vendas da totalidade da produção, sendo meramente ilustrativos e sem refletir os custos operacionais, nem de aquisições de terrenos e outras infraestruturas):

Estufa simples, sem controlo de fotoperíodo:

- Preço de construção: 3.000.000€
- Produção: 1.000.000 gramas
- Vendas/ ano: 2.000.000€.
- Diferença 1º ano (vendas vs investimento)= -1.000.000€
- Diferença 2º ano (vendas vs 1º ano)= 1.000.000€

Estufa com controlo de fotoperíodo:

- Preço de construção: 6.500.000€
- Produção: 3.000.000 gramas
- Vendas/ano: 6.000.000€
- Diferença 1º ano (vendas vs investimento)= 6.000.000-6.500.000 = -500.000€
- Diferença 2º ano (vendas vs 1º ano)= 5.500.000€.

Pese embora os dados anteriores sejam apenas um exemplo académico, podem ser indicadores de um período de retorno bastante reduzido, além de espelharem outro aspeto fundamental, a continuidade da operação ao longo do ano. Este fator é muito importante, pois, atendendo às especificidades da própria cultura, às necessidades de especialização da mão de obra e à permanente garantia de qualidade e consistência do produto final, não se afigura desejável que as operações se desenvolvam apenas numa fase do ano.

A otimização dos custos de exploração é garantida com a aplicação da tecnologia adequada e mais eficiente. Quanto menores forem as pausas operacionais, devido a avarias ou outros problemas, e menores forem as perdas por falta de qualidade, mais eficaz e rentável será todo o processo!

A estimativa de custos de anteriormente apresentada refere-se apenas à construção. Para garantir o funcionamento anual de uma estufa, com uma produção estimada de 3 toneladas/ano de flor seca, para um período de amortização do investimento inicial de

10 anos, são necessários recursos financeiros consideráveis. No quadro seguinte apresentamos um resumo dividido pelas principais rúbricas de despesa, sem contar com os valores de aquisição de terrenos e outras infraestruturas necessárias à atividade de cultivo de canábis para fins medicinais (nomeadamente de instalações elétricas, de sistemas de segurança, de produção ou aproveitamento de energia).

Custos com pessoal	1 100 000,00 €
Energia	300 000,00 €
Segurança das instalações	250 000,00 €
Custos associados ao cultivo	400 000,00 €
Custos gerais de funcionamento	200 000,00 €
Amortização do investimento inicial	650 000,00 €
Total	2 900 000,00 €

Quadro 2 - Estimativa de custos operacionais por ano de funcionamento

Os custos operacionais estão diretamente relacionados com os fluxos e modelos de trabalho implementados em cada estufa, não sendo objeto do presente trabalho descrever os mesmos e ajustar o funcionamento à rentabilidade global da atividade.

O cultivo e processamento de canábis para fins medicinais necessita de mão de obra muito especializada em diversas áreas, além de cargos específicos exigidos por imposição legal. Por exemplo, os responsáveis pela direção técnica e pela segurança de uma instalação desta natureza têm que ter formação específica e ser reconhecidos pelas autoridades administrativas responsáveis pelo licenciamento da atividade. O garante da sustentabilidade do negócio é a manutenção de níveis de qualidade global muito elevados, que permitam assegurar a venda de toda a produção, fundamental para o sucesso num mercado altamente exigente. Grande parte do segredo para o sucesso depende das pessoas que constituem as empresas, não sendo apenas uma questão de capacidade financeira para assegurar o investimento inicial.

Em suma, a experiência acumulada por diversas empresas do sector permite afirmar que se o investimento inicial for encarado como uma forma de criar uma atividade sustentável, ao invés de ser tido como uma despesa, maior serão as possibilidades de proliferar e garantir um retorno adequado.

6. Considerações finais

O presente relatório de projeto foi desenvolvido num ambiente muito peculiar. A possibilidade de participação em todas as fases de desenvolvimento do projeto, proporcionou-nos a oportunidade de participar em todas as fases do mesmo, desde a conceção teórica, passando pela definição e escolha de materiais e tecnologia, culminando na sua implementação efetiva e gestão global. Esta experiência prática, juntamente com o estudo e pesquisa teórica da literatura técnica sobre os diversos temas, conjugada com visitas a instalações de cultivo em Portugal e em Israel, permitiram desenvolver um espírito crítico, orientado para a resolução de problemas reais que surgiram durante a execução dos trabalhos de construção.

O projeto de uma estufa para produção de canábis para fins medicinais é muito mais complexo do que os pontos apresentados no presente relatório. A escolha dos temas abordados foi definida com base nos temas que apresentam maior impacto na qualidade do produto final e na eficiência global do processo de cultivo.

A definição de um modelo de estufa que permita uma maior eficiência na atividade de cultivo de canábis para fins medicinais, apenas estará completa quando forem adicionados outros elementos, como são exemplo os meios de proteção contra pragas e doenças, os sistemas de segurança e a gestão dos resíduos da atividade. Futuros trabalhos sobre estes temas serão fundamentais para a definição de um modelo ainda mais adequado para uma atividade cujo fim último é a produção de uma substâncias controladas, utilizadas para fins medicinais.

Durante a execução dos trabalhos de construção surgiram alguns contratemplos e limitações, com impacto nos tempos e valores financeiros necessários. O facto do projeto ter sido implementado durante uma pandemia, seguido de um cenário económico e financeiro amplamente afetado pela guerra e instabilidade dos mercados, obrigou a uma maior acuidade em todas as ações relacionadas com o mesmo. O permanente balanço entre o preço da tecnologia e o seu impacto real na atividade foi essencial em todo o projeto. Dessa tentativa de manter o equilíbrio nasceram algumas ideias que, ao serem materializadas, permitiram uma maior eficácia em todo o projeto.

7. Bibliografia

Bibliografia

- AEMET, L. A. (2023). *Servicios Climáticos*. Obtido de Datos Climáticos.
- Agritecture. (02 de 03 de 2023). *Agritecture's DLI Calculator*. Obtido de Agritecture: <https://www.agritecture.com/dli-calculator>
- Ahmed, H. A., Yu-xin, T., Qi-chang, Y., Al-Faraj, A., & Abdel-Ghany, A. (2019). Spatial distribution of air temperature and relative humidity in the greenhouse as affected by external shading in arid climates. *Journal of Integrative Agriculture*, 2869-2882.
- Allen, R. G., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)*. Roma: FAO.
- Amrein, P., Rinner, S., Pittorino, T., Espel, J., & Schmidmayr, D. (2020). Influence of Light Spectra on the Production of Cannabinoids. *Medical Cannabis and Cannabinoids*. doi:10.1159/issn.2504-3889
- Bank, T. W. (02 de 03 de 2023). *Global Solar Atlas*. Obtido de Global Solar Atlas: <https://globalsolaratlas.info/>
- Bartok, J. W. (2001). *Energy Conservation for Commercial Greenhouses*. New York: Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service.
- Bilodeau, S. E., Wu, B.-S., Rufyikiri, A.-S., MacPherson, S., & Lefsrud, M. (2019). An Update on Plant Photobiology and Implications for Cannabis Production. *Front. Plant Sci*, 15.
- Chandra, S., Lata, H., & ElSohly, M. (2017). *Cannabis sativa L. - Botany and Biotechnology*. Oxford: Springer International Publishing.
- Corva, D., & Meisel, J. (2022). *The Routledge Handbook of Post-Prohibition Cannabis Research*. New York: Routledge.
- Costantino, A., Comba, L., Sicardi, G., Bariani, M., & Fabrizio, E. (2021). Energy performance and climate control in mechanically ventilated greenhouses: A dynamic modelling-based assessment and investigation. *Applied Energy*, 23.
- Galic, A., Grab, H., Kaczmar, N., Maser, K., & Miller, W. (15 de junho de 2022). Effects of Cold Temperature and Acclimation on Cold Tolerance and Cannabinoid Profiles of Cannabis sativa L. (Hemp). p. 16.
- Henten, E. v. (1994). *Greenhouse climate management : an optimal control approach*. Wageningen: Wageningen University & Research.
- Hossain, E. (2023). *The Sun, Energy, and Climate Change*. Cham, Switzerland: Springer.
- INFARMED, A. N. (28 de 02 de 2023). *Canábis para fins medicinais*. Obtido de Infarmed: <https://www.infarmed.pt/web/infarmed/canabis-medicinal>

- IPMA, I. P. (2023). *Clima*. Obtido de IPMA: <https://www.ipma.pt/en/oclima/>
- Katsoulas, N., & Kittas, C. (2011). Greenhouse Crop Transpiration Modelling. Em G. Gerosa, *Evapotranspiration - From Measurements to Agricultural and Environmental Applications* (pp. 311-328). Rijeka: InTech Europe. Obtido de <http://www.intechopen.com/books/evapotranspiration-from-measurements-to-agricultural-and-environmentalapplications/>
- Katsoulas, N., & Stanghellini, C. (2019). Modelling Crop Transpiration in Greenhouses: Different Models for Different Applications. *Agronomy*, 17.
- Koukounaras, A. (2021). Advanced Greenhouse Horticulture: New Technologies and Cultivation Practices. *Horticulturae*, 5.
- Liu, R., Li, M., Guzmán, J., & Rodríguez, F. (2021). A fast and practical one-dimensional transient model for greenhouse temperature and humidity. *Computers and Electronics in Agriculture* (186) - Elsevier, 17.
- Maraveas, C. (2020). Wind Pressure Coefficients on Greenhouse Structures. *Agriculture*, 22.
- Mehboob, N., Farag, H., & Sawas, A. (2020). Energy Consumption Model for Indoor Cannabis Cultivation Facility. *IEE Open Journal of Power and Energy*, 222-232.
- Mesmoudi, K., Meguellati, K., & Bournet, P.-E. (2017). Thermal analysis of greenhouses installed under semi arid climate. *International Journal of Heat and Technology*, 474-486.
- Mills, E. (2012). The carbonfootprintofindoor Cannabis production. *Energy Policy*, 58-67.
- Mills, E., & Zeramy, S. (2022). Energy use by the indoor cannabis industry: inconvenient truths for producers, consumers, and policy makers. Em D. Corva, & J. Meisel, *The Routledge Handbook of Post-Prohibition Cannabis Research* (pp. 243- 265). New York: Routledge.
- Nikolaou, G., Neocleous, D., Katsoulas, N., & Kittas, C. (2019). Irrigation of Greenhouse Crops. *Horticulturae*, 20.
- Novagric. (17 de 01 de 2022). Technical offer 94021.v5. Murcia, Murcia, Espanha: Novagric.
- Pazuki, A., Aflaki, F., Pessaraki, M., Gurel, E., & Gurel, S. (2017). Plant responses to extended photosynthetically active radiation (EPAR). *Advances in Plants & Agriculture Research*, 313-318.
- Ponce, P., Molina, A., Cepeda, P., & Lugo, E. (2015). *Greenhouse Design and Control*. Ejidos de Huipulco: CRC Press.
- Small, E., Pocock, T., & Cavers, P. (2002). The biology of Canadian weeds. 119. Cannabis sativa L. *Canadian Journal of Plant Science*, 217- 237.
- SunTracker. (02 de 03 de 2023). *DLI calculator*. Obtido de Suntracker Technologies: <https://dli.suntrackertech.com/>
- Villarreal-Guerrero, F., Pinedo-Alvarez, A., & Flores-Velázquez, J. (2020). Control of greenhouse-air energy and vapor pressure deficit with heating, variable fogging rates and variable vent configurations: Simulated effectiveness under varied outside climates. *Computers and Electronics in Agriculture - Elsevier*, 10.

- Yep, B., Gale, N., & Zheng, Y. (2020). Aquaponic and Hydroponic Solutions Modulate NaCl-Induced Stress in Drug-Type Cannabis sativa L. *Frontiers in Plant Science*, 14.
- Zabeltitz, C. v. (2011). *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates*. Berlin: Springer.