

Adaptação de condições para produção de hortícolas em contexto urbano num sistema rotativo hidropónico

Simão Castela Abecasis Nunes Correia

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Agronómica

Orientadores: Professora Doutora Maria Teresa Gomes Afonso do Paço

Doutora Mariana da Silva Gomes Mota

Júri:

Presidente: Professor Doutor Carlos Manuel Antunes Lopes, Professor associado com agregação, Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa.

Vogal: Professor Doutor João Rui Rolim Fernandes Machado Lopes, Professor auxiliar, Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa.

Vogal: Doutora Mariana da Silva Gomes Mota, Técnica Superior, Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Agradeço às minhas orientadoras pelo acompanhamento e constante disponibilidade para ajudar na elaboração desta dissertação.

Agradeço aos meus pais que me deram a oportunidade de poder estudar e que cumprem e cumpriram uma das mais importantes funções da família: a educação.

Agradeço ao Instituto Superior de Agronomia, nos nomes dos seus professores e alunos que me acompanharam. Em especial agradeço à professora Erika Santos pela análise laboratorial, necessária a esta dissertação, que se disponibilizou a fazer.

Resumo

Esta dissertação teve como principal objetivo a experimentação de um sistema de cultivo sem solo (hidropónico) em modo rotativo (OGarden smart), fazendo com que as plantas variem constantemente a sua posição em relação ao vetor da gravidade. Foi estudado o desenvolvimento das plantas, desde a germinação no viveiro do sistema até à colheita, a relação das mesmas com a radiação fornecida por luzes LED vermelhas, azuis e brancas, a rega, o substrato utilizado, as condições abióticas e o consumo energético.

O sistema foi montado no ISA, num espaço protegido das condições exteriores. Foram feitas três épocas de produção utilizando três culturas: a alface, o rabanete e o coentro. Montou-se simultaneamente um sistema de cultivo sem solo convencional (chamado “convencional” no desenvolvimento da dissertação). Nas primeiras duas épocas o sistema convencional foi montado no mesmo espaço do sistema OGarden smart e na última época foi montado em estufa. Foram comparadas as taxas de germinação entre os dois sistemas, não tendo a comparação estatística favorecido o OGarden smart ($p=0.514$), todos os outros dados foram comparados com dados de referência delineados durante a revisão bibliográfica, sendo que a alface e o coentro apenas obtiveram 10 e 25%, respetivamente, da matéria fresca de referência e o rabanete aproximou-se de tal valor, mostrando melhor adaptação.

A eficiência do uso da água foi muito reduzida em todas as épocas, apresentando um valor máximo de 1.68 g/mm.

A temperatura e humidade relativa foi registada através de um sensor (DLP-TH1), tendo a temperatura na última época de produção subido para valores prejudiciais à produção ($>25\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Concluiu-se ainda que o consumo energético do sistema é elevado (37.2 KWh), limitando o sucesso de divulgação para uso doméstico, podendo, ainda assim, ter um proveito no sector da restauração, não só pela produção, mas também pela sustentabilidade, impacto visual e economia circular.

Palavras-Chave: sistema de cultivo sem solo; agricultura urbana; LED; consumo energético; hidroponia.

Abstract

This dissertation has as its primary objective the testing of a soilless cultivation system (hydroponic) in a rotating mode (OGarden smart), causing plants to constantly change their position relative to the gravity vector. The study encompassed the entire plant development process, from germination in the system's nursery to harvest, including the plants relationship with the radiation provided by red, blue and white LED lights, irrigation, the substrate used, abiotic conditions, and energy consumption.

The system was set up at ISA, in an enclosed space protected from external conditions. Three production cycles were conducted using three different crops: lettuce, radish and coriander. Simultaneously, a conventional soilless cultivation system was set up (from now on called "conventional"). For the first two production cycles, the conventional system was established in the same space as the OGarden smart system, and during the last cycle, it was set up in a greenhouse. Germination rates between the two systems were compared, and the statistical results did not favor the OGarden Smart ($p=0.514$). All other data were compared to reference values established during the literature review. It was found that lettuce and cilantro achieved only 10% and 25% of the reference fresh matter, respectively, while radish approached this value, showing a more favorable adaptation.

Water Use Efficiency (WUE) was very low in all production rounds, with a maximum value of 1.68 g/mm.

Temperature and relative humidity were recorded using a sensor (DLP-TH1), and in the last production round, the temperature rose to levels detrimental to production ($>25^{\circ}\text{C}$).

Furthermore, the dissertation concluded that the system's energy consumption was high, totalling 37.2 KWh, which limits its success for domestic use. However, there is potential for application in the restaurant sector, not only due to production but also because of its sustainability, visual impact, and circular economy.

Keywords: soilless cultivation system; urban agriculture; LED; energy consumption; hydroponics.

Índice de Texto

1. Introdução.....	1
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. <i>Sistemas de cultivo sem solo.....</i>	<i>3</i>
2.1.1. Contexto.....	3
2.1.2. Vantagens e inconvenientes	4
2.1.3. Sistemas de cultivo sem solo em substrato.	4
2.1.3.1. Substratos	5
2.1.3.2. Componentes orgânicos e inorgânicos dos substratos	7
2.1.4. Sistemas de cultivo sem solo em modo rotativo	8
2.1.4.1. Vantagens	9
2.1.5. Consumos energéticos	10
2.2. <i>A relação das plantas com a radiação</i>	<i>11</i>
2.2.1. Fototropismo.....	11
2.2.2. Fotoperíodo.....	12
2.2.3. Uniformidade na distribuição da radiação	12
2.2.4. Luzes LED.....	13
2.2.5. Uso de LEDs em horticultura	13
2.2.6. Efeitos da radiação vermelha	14
2.2.7. Efeitos da radiação azul.....	15
2.2.8. Efeitos da radiação branca	15
2.3. <i>Gravitropismo</i>	<i>16</i>
2.3.1. Efeito da gravidade na translocação de nutrientes.....	16
2.3.2. Efeito da gravidade na translocação de hormonas	19
2.4. <i>Espécies de plantas adequadas à produção em CSS em modo rotativo.</i>	<i>21</i>
2.4.1. A cultura da alface.....	21
2.4.1.1. Desenvolvimento e exigências ambientais	22
2.4.1.2. Necessidades nutritivas	23
2.4.1.3. Necessidades hídricas	24
2.4.1.4. Necessidade de radiação	24
2.4.1.5. A cultura da alface em sistemas de cultivo sem solo.....	24
2.4.2. A cultura do rabanete	25
2.4.2.1. Desenvolvimento e exigências ambientais	25
2.4.2.2. Necessidades nutritivas	26
2.4.2.3. Necessidades hídricas	26

2.4.2.4.	Necessidade de radiação	27
2.4.2.5.	A cultura do rabanete em sistemas de cultivo sem solo	27
2.4.3.	Cultura do coentro	28
2.4.3.1.	Desenvolvimento e exigências ambientais	28
2.4.3.2.	Necessidades nutritivas	29
2.4.3.3.	Necessidades hídricas	29
2.4.3.4.	Necessidade de radiação	29
2.4.3.5.	A cultura do coentro em sistemas de cultivos sem solo	30
3.	Materiais e Métodos	31
3.1.	<i>O sistema</i>	<i>32</i>
3.1.1.	Modo de funcionamento	33
3.2.	<i>Sensor de temperatura e humidade.....</i>	<i>38</i>
3.3.	<i>Consumos energéticos</i>	<i>39</i>
3.4.	<i>O substrato utilizado</i>	<i>39</i>
3.5.	<i>A produção de comparação</i>	<i>40</i>
3.6.	<i>Cálculo da eficiência do uso da água</i>	<i>42</i>
3.7.	<i>Pesagem dos produtos finais</i>	<i>43</i>
3.8.	<i>Recolha de dados</i>	<i>43</i>
3.9.	<i>Tratamento de dados.....</i>	<i>44</i>
4.	Apresentação e discussão dos resultados	46
4.1.	<i>Taxas de germinação</i>	<i>46</i>
4.2.	<i>Tempos de cultura por época.....</i>	<i>50</i>
4.3.	<i>A matéria fresca e seca das culturas.....</i>	<i>52</i>
4.4.	<i>Rega</i>	<i>59</i>
4.5.	<i>Temperatura e humidade relativa</i>	<i>62</i>
4.6.	<i>Substrato</i>	<i>63</i>
4.7.	<i>Consumo energético</i>	<i>64</i>
5.	Considerações finais	68

Índice de figuras

Figura 2.1 – Esquema de um sistema de cultivo sem solo em modo rotativo (Fonte: RotaryGarden).....	8
Figura 2.2 - Diferença da necessidade de lâmpadas de iluminação entre o sistema rotativo e um sistema hidropónico convencional (Fonte: RotaryGarden, 2023).....	9
Figura 3.1 – Representação esquemática da componente prática realizada.	31
Figura 3.2 – Esquema do sistema OGarden smart.	32
Figura 3.3 – Imagens do sistema mecânico: 1 – Motor eléctrico e rodas dentadas dianteiras, 2 – Tambor com extremidades dentadas.	33
Figura 3.4 – Imagens do sistema de iluminação: 1 – Sistema de iluminação do viveiro e do tambor rotatório, 2 – Lâmpadas LED de diferentes cores, pormenor de distribuição.	34
Figura 3.5 – Reservatório e bombas (2) do sistema de rega.....	35
Figura 3.6 – Ecrã presente na superfície frontal do equipamento.	36
Figura 3.7 – Sensor de humidade e temperatura DLP-TH1.....	38
Figura 3.8 – Exemplificação do software DLP-TH1 application (DLP Design).	38
Figura 3.9 – (1) Tomada eléctrica “SmartLife Smart Plug” e (2) layout da aplicação de apresentação dos consumos.	39
Figura 3.10 – Comparação entre cápsulas de substrato comprimido (1) e cápsulas expandidas (2).....	40
Figura 3.11 – Dimensão e cálculo da dotação de rega no TPC.....	41
Figura 3.12 – Tabuleiros de produção de comparação. 1 – em estufa, 2 – no mesmo espaço que o sistema.....	42
Figura 3.13 – Preparação (1) após pesagem, colocação em estufa de secagem (2) e matéria seca após secagem (3) de rabanetes.	43

Figura 4.2 – Comparação temporal entre a germinação no sistema Ogarden smart e no convencional durante a primeira época.....	47
Figura 4.3 - Comparação temporal entre a germinação no sistema Ogarden smart e no convencional durante a segunda época.	48
Figura 4.4 - Comparação temporal entre a germinação no sistema Ogarden smart e no convencional durante a terceira época.	48
Figura 4.5 – Desenvolvimento das plantas germinadas em ambos os sistemas. 1 (rabanete), 2 (alface) e 3 (coentro) – Sistema Ogarden smart. 4 (coentro), 5 (rabanete) e 6 (alface) – Sistema convencional. As fotografias foram tiradas na mesma data (13 de fevereiro).....	49
Figura 4.6 – Tempos de cultura de cada espécie em cada uma das três épocas.....	50
Figura 4.7 – Posicionamento temporal de cada época e espécie.	51
Figura 4.8 – Comparação entre o tempo cultural médio do conjunto das três épocas e o tempo cultural teórico em sistemas de cultivo sem solo horizontais.	51
Figura 4.9 – Gráfico boxplot das três épocas para a cultura da alface relacionando com a matéria fresca (MF) e seca (MS).....	54
Figura 4.10 - Gráfico boxplot das três épocas para a cultura do rabanete relacionando com a matéria fresca (MF) e seca (MS).....	55
Figura 4.11 - Gráfico boxplot das três épocas para a cultura do coentro relacionando com a matéria fresca (MF) e seca (MS).....	56
Figura 4.12 – Planta de rabanete.	57
Figura 4.13 – Acidentes fisiológicos na alface. 1- Necrose marginal resultante de vitrificação.	58
Figura 4.14 – Alface com alongamento excessivo das folhas externas e pouco desenvolvimento das folhas novas.	58
Figura 4.15 – Planta de coentro com folhas em stress (1)	59
Figura 4.16 – Dotações (ml) de rega totais para cada época de produção.....	60

Figura 4.17 – Área de plantação no tambor do sistema OGarden smart.....	60
Figura 4.18 – Variação da temperatura e humidade relativa médias mensais ao longo do processo experimental.	62
Figura 4.19 – Comparação entre o consumo mensal de uma máquina de lavar loiça e o sistema OGarden smart.	65
Figura 4.20 – Percentagens do consumo energético parcial dos diferentes componentes do sistema.	65
Figura 4.21 – Consumo energético em diferentes modos de funcionamento. O motor está sempre a funcionar.	66

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Classificação botânica da alface (Adaptado de: Almeida, 2015).....	21
Quadro 2.2 – Quantidades de azoto (N), fósforo (P ₂ O ₅) e potássio (K ₂ O) recomendadas (kg/ha).	23
Quadro 2.3 – Quantidades de magnésio (Mg) e boro (B) recomendadas (kg/ha).....	23
Quadro 2.4 – Classificação botânica do rabanete (Adaptado de: Almeida, 2015).	25
Quadro 2.5 – Quantidades de azoto (N), fósforo (P ₂ O ₅) e potássio (K ₂ O) recomendadas (kg/ha).	26
Quadro 2.6 – Quantidades de magnésio (Mg) e boro (B) recomendadas (kg/ha).....	26
Quadro 2.7 – Classificação botânica do coentro (Adaptado de: Almeida, 2015).....	28
Quadro 2.8 – Quantidades de azoto (N), fósforo (P ₂ O ₅) e potássio (K ₂ O) recomendadas (kg/ha).	29
Quadro 3.1 – Frequência de rega predefinida para o tabuleiro de germinação.	37
Quadro 3.2 – Frequência de rega predefinida para o reservatório do tambor.....	37

Quadro 3.3 – Análise NPK ao substrato.	40
Quadro 3.4 – Dotações no TPC	41
Quadro 4.1 – Taxas de germinação nas diferentes épocas e sistemas.....	46
Quadro 4.2 – Média da matéria fresca e seca de cada cultura por época de produção.	53
Quadro 4.3 – Matéria fresca e matéria seca (g) totais de cada cultura para cada época de produção.	53
Quadro 4.4 -Produtividade de referência em termos de matéria fresca/planta em CSS horizontais com substrato.....	56
Quadro 4.5 – Dotações totais de rega por época em ml e mm.....	61
Quadro 4.6 – Eficiência do uso da água de cada época.....	61
Quadro 4.7 – Resultados laboratoriais da análise ao pH e à condutividade eléctrica (CE) dos substratos.	64

Lista de símbolos, abreviaturas e acrónimos

ISA (Instituto Superior de Agronomia)
CSS (Sistema de cultivo sem solo)
NFT (Nutrient Film Technique)
IoT (Internet of things)
PAR (Radiação fotossinteticamente ativa)
LED (Light-emitting Diode)
INIAV (Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária)
NASA (National Aeronautics and Space Administration)
FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations)
ONU (Organização das Nações Unidas)
ANOVA (Analysis of variance)
WUE (Water use Efficiency)
TG (Tabuleiro de germinação)
TPC (Tabuleiro de produção convencional)
MF (Matéria fresca)
MS (Matéria seca)
RBW (Red, Blue and White)
CE (Condutividade eléctrica)
% (Percentagem)
CO₂ (Dióxido de carbono)
NO₃⁻ (Nitrato)
N (Azoto)
K₂O (Potássio)
P₂O₅ (Fósforo)
B (Boro)
Ca (Cálcio)
Mg (Magnésio)
H₂O₂ (Péroxido de hidrogénio)
h (Altura em relação à cota de referência)
pw (Massa volúmica)
g (Aceleração da gravidade)
η (Viscosidade da solução)
r (Raio)
 $\partial P / \partial x$ (Gradiente da pressão hidrostática)

**É usado o Sistema
Internacional de Unidades*

1. Introdução

A população atual ronda os 7,9 mil milhões, segundo a última estimativa das Nações Unidas (ONU). Até 2050, ou seja, daqui a 27 anos, prevê-se um crescimento populacional de 18,56% (9.7 mil milhões de pessoas), habitando nas cidades 6,3 mil milhões de pessoas e 2,9 mil milhões nas áreas rurais (Schnitzler, 2012a).

O sector agrícola tem desenvolvido esforços para acompanhar este crescimento demográfico tentando produzir alimento diversificado, da maneira mais eficiente possível, produzindo mais num espaço menor. A tecnologia e o constante desenvolvimento do conhecimento científico têm sido um importante aliado do sector, que se renova e melhora diariamente.

A preocupação ambiental teve, nos últimos anos, um crescendo. Atualmente é incontornável, influenciando toda a economia ligada ao sector agrícola e exigindo uma especial atenção aos impactos das decisões desde a sementeira até ao prato.

Tendo em conta os factos anteriormente referidos, resta uma pergunta: Como irá o sector agrícola fazer a adaptação aos novos tempos que se avizinham?

Talvez a agricultura urbana seja uma ajuda. Quando se refere “Agricultura Urbana” não é necessariamente uma agricultura realizada no centro das zonas urbanas, mas sim uma agricultura cuja produção é feita em espaços industriais ou domésticos, perto dos centros de consumo, vulgarmente em terrenos onde a agricultura convencional seria impossível. A agricultura urbana poderá apresentar duas vertentes: uma focada na produção industrial, em grandes instalações com tecnologia de ponta; outra de menor escala, praticada domesticamente ou ao nível da restauração e hotelaria com pretensão de ocupar as dimensões sociais, económicas e ambientais (Pearson et al., 2010).

Os sistemas de cultivo sem solo, métodos de produção incontornável no presente e futuro da agricultura urbana, aparecem aos dias de hoje como uma alternativa interessante aos modos de agricultura convencional, sendo considerados: I) mais eficientes na ocupação espacial e também no consumo hídrico; II) com menor impacto ambiental devido à eliminação (total ou quase total) da necessidade de uso de pesticidas e herbicidas e, também, devido à redução das emissões de CO₂ tradicionalmente alocadas aos transportes de longo curso, desde o local de produção até ao centro de consumo; III) com capacidade de produção contínua durante todo o ano, independentemente das condições meteorológicas (no caso de sistemas com controlo dos fatores ambientais); IV) com produtividade potencialmente maior por unidade de

espaço utilizada, devido à possibilidade alargada de otimização das condições ótimas de desenvolvimento fenológico e fisiológico (Barrett et al., 2016).

Pretende-se, assim, nesta dissertação, avaliar um sistema de cultivo sem solo, em modo rotativo, inovador na forma como são utilizados diversos fatores influentes no crescimento das plantas, especificamente a radiação, a gravidade e a rega.

Para o efeito foram produzidos, simultaneamente, no sistema em estudo e em modo convencional, no mesmo espaço e, portanto, com as mesmas condições ambientais, três diferentes espécies de hortícolas, tendo-se analisado: I) as taxas de germinação; II) os tempos culturais; III) a matéria fresca e seca produzida; IV) a rega; V) a temperatura e humidade relativa ao longo do processo produtivo; VI) o substrato; VII) o consumo energético. Estes dados foram depois discutidos em função das especificidades do sistema rotativo.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Sistemas de cultivo sem solo

2.1.1. Contexto

Com o passar dos anos a população foi crescendo e deslocou-se em massa para os centros urbanos, tendo a agricultura de acompanhar o crescimento populacional de modo a conseguir dar oferta à procura (Schnitzler, 2012b). Contudo, dado o decréscimo de mão de obra no meio rural e o objetivo de aumentar a produção mantendo a área cultivada, impõem-se novas formas de olhar para a maneira de produzir.

Os sistemas de cultivo sem solo (CSS), vulgarmente denominados de hidropónicos, surgem relacionados com este objetivo, de produzir mais em menor área e também com o objetivo de produzir em locais onde eventualmente não se poderia fazer agricultura de outra forma, como por exemplo nos centros urbanos (Olympios & Choukr-Allah, 1999). Surgem também de uma preocupação crescente sobre a eficiência do uso dos recursos.

Existem três tipos de sistemas de cultivo sem solo que se destacam: 1) CSS em água ou hidropónicos; 2) CSS no ar ou aeropónicos e 3) CSS com substrato (Almeida & Reis, 2017).

No primeiro caso, o cultivo hidropónico, as plantas têm as suas raízes mergulhadas numa solução nutritiva e a partir da mesma obtêm a água e os nutrientes necessários, sendo que a solução nutritiva deve ser adaptada à cultura, ou culturas, em prática (Lieth & Oki, 2019). A técnica NFT (*Nutrient Film Technique*) é uma das práticas mais utilizadas neste tipo de sistemas, baseando-se no contacto permanente entre as raízes das plantas e a solução nutritiva que está em movimento constante (Sardare & Admane, 2013).

No segundo caso, o cultivo aeropónico, as plantas têm as suas raízes expostas à atmosfera, sendo-lhes proporcionado, geralmente através de nebulizadores, o contacto com a solução nutritiva. O objetivo é um cultivo hidropónico com uma poupança de solução nutritiva levada ao limite (Almeida & Reis, 2017; Sardare & Admane, 2013).

O terceiro caso, o cultivo em substrato, utiliza o mesmo como ancoragem, mas também como meio nutritivo. Estes substratos são alimentados por uma solução nutritiva que, posteriormente, fornecem às plantas (Almeida & Reis, 2017; Schwarz, 2012).

2.1.2. Vantagens e inconvenientes

Existem várias vantagens e inconvenientes associados aos sistemas de cultivo sem solo. Podem referir-se as seguintes vantagens (Almeida & Reis, 2017; El-Kazzaz & El-Kazzaz, 2017):

- 1) uso eficiente da água: geralmente o uso da água é mais eficiente nos CSS uma vez que se reduz o potencial de perda de água (menor evaporação e ausência de drenagem e percolação);
- 2) controlo rigoroso da nutrição: os CSS são cuidadosamente monitorizados e ajustados para atender às necessidades específicas das culturas;
- 3) crescimento das plantas mais rápido: o fornecimento de um ambiente adequado e controlado e de uma solução nutritiva monitorizada leva a uma redução do tempo necessário para o desenvolvimento da planta;
- 4) menos problemas com pragas e doenças devido à ausência de solo, portador de agentes patogénicos, e à inserção em locais com controlo abiótico;
- 5) menor (ou nulo) consumo de fitofármacos;
- 6) não depende da qualidade do solo (Chambers et al., 2011).

Como principais desvantagens podem apontar-se:

- 1) maior investimento inicial;
- 2) maior exigência técnica;
- 3) tem de haver um controlo constante sobre a regulação do sistema;
- 4) falhas no sistema podem induzir quebras de produção muito significativas.

2.1.3. Sistemas de cultivo sem solo em substrato.

Neste tipo de CSS é utilizado um substrato para ancorar as plantas e armazenar a solução nutritiva. A principal razão para se começar a usar substratos em vez de solo foi a inexistência de agentes patogénicos e a possibilidade de se poder fazer uma desinfeção do material após uma cultura para voltar a ser usado na produção seguinte. A implementação regular de substratos na agricultura foi também influenciada pelo facto de nestes sistemas poder haver um melhor controlo de variados fatores importantes, como as propriedades físicas do meio de desenvolvimento radicular, apontados no desenvolvimento deste capítulo, levando a um melhor desempenho por parte das plantas (Raviv et al., 2019; Muyao et al., 2022).

2.1.3.1. Substratos

Em geral a maioria dos substratos utilizados em cultivo sem solo apresentam características físicas e hidráulicas mais adequadas para o cultivo que os solos (Raviv et al., 2002). Quando as plantas são cultivadas, há uma elevada disponibilidade de água imediatamente após a rega e, à medida que a água é perdida por evapotranspiração ou percolação profunda, é nos microporos que fica retida para utilização radicular, sendo que os macroporos ajudam na drenagem rápida e na entrada de ar para o meio (muito importante para a oxigenação) (Vinci et al., 2019). Assim sendo, uma correta distribuição entre grandes e pequenos poros é importante para um meio de crescimento com características físicas ótimas (Schafer et al., 2015). Ora, os substratos permitem um melhor equilíbrio entre a disponibilidade de água e a oxigenação uma vez que existe um controlo sobre as características físicas desejadas. As forças de retenção que mantêm a água no substrato são, geralmente, mais fracas do que as dos solos, o que facilita a absorção de água pelas plantas (Raviv et al., 2002).

As variações do tamanho das partículas constituintes de um solo, desde a argila até à areia, permitem uma boa retenção devido à maior superfície de contacto gerada por esta junção. Já nos substratos, em que o tamanho das partículas é geralmente maior e mais uniforme, abre-se um maior espaço de arejamento e reduz-se a superfície de retenção (KÄMPF, 2000). Uma das razões para as forças de retenção serem mais fracas, segundo Diamantopoulos et al. (2013), é que a função da retenção de água é fortemente dependente do grau de repelência de água de um solo ou substrato. Ora, a repelência está diretamente ligada ao conteúdo mineral do meio, conteúdo qual tende a ser maior em substratos, particularmente os inorgânicos (Raviv et al., 2002, 2019).

Maynard e Hochmuth (2007) referem algumas vantagens associadas aos substratos: (1) excelentes qualidades de retenção de nutrientes e água; (2) baixo peso e facilmente manuseados; (3) os substratos são úteis para sucessivas culturas; (4) fácil instalação e baixo custo; (5) comparando com sistemas hidropónicos de recirculação (e.g. NFT) o sistema de nutrição dos sistemas de cultivo sem solo em substrato é bastante menos complicado e mais barato durante a utilização.

Quanto às características físicas dos substratos (Raviv et al., 2002; Tang et al., 2023), há cinco propriedades que se devem ter em consideração:

1) Densidade aparente do substrato (kg/m^3)

A Densidade aparente do substrato é a quantidade de massa de um material por unidade de volume (kg/m^3), incluindo os espaços vazios entre as partículas. No contexto de substratos de cultivo é uma das propriedades mais importantes, uma vez que afeta o arejamento (porosidade), a circulação e retenção de água e a fixação e disponibilização de nutrientes para as plantas.

Sendo os substratos inúmeras vezes constituídos por mais do que um material, a densidade do solo total desses mesmos será dependente das características de cada material. Substratos constituídos por materiais com partículas de tamanhos significativamente diferentes terão uma densidade do solo maior, havendo desta maneira uma maior porosidade e capacidade de retenção de água comparando com substratos constituídos por materiais com partículas de tamanhos semelhantes (Pokorny et al., 1986).

2) Tamanho das partículas e respetiva distribuição

Esta propriedade é de elevada importância, uma vez que determina o comportamento do substrato, a sua resistência e compressibilidade, a porosidade e as propriedades hidráulicas. Substratos com partículas de tamanhos substancialmente diferentes vão ter uma distribuição heterogênea que poderá afetar a alocação de nutrientes e o comportamento radicular das plantas.

3) Porosidade

A totalidade das fases aquosas e gasosas do meio do substrato é referida como porosidade. A diferença entre a porosidade total e a porosidade efetiva é o volume dos poros que não estão acessíveis à água. A porosidade final, depois de um substrato drenar totalmente, deve rondar os 10 - 30%, contudo, crescendo as plantas em substratos com expansibilidade limitada, as raízes tendem a acumular-se na parte inferior do contentor fazendo com que a porosidade final, dentro deste intervalo, possa revelar um desempenho limitativo para as plantas (Raviv et al., 2019).

4) Distribuição dos poros

A distribuição dos poros é essencial para se entender a capacidade de arejamento do substrato, a facilidade de penetração das raízes e a mobilidade da água. A presença de macroporos distribuídos de forma contínua potencia as trocas gasosas com a atmosfera e facilita o movimento das raízes. Há dois conceitos que são importantes para classificar a distribuição dos poros: i) a tortuosidade (factor adimensional), que descreve a complexidade de um itinerário feito pelos poros; ii) a conectividade, que mede o número de caminhos independentes entre dois poros.

5) Molhabilidade

A molhabilidade descreve a interação entre um líquido e uma substância sólida, no nosso caso entre a água e o substrato. Entre a absorção imediata e a repelência há diferentes graus de permissividade de entrada, patentes nos poros do substrato.

2.1.3.2. Componentes orgânicos e inorgânicos dos substratos

Segundo Raviv et al. (2019), podemos agrupar os materiais usados nos substratos em dois grupos. O primeiro são os materiais orgânicos, como a turfa e a fibra de coco. O segundo grupo são os materiais sintéticos e minerais (inorgânicos) tais como a lã de rocha, a perlite, a vermiculite e a argila expandida. Observam-se em seguida as características da turfa e da perlite, componentes utilizados no processo experimental:

○ Turfa

A turfa é resultado da decomposição parcial de plantas a baixas temperaturas e em condições anaeróbicas ou semi-anaeróbicas (Raviv et al., 2002), sendo, por isso, um componente orgânico. Possui uma densidade bastante baixa, entre 0.05 g cm^{-3} e 0.4 g cm^{-3} , elevada porosidade e uma capacidade de retenção de água muito elevada (Chambers et al., 2011; Raviv et al., 2002). Segundo os mesmos autores, a turfa possui uma capacidade de troca catiónica considerável, resultado da fibrosidade que contém, ajudando a reduzir a lixiviação de nutrientes. Tendencialmente a turfa pode apresentar um pH ácido.

- Perlite

A perlite é um componente inorgânico expandido, sendo na sua base um mineral vulcânico (Raviv et al., 2002). As suas características físicas destacam-se por uma baixa densidade de 0.1 g cm^{-3} , pela elevada porosidade e capilaridade, conseguindo reter até quatro vezes o seu peso em água. A saturação da perlite é muito rápida, independentemente do seu estado de humidade inicial (Wever et al., 1996), mostrando uma boa molhabilidade. O mesmo autor aponta a importância, em termos de características químicas, da referência à neutralidade de pH.

2.1.4. Sistemas de cultivo sem solo em modo rotativo

Os sistemas de cultivo sem solo em modo rotativo são a combinação da ciência hidropónica com os últimos avanços tecnológicos, de modo a obter produções eficientes.

Estes sistemas são desenhados de forma que as plantas estejam distribuídas no interior de um cilindro (tambor), colocado horizontalmente, girando em volta de um eixo, eixo este que é o foco de luz (figura 2.1). As plantas apresentam, portanto, as raízes apontadas no sentido da parede externa do cilindro. O cilindro apresenta-se em constante movimento sobre uma estrutura que no topo (base do cilindro) possui um reservatório de água preenchido periodicamente, onde os substratos que suportam o crescimento das plantas contactam pontualmente (à medida que o cilindro se desloca) com a água. Estes sistemas encontram-se, geralmente, em locais de ambiente controlado.

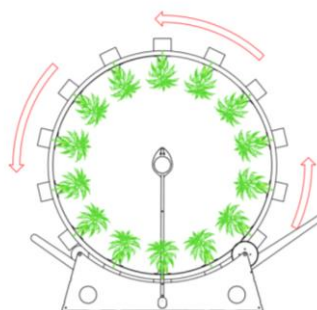


Figura 2.1 – Esquema de um sistema de cultivo sem solo em modo rotativo (Fonte: RotaryGarden, 2023)

2.1.4.1. Vantagens

Existem prováveis vantagens relativamente a estes sistemas, todas elas relacionadas com a melhoria da eficiência na produção hidropónica, embora pouco testadas na produção de plantas sem solo (e.g: <https://rotarygarden.eu/>):

- 1) poupança de espaço - estando as plantas no interior de um cilindro e não colocadas horizontalmente (modo convencional), aumenta o número de plantas produzidas por área, dado que a área de instalação é menor;
- 2) utilização da radiação - todas as plantas recebem exatamente a mesma radiação, evitando heterogeneidades e desperdício de energia. Há também uma redução no número de focos necessários para o mesmo número de plantas em relação a um sistema disposto horizontalmente;

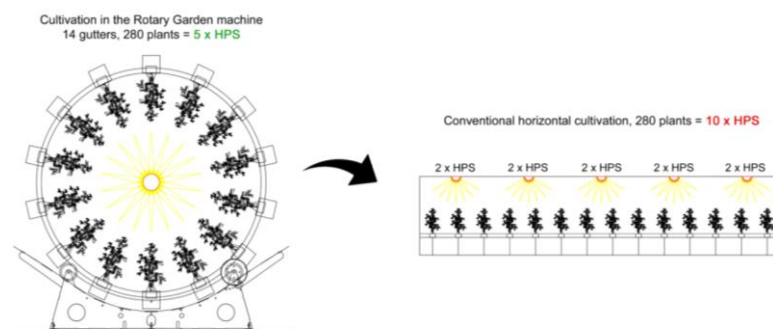


Figura 2.2 - Diferença da necessidade de lâmpadas de iluminação HPS (high-pressure sodium) entre o sistema rotativo e um sistema hidropónico convencional (Fonte: RotaryGarden, 2023)

- 3) podemos através destes sistemas cultivar em áreas teoricamente inadequadas;
- 4) existe uma capacidade de produção durante todo o ano;
- 5) estando em ambiente controlado e sendo providenciado um maior arejamento devido à rotação constante, a probabilidade de serem necessários tratamentos fitossanitários é bastante reduzida;
- 6) o facto de o reservatório de água ser preenchido periodicamente, rapidamente consumido ou absorvido pelos substratos e estar protegido pelo cilindro, faz com que as perdas por evaporação sejam residuais e as perdas por percolação inexistentes;
- 7) a variação da posição das plantas em relação ao vetor da gravidade estimula uma mais rápida translocação no interior das plantas podendo acelerar

significativamente o crescimento vegetativo (tema debatido em maior profundidade no capítulo 2.3);

- 8) o movimento constante das plantas provoca também um movimento na atmosfera diretamente em contacto com a superfície das mesmas, facilitando a taxa de trocas gasosas e diminuindo o risco de contração de doenças, levando a um desenvolvimento mais rápido e mais eficiente (Zhang et al., 2016);
- 9) a redução da necessidade de trabalho humano, uma vez que o sistema é altamente automatizado;

2.1.5. Consumos energéticos

A atividade económica agrícola depende de variados fatores externos que podem, frequentemente, alterar os custos de produção. Ora, a produção hidropónica ganha aqui uma vantagem significativa, sendo possível diminuir ou eliminar os fatores externos (leia-se abióticos) e, portanto, estimar a produção e os gastos de maneira certa. Conclui-se, assim, que a redução do efeito dos fatores externos poderá reduzir também os inputs necessários para manter a produção em bom caminho; entre estes inputs inclui-se a energia implicada (Manos & Xydis, 2019).

De acordo com Vox et al. (2010), a gestão dos parâmetros climáticos, tais como a radiação, a temperatura, a humidade ou a concentração de CO₂ são muito importantes para a poupança energética. Em sistemas hidropónicos a energia é, sem dúvida, o maior custo, podendo preencher 40% do total (Liaros et al., 2016). Já a precisão dos sistemas hidropónicos e a otimização contínua através da digitalização dos sistemas energéticos, reduzindo os desperdícios, leva a uma redução do desperdício energético (Manos & Xydis, 2019).

Associado aos sistemas hidropónicos poderá estar associado o conceito de “Internet of things” (IoT), conceito que se baseia na ligação entre vários dispositivos, por exemplo sensores ou microcontroladores, que providenciam serviços inteligentes e eficientes aos utilizadores. A monitorização ambiental e o conceito de “smart farming” têm por base o IoT, podendo aumentar a precisão do consumo energético (Khudoyberdiev et al., 2020).

Estima-se que os sistemas hidropónicos tenham um consumo energético, dependendo do tipo de sistema, aproximadamente 82 vezes superior comparando com os sistemas convencionais, uma vez que a energia é aplicada de maneira mais intensa e prolongada (Lages Barbosa et al., 2015). Contudo, trata-se de energia diretamente aplicada na produção. Em termos de energia indireta, isto é, energia gasta nos transportes, na reparação de materiais ou na produção de fatores de produção, a

comparação com os sistemas convencionais já não é tão clara, sendo tendencialmente maior nestes (Manos & Xydis, 2019).

2.2. A relação das plantas com a radiação

A radiação é uma importante fonte de energia para as plantas que, através da fotossíntese, a transformam em energia química que permitirá o saudável desenvolvimento. Contudo, não é só esta a utilidade da radiação. Segundo (Paradiso e Proietti (2022), mais do que fornecer energia para a fotossíntese a radiação atua sobre o desenvolvimento e o metabolismo das plantas através de complexos sinais químicos, tendo, por isso, a quantidade de radiação (intensidade e fotoperíodo) e a qualidade (composição espectral) um grande efeito no crescimento e na fisiologia das plantas.

Sendo a luz tão importante para as plantas, estas desenvolveram mecanismos para tirarem dela o melhor proveito. Tendo em conta o ambiente luminoso em que dada planta vive, esta regula a sua morfologia, faz ajustes bioquímicos relativos à fotossíntese e altera a anatomia das suas folhas (distribuição e quantidade de cloroplastos) de maneira que consiga obter a maior quantidade de CO₂ e de luz (Violet-Chabrand et al., 2017).

A radiação com comprimentos de onda compreendidos no intervalo de 400-700 nm é considerada útil para as reações fotoquímicas e para a criação de energia química através da fotossíntese (Gerovac, 2016). A radiação neste intervalo é designada por Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR).

Na agricultura moderna, com o objetivo de melhorar a qualidade dos produtos e a eficiência da produção, tenta-se regular, modificar e especificar a luz que é dada às plantas através de sistemas de luz artificial.

2.2.1. Fototropismo

O fototropismo é o conceito que explica as dinâmicas físicas e químicas das plantas em resposta à influência da radiação. Este conceito foi estudado essencialmente sobre dois tópicos principais: (1) A transdução de sinal, ou seja, a resposta bioquímica das plantas a um determinado sinal, neste caso a luz e (2) o alongamento celular (Brandon & Emmanuel, 2010; Trewavas, 2000).

Perante a presença da radiação dá-se um estímulo de alongamento da planta no sentido (positivo ou negativo) da fonte (Holland et al., 2009; Liscum et al., 2014). Ora este estímulo é originado por um fotorreceptor denominado de fototropina que, após ter

a percepção da presença de radiação, especificamente a zona do espectro azul, ativa-se e desencadeia a ação da hormona auxina (Esmon et al., 2006), responsável pelo alongamento direcional da planta.

2.2.2. Fotoperíodo

O fotoperíodo é um importante e complexo conceito de relação entre um ser vivo, neste caso das plantas, e a duração do dia, ou seja, o número de horas de luz e de escuridão em 24 horas (Thomas & Vince-Prue, 1996).

O tempo de iluminação necessário depende das plantas e, dentro de cada espécie pode variar consoante a variedade. Mínimas alterações no número de horas de luz durante o desenvolvimento da planta podem antecipar ou retardar algumas respostas fisiológicas como, por exemplo, a fenologia (Mawphlang & Kharshiing, 2017; Weller & Kendrick, 2008). Também a captação de nutrientes pode ser afetada. Desde o final do século passado que se sabe, por exemplo, que a taxa de absorção de NO_3^- varia com um padrão cíclico de dia para dia. Ora, dada a elevada importância do fotoperíodo, as plantas desenvolveram um sistema endógeno circadiano (variação das funções biológicas ao longo de um dia) sincronizado com o ambiente em que a planta vive (Battle & Jones, 2020).

2.2.3. Uniformidade na distribuição da radiação

Um dos problemas que se pode encontrar em sistemas de cultivo sem solo convencionais é a baixa uniformidade da distribuição da radiação, isto porque existem inúmeros sistemas que usam focos de luz que não preenchem a totalidade do espaço ocupado pelas plantas (Touliatos et al., 2016a). Quer isto dizer que, usando focos, a radiação chegará com maior intensidade às plantas imediatamente abaixo dos mesmos e irá reduzir a sua ação nas plantas que se vão distanciando do centro, levando a um desenvolvimento desigual e, por conseguinte, a uma quebra de produção (Bugayong et al., 2022). Ora, o uso de luzes com a tecnologia LED (Light-emitting Diodes), que devido à sua pequena dimensão conseguem ser colocadas lado a lado num curto distanciamento espacial, faz com que se consiga cobrir toda a zona de produção uniformemente. Acrescenta-se ainda que é importante haver uma boa uniformidade, especialmente em sistemas de iluminação LED, na distribuição de lâmpadas de diferentes cores, o padrão deve ser regular de modo que todas as plantas tenham

exatamente o mesmo aproveitamento dos diferentes comprimentos de onda emitidos pelas diferentes cores (Bugayong et al., 2022; Touliatos et al., 2016a).

2.2.4. Luzes LED

Há variadas vantagens no uso de luzes LED na agricultura em ambiente controlado.

As principais vantagens (Massa et al., 2008; Morgan Pattison et al., 2018; Morrow, 2008) são a sua durabilidade, podendo manter até 70% da sua luminosidade após 50.000 horas de funcionamento, ligam-se e desligam-se instantaneamente não sendo necessário tempo de aquecimento, a capacidade de se conseguir um comprimento de onda específico através de cada lâmpada, evitando gastos de energia em comprimentos de onda que não são úteis, a capacidade de fazer corresponder os comprimentos de onda aos fotorreceptores das plantas para otimizar a produção e regularizar a morfologia, a emissão regular e linear de fótons com a corrente elétrica de entrada, o fornecimento de uma luminosidade três vezes superior para a mesma potência de entrada numa igual área de aplicação, havendo já capacidades de aproximadamente 160 lm/W (lumen por Watt)(Morgan Pattison et al., 2018), a capacidade de produção de altos níveis de luminosidade podendo, ainda assim, ser operados perto dos tecidos vegetais uma vez que têm uma baixa saída de calor radiante (Massa et al., 2008; Morrow, 2008). Para além de todas estas vantagens podemos ainda referir que a tecnologia LED é bastante amiga do ambiente, no sentido em que tem uma alta eficiência energética que leva a um menor consumo e, por isso, a uma menor emissão de dióxido de carbono. Não usa também mercúrio, ao contrário da maioria das restantes lâmpadas existentes (Sipos et al., 2020).

2.2.5. Uso de LEDs em horticultura

É na adaptação dos comprimentos de onda aos fotorreceptores das plantas, através de novas tecnologias de iluminação, que se pauta a maior diferença em relação a produtos convencionais de iluminação, levando a uma melhoria do “conforto” das plantas, que se podem desenvolver com recurso à radiação (energia) estritamente necessária (Lazzarini et al., 2017). A capacidade de modificar e controlar a radiação dada às plantas oferece a possibilidade de poder influenciar a morfologia das mesmas (Heo et al., 2002).

Outro ponto particularmente importante é a capacidade de se poder usar as lâmpadas LED relativamente perto das plantas, isto porque, como visto anteriormente, não há um

aquecimento significativo das lâmpadas. Desta maneira há uma maior interceção da luz por parte das plantas e, por consequência, uma menor perda de luz não aproveitada pelas mesmas (Morrow, 2008).

É, então, necessário tentar entender qual o papel dos comprimentos de onda Azul, Vermelho e Branco no crescimento das plantas uma vez que são estes que representam a Radiação Fotossinteticamente Ativa.

2.2.6. Efeitos da radiação vermelha

Geralmente a radiação vermelha está relacionada com o aumento da biomassa, peso seco das plantas e também com a sua taxa de crescimento. Contudo estes aspetos, só por si, não são necessariamente positivos, podendo um alongamento excessivo influenciar negativamente o valor final de determinada planta.

Segundo Mizuno et al. (2009), por ocasião de um simpósio sobre a radiação na horticultura, os níveis de antocianinas podem aumentar em certas plantas e, por conseguinte, aumentar a qualidade de algumas delas quando sujeitas a uma radiação monocromática de 660 nm.

Pode acontecer, também, que a radiação vermelha tenha efeito na taxa de crescimento, no aumento do tamanho, mas não na massa final, tal como foi demonstrado em estudos feitos em pimentos e em espinafres (Burattini et al., 2017; Gangadhar et al., 2012). Outros estudos, feitos com a cultura da alface, mostram que a presença de radiação com comprimento de onda maior que 700 nm aumenta a quantidade de folhas e alonga as mesmas, aumenta a taxa fotossintética, a taxa de crescimento e aumenta o peso seco final (Stutte et al., 2009). Ainda sobre esta cultura foi demonstrado que a radiação vermelha pode ter efeitos benéficos na qualidade nutricional incrementando as propriedades antioxidantes, estimulando a captação de N, K, Ca e Mg e reduzindo as concentrações de ácido ascórbico (Pinho et al., 2017; Samuolienė et al., 2011; Wojciechowska et al., 2015).

Existem vários efeitos benéficos, mas também efeitos contrários. Segundo Avercheva et al. (2009), a radiação no espectro do vermelho usada para produção em modo monocromático não é ótima para o desenvolvimento de plantas, deve ser combinada com radiações de outras partes do espectro da PAR.

2.2.7. Efeitos da radiação azul

A radiação azul é, geralmente, usada como radiação suplementar da vermelha e da policromática branca. O principal efeito atribuído à radiação azul é a abertura dos estomas. Diz-nos Hogewoning et al. (2010), na sua pesquisa sobre os efeitos da radiação azul na composição química de pepino, que se dá uma melhoria na condutância estomática levando a um aumento da passagem de vapor de água e de CO₂ pelos estomas. Cope et al. (2013), no seu estudo em rabanetes, soja e trigo, refere que a luz azul não teve nenhum efeito específico no aumento do peso seco das plantas, mas, contudo, as plantas em estudo demonstraram uma alteração substancial no seu desenvolvimento, aumentando o alongamento do caule e a expansão das folhas.

Em estudos feitos na cultura do espinafre e do morango foi demonstrado que a luz azul implica nas plantas uma maior taxa de crescimento (Burattini et al., 2017; Piovene et al., 2015).

Na cultura da alface, a radiação azul de 456 nm leva a uma acumulação de antioxidantes e a um incremento da concentração de carotenóides e de clorofila (Sergejeva et al., 2018). Ainda segundo o mesmo autor, a radiação azul promove a expansão foliar e retarda o crescimento levando a uma morfologia da planta mais compacta. Johkan et al. (2010) diz-nos que a radiação azul de 470 nm leva a um aumento do peso fresco e seco das alfaces.

Por fim, foi comprovado que a radiação azul de 400 a 500 nm aumenta a concentração de antocianinas nas alfaces em cerca de 31% levando a uma melhor qualidade das mesmas (Stutte et al., 2009).

2.2.8. Efeitos da radiação branca

As luzes LED de cor branca apresentam, geralmente, uma eficiência menor do que as LED monocromáticas azuis e vermelhas, isto porque dependem de um revestimento de fósforo que irá reagir com a emissão monocromática (geralmente azul) para originar a luz branca, ou seja, há uma perda de energia na criação de fluorescência pela conversão do fósforo (Bourget, 2008).

Sendo as LED brancas baseadas nas LED azuis poderemos desde já perceber que estas mesmas não terão exatamente o mesmo efeito que a radiação solar branca (Mitchell, 2015).

As lâmpadas LED brancas podem ter diferentes percentagens de radiação azul, sendo classificadas como quentes, neutras ou frias, ou seja, com menor ou maior

percentagem de radiação azul, respetivamente. As lâmpadas LED brancas frias (25% de azul) são aquelas que cumprem o maior número de requisitos para um normal desenvolvimento das plantas e são, também, aquelas que apresentam maior eficiência (Cope & Bugbee, 2013).

2.3. Gravitropismo

O gravitropismo é a capacidade de crescimento das plantas em resposta à força gravitacional da terra; enquanto as raízes se deslocam no sentido do vetor da gravidade (gravitropismo negativo), a parte aérea das plantas desloca-se no sentido oposto (gravitropismo positivo)(Philosoph-Hadas et al., 2005). Esta capacidade é, portanto, essencial para a fixação da planta no solo e para uma correta absorção de água e nutrientes (Nakamura et al., 2019b; Sack, 1991).

Existem células especializadas na sensibilidade à gravidade, os estatocistos, que contêm amiloplastos. Estes organelos mudam a sua posição nas células consoante a direção do vetor da gravidade, desencadeando uma resposta bioquímica na planta que se transformará numa resposta física, ou seja, desencadeará uma tendência de crescimento no sentido do gravitropismo positivo (Nakamura et al., 2019a).

2.3.1. Efeito da gravidade na translocação de nutrientes

A translocação de nutrientes no solo até às plantas pode ocorrer por três mecanismos: I) As raízes podem crescer no sentido do contacto com os nutrientes; II) Os nutrientes podem ser transportados até às raízes por fluxo de água; III) Os nutrientes passam do solo para as raízes por difusão direta caso os anteriores dois processos não ocorram dentro da normalidade (Barber et al., 1963). No caso de sistemas como aquele que nesta dissertação se trata, o segundo ponto ganha um relevo particularmente importante, uma vez que, através das diferentes posições dos substratos em relação ao vetor da gravidade, dá-se um fluxo de água invulgar em todas as direções, ou seja, haverá uma movimentação de nutrientes que poderá chegar aos diferentes pontos do substrato fomentando um crescimento radicular diferenciado e um fornecimento seguro de nutrientes e água às raízes. Para além disto, quando as plantas se encontram com a parte aérea posicionada no sentido do vetor da gravidade, ocorre um fluxo de água no sentido da base da parte aérea da planta fazendo com que seja mais fácil a captação de nutrientes junto das raízes primárias.

Já a translocação de nutrientes dentro da planta dá-se por meio do sistema vascular, o qual chega aos diversos órgãos. Existem dois caminhos neste sistema vascular, um responsável pela movimentação do sistema radicular para os diversos órgãos via fluxo de transpiração, o xilema, outro responsável pela movimentação dos fotoassimilados e redistribuição de solutos anteriormente transportados pelo xilema para as zonas de armazenamento ou necessitadas, o floema, funcionando bidireccionalmente (Atkins & Smith, 2007; Heldt, 1997).

Existem quatro principais processos de transporte de água e solutos neutros na planta. A difusão, onde o transporte é guiado pelo gradiente de concentração, a convecção, onde o transporte é guiado de maneira ativa, com dispêndio de energia, o movimento em massa de longa distância, que é guiado pelo gradiente de pressão, e a osmose, que guia a água e minerais através das membranas pela soma dos dois gradientes anteriores. Esta soma do gradiente de pressão e de concentração levou à formulação de uma força motriz total expressa como um potencial químico da água, ou seja, a energia livre associada à água (Taiz & Zeiger, 1991).

O processo de osmose é energeticamente espontâneo, a água move-se de um lugar de elevado potencial químico para uma zona de baixo potencial químico não havendo trabalho envolvido e sendo, apenas, libertada energia livre. O potencial químico é influenciado por três fatores: a concentração, a pressão e a gravidade. A gravidade faz com que a água se mova no sentido descendente a não ser que haja uma oposição por uma força igual. Assim, o efeito da gravidade no potencial químico depende da altura (h) em relação à cota de referência, da massa volúmica (ρ_w) e da aceleração da gravidade (g).

$$f(\text{gravidade}) = \rho_w gh$$

Equação 1

Numa coluna de água estável os componentes da gravidade e da pressão equilibram-se, não havendo por isso movimento (Taiz & Zeiger, 1991). Contudo, se houver um desequilíbrio num dos componentes, será provocada movimentação. No caso do sistema em estudo, em que as plantas estão em movimento constante em relação ao eixo da gravidade, a constante inversão deste componente fará com que, regularmente, exista uma maior facilidade da água e eventuais minerais presentes no xilema se deslocarem no sentido ascendente da planta.

Para descrever quantitativamente o movimento do fluido no xilema em longa distância temos de relacionar o fluxo com uma força que impulsiona o movimento. Hagen e Poiseuille, independentemente, perceberam que o volume de fluido que se move por

unidade de tempo através de um cilindro é proporcional à quarta potência do seu raio e que depende linearmente da altura em pressão hidrostática:

$$\text{Taxa de fluxo em volume por cilindro} = - \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{\partial P}{\partial x}$$

Equação 2

Onde r é o raio, η é a viscosidade da solução e $-\partial P/\partial x$ é o gradiente negativo da pressão hidrostática (Nobel, 1983).

Ora, nos vasos verticais de uma planta, usando como exemplo um com raio de $20\mu m$, existe uma pressão hidrostática estática de -0.01 MPa causada pela gravidade, mesmo na ausência de fluxo. Numa planta a transpirar o valor é de -0.03 MPa. Concluímos então, que a pressão hidrostática numa planta em regime normal, a transpirar, supera a gravidade (Nobel, 1983).

Em plantas que tenham um movimento constante em relação ao vetor da gravidade, a pressão hidrostática causada pela mesma vai variar, podendo ser totalmente anulada quando a planta cresce na posição inversa, ou seja, no sentido do vetor da gravidade. Isto vai causar uma maior facilidade no movimento da água e minerais provenientes das raízes, por meio do xilema, até aos diferentes órgãos da planta.

A translocação no floema faz-se maioritariamente por fluxo de massa fomentado, por um lado, pelo bombeamento de sacarose e aminoácidos para o floema e, por outro lado, pelo consumo nos sítios necessitados. Podendo o movimento ser bidirecional, é ajudado por gradientes osmóticos, muitos transversais (Heldt, 1997). Em sistemas rotativos como aquele que aqui se estuda, existe a vantagem de ser necessária, periodicamente, uma menor pressão para translocar os solutos para locais de armazenamento e consumo, que em situação de posicionamento natural da planta estariam em posição superior àquela de produção (novas folhas, por exemplo), poupando energia.

2.3.2. Efeito da gravidade na translocação de hormonas

Os amiloplastos são organelos de alta densidade e sedimentam no fundo das células consoante a reorientação de determinado órgão da planta. Esta sedimentação vai gerar, segundo a hipótese de Cholodny-Went, um sinal bioquímico que vai direcionar as auxinas para o lado inferior do órgão da planta, ora, tal movimento vai resultar num crescimento diferenciado do órgão, na direção apropriada, uma vez que há taxas de crescimento diferentes entre as células inferiores e as células superiores. Mas se o gravitropismo é uma resposta hormonal, certamente não poderá ocorrer por ação de uma hormona isolada (Philosoph-Hadas et al., 2005) e por isso estuda-se em seguida o papel de diferentes hormonas na resposta à gravidade.

- Auxinas

As auxinas controlam o alongamento celular regulando variados processos celulares, como a activação enzimática e a expansão das paredes celulares (Leyser, 2002). De todos os estudos feitos até à data é bastante evidente que a auxina está diretamente relacionada com a curvatura das raízes e dos rebentos. Deve, contudo, ser tido em conta que o comportamento nas raízes e nos rebentos em relação ao gravitropismo não é exatamente igual, havendo várias evidências que mostram que há fases do processo que são independentes da auxina. No que toca às raízes, segundo Wolverton et al. (2002), a fase inicial do processo de gravitropismo pode, eventualmente, ser independente da presença da auxina, podendo as células sentir a gravidade por si próprias ou receber sinais elétricos da extremidade das raízes. Contudo, foi demonstrado que na columela radicular estão expressos os genes que codificam as proteínas transportadoras das auxinas e é na columela que se dá o primeiro estímulo de resposta gravitópica, ligando esta hormona ao gravitropismo radicular (Sato et al., 2015; Swarup et al., 2005; Swarup & Bennett, 2014; Swarup & Péret, 2012). Nos órgãos aéreos afetados, foi estudado que a presença temporal da auxina é assimétrica, não persistindo durante todo o período da resposta gravítica (Morita & Tasaka, 2004; Philosoph-Hadas et al., 2005).

- Etileno

Depois da auxina o etileno é a segunda hormona mais estudada no âmbito dos processos relacionados com o gravitropismo, todavia, não é de fácil compreensão se o etileno é apenas um coadjuvante de outras hormonas, principalmente a auxina, ou se

partilha um papel igualmente ativo. Existe a hipótese bastante provável do etileno desempenhar um importante papel na manutenção da rigidez das paredes celulares da zona que sofreu os efeitos do gravitropismo através da estimulação da produção de H_2O_2 que aumenta a atividade da peroxidase que será responsável pela manutenção da parede celular (Philosoph-Hadas et al., 2005). O etileno está também bastante relacionado com a ajuda no transporte da auxina e no aumento da sensibilidade à mesma (Harper et al., 2000).

- Giberelinas

As giberelinas têm um papel importante no alongamento celular e, portanto, seria razoável pensar que teriam também um protagonismo na estimulação do gravitropismo. Contudo, ao nível das raízes, não há evidências de uma importante atividade, podendo, ainda assim, ter um papel indireto, como mostram os estudos feitos por Busch e Sievers, (1990).

A nível aéreo as evidências da ação das giberelinas neste contexto são também poucas, sendo possível que desempenhem um papel no aumento da circulação dos amiloplastos (Philosoph-Hadas et al., 2005).

- Citocininas

As citocininas são hormonas que exercem um relevante papel na divisão celular e desenvolvimento das plantas (Hai et al., 2020; Schmülling, 2002).

Ao nível da parte aérea das plantas parece que as citocininas regulam o gravitropismo através da redução do transporte da auxina, sendo mediadas pelo etileno.

No que toca à parte radicular prevê-se que as citocininas (da extremidade das raízes) sejam muito importantes no processo do gravitropismo, trabalhando em conjunto com as auxinas. As citocininas possuem um papel regulatório no crescimento das raízes sendo inibidoras do alongamento radicular, atuando no meristema apical. Segundo Aloni et al. (2004), o bloqueio do meristema apical pela citocinina nas raízes horizontais ativa a auxina que provocará um crescimento descendente na lateral inferior das raízes (Aloni et al., 2004; Philosoph-Hadas et al., 2005).

- Ácido Abscísico

Estudos sobre a ação do ácido abscísico no hidrotropismo dizem-nos que este tem um papel na regulação do transporte da auxina e levam a crer que o mesmo processo poderá ocorrer quando se fala em gravitropismo, uma vez que ambos os processos (em relação à água e à gravidade) têm os meristemas apicais como sensores (Takahashi et al., 2002). Mesmo assim, não há evidências claras sobre o papel do ácido abscísico no gravitropismo (Philosoph-Hadas et al., 2005).

2.4. Espécies de plantas adequadas à produção em CSS em modo rotativo.

No âmbito deste estudo são utilizadas três espécies diferentes: a alface, o rabanete e o coentro. As três espécies escolhidas têm métodos de crescimento e órgãos de interesse comercial distintas.

2.4.1. A cultura da alface

A alface é uma cultura de proveito humano com uma história bastante antiga, remontando a, pelo menos, 2500 a.C. Tinha, no início, um uso com intenção de recolha do óleo proveniente das suas sementes, contudo, com o passar do tempo, começou a sofrer modificações até à alface que conhecemos nos dias de hoje, ou seja, aumento da área e do número de folhas, formação de repolho e redução da acumulação de látex (Almeida, 2015).

Quadro 2.1 – Classificação botânica da alface (Adaptado de: Almeida, 2015).

Família	<i>Asteraceae</i>
Subfamília	<i>Cichorioideae</i>
Tribo	<i>Lactuceae</i> (sin. <i>Cichorieae</i>)
Género	<i>Lactuca</i>
Espécie	<i>Lactuca sativa</i> L.

Aos dias de hoje, segundo o relatório da FAO de 2021, a cultura da alface tem uma área alocada à sua produção de mais de 1 milhão e 200 mil hectares e uma produção superior a 27 milhões de toneladas.

Existem três grandes grupos de alfaces: (1) de folha; (2) romana; (3) de repolho (Almeida, 2015). Segundo Mou (2008), o valor nutricional das alfaces varia muito com a variedade, sabemos que esta cultura é constituída em 94-96% por água e que fornece

algumas vitaminas, minerais e fibra, contudo, as alfaces de folha e romanas contêm um valor bastante mais elevado de vitaminas e minerais que as alfaces de repolho.

2.4.1.1. Desenvolvimento e exigências ambientais

O ciclo cultural da alface depende das cultivares utilizadas, do modo e da época de produção, podendo durar entre 6 a 12 semanas, sendo mais curto em produção com ambiente controlado e na época Primavera-Verão e mais longo na época invernal em sistemas convencionais.

A germinação da semente da alface pode ocorrer num período curto de 2 a 6 dias consoante a temperatura do substrato, sendo mais rápida com temperaturas entre os 20 e os 25°C. Temperaturas superiores a 30°C poderão provocar uma inibição da germinação. A luz vermelha estimula a germinação (Almeida, 2015).

Os acidentes fisiológicos mais comuns são a necrose marginal, o espigamento precoce e a vitrificação. A necrose marginal ocorre por falta de cálcio nos tecidos, podendo ser provocada por temperaturas elevadas, excesso de adubação azotada e elevada intensidade luminosa. A salinidade e a baixa temperatura do solo/substrato afetam a translocação de cálcio. O espigamento precoce tem tendência a ocorrer com temperaturas superiores a 33°C, fotoperíodos longos e stress hídricos. A vitrificação está relacionada também com a intensidade luminosa e o fotoperíodo, levando a folhas e caules intumescidos e à ausência de dominância apical.

Segundo Almeida (2015), a qualidade da alface é prejudicada por temperaturas elevadas, sendo ideal temperaturas médias de 15 a 20°C. Temperaturas abaixo dos 7°C levam a um crescimento reduzido. Temperaturas acima dos 24°C durante vários dias seguidos podem levar a um alongamento do caule e temperaturas acima dos 33°C podem levar à floração retirando, assim, o interesse da cultura.

Em relação ao solo ou substrato (Whitaker, 1974), este deve ter uma temperatura ótima entre os 13 e os 15°C e se a temperatura for inferior a 7°C pode favorecer a necrose marginal. A humidade relativa ótima para esta cultura está entre os 60 e os 70% (Chia & Lim, 2022). A alface, ao longo do seu desenvolvimento cultural vai ganhando alguma tolerância à salinidade, tendo uma sensibilidade moderada, sofrendo mais no estado de plântula. A máxima salinidade tolerada (nível crítico) sem quebra de produção é de 1,3 dS.m⁻¹ e há um decréscimo de produtividade de 13% por cada dSm⁻¹ acima do nível crítico. O pH ótimo deve ser aproximadamente neutro encontrando-se entre os 6.5 e os 7.5, sendo a cultura bastante sensível à acidez. Em solos orgânicos níveis de pH mais baixos, por exemplo com pH de 5.4, podem ser aceitáveis (Whitaker, 1974).

Segundo Whitaker (1974) a captação de nutrientes pela cultura da alface é bastante modesta, contudo, isto não quer dizer que a alface se dê bem em solos pouco férteis, mesmo tendo um conteúdo de nutrientes minerais relativamente baixo, sendo as melhores produções obtidas em solos com alta fertilidade. Para que haja uma boa qualidade das alfaces estas devem ter um desenvolvimento rápido desde a fase de plântula até à maturidade e, portanto, um solo ou substrato com uma boa fertilidade ajuda a um bom desenvolvimento.

2.4.1.2. Necessidades nutritivas

A cultura da alface não é das mais exigentes em termos de necessidades nutritivas, contudo, solos com demasiado azoto podem provocar um alongamento indesejado das folhas e nas variedades de repolho este pode ficar pouco compacto (Tavares, 1998).

Quadro 2.2 – Quantidades de azoto (N), fósforo (P_2O_5) e potássio (K_2O) a aplicar recomendadas, consoante a produção esperada e os níveis no solo, para a alface (kg/ha).

(Adaptado de: INIAV, 2022)

Produção esperada t/ha	N	Fósforo – níveis no solo (mg kg ⁻¹)						Potássio – níveis no solo (mg kg ⁻¹)					
		≤25	26-50	51-80	81-120	121-150	151-200	≤25	26-50	51-80	81-120	121-150	151-200
25	80	160	120	80	60	40	0	160	120	80	60	40	0
30	115	160	120	80	60	40	0	160	120	80	60	40	0
40	130	160	120	80	60	40	0	160	120	80	60	40	0
50	150	160	120	80	60	40	0	160	120	80	60	40	0

Quadro 2.3 – Quantidades de magnésio (Mg) e boro (B) a aplicar recomendadas, consoante a produção esperada e os níveis no solo, para a alface (kg/ha).

(Adaptado de: INIAV, 2022)

Nutriente	Classes de fertilidade*			
	M. Baixa	Baixa	Média	Alta
Mg	40-60	30-40	20-30	20
B	2-3	1,0-1,5	1,0	0,5

*Ajustar com o valor de pH

2.4.1.3. Necessidades hídricas

A alface apresenta, em regime convencional, um sistema radicular bastante superficial, necessitando assim de uma rega adequada para tal perfil.

Esta cultura é bastante exigente em água, mas deve haver algum cuidado no fim do período cultural pois o excesso levará a podridões do colo (Almeida, 2015). A carência de água provocará o atraso do crescimento ou até a paragem e, possivelmente, necrosamento marginal das folhas (Castro & Domingues, 2020).

Mekonnen e Hoekstra (2011), sugerem através da plataforma *Water Footprint Network*, uma pegada hídrica de 161 m³/ton para esta cultura.

2.4.1.4. Necessidade de radiação

A quantidade produzida e a qualidade das plantas está diretamente relacionada, entre outros fatores, com a qualidade e quantidade de radiação recebida.

Como visto anteriormente existem regiões do espectro que têm uma maior influência no crescimento das plantas, a região do azul e a região do vermelho. Um estudo feito em 2013, que coloca alface em crescimento sob três situações diferentes de iluminação, com lâmpadas fluorescentes, com LED's azuis e vermelhas e com LED's azuis, vermelhas e brancas, demonstra que as plantas que cresceram com as LED das 3 cores (RBW) foram as que apresentaram maior peso fresco e seco, quer na parte radicular como na parte aérea. Apresentaram também níveis mais altos de açúcares solúveis e mais baixos de nitratos. A nível sensorial foram também estas alfaces que demonstraram melhores resultados (Lin et al., 2013).

A cultura da alface necessita de um intervalo de horas-luz entre 6 e 8 horas.

2.4.1.5. A cultura da alface em sistemas de cultivo sem solo

A alface é uma cultura altamente adaptada aos sistemas de cultivo sem solo, especialmente usada em regime de filme nutritivo (NFT) podendo obter, comparando com um sistema convencional, produções 5.5 vezes mais eficientes, poupanças de água na ordem dos 80% e lucros 3.5 vezes superiores (Maestre-Valero et al., 2018).

O valor da matéria fresca média de uma planta de alface, num sistema de cultivo sem solo horizontal, é de 130 g. O tempo médio de cultura são 35 dias após período de germinação e desenvolvimento 11 dias (Both, 2002; Touliatos et al., 2016b).

2.4.2. A cultura do rabanete

O rabanete é uma cultura anual de ciclo curto e tem variedades oriundas de diferentes partes do mundo, sendo que a zona mediterrânea da Europa é tida como berço da espécie *Raphanus sativus* L. (Kaneko et al., 2007).

Quadro 2.4 – Classificação botânica do rabanete (Adaptado de: Almeida, 2015).

Família	<i>Brassicaceae</i>
Subfamília	<i>Brassicoideae</i>
Tribo	Brassiceae
Subtribo	Raphaninae
Gênero	<i>Raphanus</i>
Espécie	<i>Raphanus sativus</i> L.

O interesse na cultura do rabanete está na sua raiz carnuda, geralmente consumida em fresco. A coloração da raiz é avermelhada ou branca e pode ser globular, semi-redonda, semi-comprida e comprida (Almeida, 2015).

A forma globular é a mais pretendida no ocidente e deve ter (comercialmente) um diâmetro de 3-5 cm (Rubatzky & Yamaguchi, 2012).

2.4.2.1. Desenvolvimento e exigências ambientais

A germinação do rabanete dá-se entre 4 a 10 dias consoante o meio abiótico, tendo como temperaturas recomendadas entre os 15 e os 25 °C (Marcos Filho & Kikuti, 2006; Pedro Rau, 2017).

A sementeira deve ser feita com uma profundidade de 1 a 3 cm. Já o ciclo cultural tem um período de 20 a 40 dias consoante a época e a variedade (Pedro Rau, 2017).

Esta cultura aprecia um clima fresco e húmido para o seu crescimento, podendo as temperaturas quentes ter efeitos na qualidade da raiz aumentando a fibrosidade, aspeto considerado negativo. As temperaturas ótimas são de 18 a 22 °C durante o restante ciclo cultural, e a humidade relativa ótima encontra-se entre os 50 e os 60% (Almeida, 2015; Duan et al., 2017).

Em relação à sua relação com o solo, prefere solos leves ou médios. É moderadamente tolerante à salinidade e à acidez, tendo um intervalo de pH ótimo entre 5.5 e 7 (Maynard & Hochmuth, 2006).

2.4.2.2. Necessidades nutritivas

O ciclo cultural do rabanete é curto e como tal exige que os nutrientes estejam rapidamente disponíveis. O boro é um nutriente com especial importância para esta cultura (Almeida, 2015). Esta cultura apresenta especial sensibilidade à falta de cálcio (Ca) e magnésio (Mg).

Quadro 2.5 – Quantidades de azoto (N), fósforo (P_2O_5) e potássio (K_2O) a aplicar recomendadas, consoante a produção esperada e os níveis no solo, para o rabanete (kg/ha).

(Adaptado de: INIAV, 2022)

Produção esperada t/ha	N	Fósforo – níveis no solo (mg kg ⁻¹)					Potássio – níveis no solo (mg kg ⁻¹)				
		≤25	26-50	51-80	81-120	121-150	≤25	26-50	51-80	81-120	121-150
20	80-100	100-120	80-100	60-80	40-60	20	120-150	80-120	60-80	40-60	40
30		120-140	100-120	80-100	60-80	30	140-175	100-140	80-100	60-80	60
40		140-160	120-140	100-120	80-100	40	160-180	120-160	100-120	80-100	80

Quadro 2.6 – Quantidades de magnésio (Mg) e boro (B) a aplicar recomendadas, consoante a produção esperada e os níveis no solo, para o rabanete (kg/ha)

Nutriente	Classes de fertilidade*			
	M. Baixa	Baixa	Média	Alta
Mg	40-60	30-40	20-30	20
B	2-3	1,0-1,5	1,0	0,5

*Ajustar com o valor de pH

2.4.2.3. Necessidades hídricas

O rabanete é uma cultura com uma necessidade hídrica elevada, devendo manter um teor de humidade no solo constante, especialmente durante a altura de maturação para evitar fendilamentos (perda de valor comercial).

Hoesksra e Mekonnen (2011) sugerem através do Water Footprint Network, uma pegada hídrica de 207 m³/ton.

2.4.2.4. Necessidade de radiação

Numa experiência feita e publicada no *Annals of Botany* testou-se crescer rabanetes sobre condições selecionadas de luz em câmaras ambientais controladas a fim de monitorizar o fotoperíodo, a irradiância e a energia radiante no desenvolvimento das plantas. O desenvolvimento foliar foi particularmente afetado pela energia radiante. Já o desenvolvimento dos órgãos de armazenamento foi mais afetado pelo fotoperíodo e pela irradiância, tendo o aumento destes dois fatores um resultado de maior crescimento dos órgãos de armazenamento (Craker et al., 1983).

Outro estudo feito pela NASA, testando diferentes combinações de luzes LED no crescimento da cultura concluiu que o melhor desenvolvimento se deu perante a presença de luzes vermelhas e azuis, destacando o papel importante da luz azul (Yorio et al., 2001).

2.4.2.5. A cultura do rabanete em sistemas de cultivo sem solo

Esta cultura não é a mais famosa entre aquelas cultivadas em sistemas de produção sem solo e a razão é a formação da raiz carnuda, contudo, tem apresentado resultados bastante positivos. Nicola et al. (2004) mostra, através de uma experiência comparativa entre a produção de rabanete em substrato e no solo, que o peso fresco conseguido na produção não-convencional é maior e o peso seco menor.

A matéria fresca média (da raiz) da cultura do rabanete num sistema de cultivo sem solo horizontal é de 16 g (Ossai et al., 2020), sendo que o tempo médio de germinação e desenvolvimento em viveiro é de 14 dias e o tempo médio de cultura é de 30 dias (Sakamoto et al., 2021).

2.4.3. Cultura do coentro

O coentro, que é uma herbácea anual, é cultivada principalmente pelas suas folhas que têm um aroma característico.

Quadro 2.7 – Classificação botânica do coentro (Adaptado de: Almeida, 2015).

Família	<i>Apiaceae</i>
Subfamília	<i>Apioideae</i>
Tribo	<i>Coriandreae</i>
Gênero	<i>Coriandrum</i>
Espécie	<i>Coriandrum sativum</i> L.

É uma das plantas mais utilizadas na cozinha mediterrânea. Esta planta apresenta no seu estado vegetativo 20 a 50 cm de altura estando as folhas dispostas em roseta (Rubatzky & Yamaguchi, 2012).

2.4.3.1. Desenvolvimento e exigências ambientais

O ciclo cultural do coentro dura cerca de 2 meses após a sementeira.

A germinação dá-se aproximadamente após 15 dias (Pedro Rau, 2018), sendo a sementeira feita entre os 5 e 10 mm de profundidade (Almeida, 2015).

Esta cultura aprecia elevadas intensidades luminosas e temperaturas moderadas tendo como temperatura ideal para o desenvolvimento os 20°C e a humidade relativa entre os 50 e os 60%. O pH de referência está perto do valor de 6.5. Solos com texturas franca e franco-arenosa são os preferidos (Almeida, 2015).

2.4.3.2. Necessidades nutritivas

A cultura do coentro apresenta uma alta sensibilidade à carência de cálcio (Ca).

Quadro 2.8 – Quantidades de azoto (N), fósforo (P_2O_5) e potássio (K_2O) a aplicar recomendadas, consoante a produção esperada e os níveis no solo, para o coentro (kg/ha).

(Adaptado de: INIAV, 2022)

Produção esperada t/ha	N	Fósforo – níveis no solo (mg kg ⁻¹)					Potássio – níveis no solo (mg kg ⁻¹)				
		≤25	26-50	51-100	101-200	>200	≤25	26-50	51-100	101-200	>200
2000-3000	8-10	13-16	10-13	8-10	5-8	4	16-20	12-16	10-12	7-10	4

2.4.3.3. Necessidades hídricas

A cultura do coentro tem a particularidade de tolerar períodos sem rega relativamente longos, correspondendo à sua origem mediterrânica. Alguns estudos indicam que esta cultura pode até melhorar o seu desempenho através de regimes de rega deficitária durante fases específicas do seu desenvolvimento (Ghamarnia & Daichin, 2013; Sharangi & Roychowdhury, 2014).

Contudo, a grande maioria dos estudos e guias práticos de produção indicam uma necessidade de manter humidade constante no solo, mas que nunca seja em demasia, deixando um relevante espaço poroso para a respiração das raízes, ou seja, precisa de solos com boa drenagem.

Hoesksra e Mekonnen (2011), sugerem através do Water Footprint Network uma pegada hídrica para o coentro de 7234 m³/ton. O valor apresenta-se elevado porque o coentro produz pouca biomassa, sendo precisos muitos ciclos para atingir uma tonelada.

2.4.3.4. Necessidade de radiação

A relação do coentro com a radiação é relevante não só para o desenvolvimento da planta, mas também para a produção dos metabolitos que dão a esta cultura um papel aromático. Nguyen et al. (2020a), descobriram que, através da sua experiência com coentros sujeitos a regulação da qualidade da luz, a biomassa, o índice de clorofila e de ácido ascórbico eram significativamente maiores nas plantas crescidas sob luz conjunta de qualidades vermelha, azul e vermelha longínqua. Outro estudo semelhante diz-nos

que o efeito da luz vermelha e azul em conjunto na massa final das plantas é 16.11% e 30.61% maior do que o efeito da luz monocromática vermelha e azul, respetivamente (Gao et al., 2022).

Durante o desenvolvimento vegetativo desta cultura o fotoperíodo adequado deve encontrar-se dentro de um intervalo entre 14 e 16 horas (Dzisiahsari, 2020).

2.4.3.5. A cultura do coentro em sistemas de cultivos sem solo

A cultura do coentro em sistemas de cultivo sem solo tem particular interesse por facilitar o controlo sobre as características aromáticas das plantas, especialmente através da regulação da qualidade da luz, como visto anteriormente (Silva et al., 2022). Há uma característica particularmente interessante desta cultura nestes sistemas e que deve ser mencionada: é possível fazer crescer o coentro com elevados níveis de salinidade na água fornecida (Nguyen et al., 2020a; Silva et al., 2022).

A produtividade média por planta, em termos de matéria fresca, num sistema de cultivo sem solo em substrato (convencional) é de 40 g (da Silva et al., 2020; Silva et al., 2018). O tempo médio de germinação e desenvolvimento em viveiro é de 15 dias e o tempo de cultura é de aproximadamente 30 dias (Nguyen et al., 2020b; Santos Júnior et al., 2015).

3. Materiais e Métodos

O ensaio experimental desenvolvido para a realização desta dissertação realizou-se no ISA (Instituto Superior de Agronomia), na secção de Engenharia Rural.

Ao longo deste período experimental procurou-se produzir, desde a sementeira até à colheita, três espécies de hortícolas (alface, rabanete e coentro) e avaliar o tempo de produção, o seu desempenho, o peso final das plantas (fresco e seco) e os consumos hídricos e energéticos requeridos.

O sistema hidropónico rotativo foi instalado numa sala do edifício Sertório do Monte Pereira, abaixo do nível do solo, com acesso a uma pequena janela que fornece luz natural e a uma outra sala, também ela com acesso a luz natural.

O período experimental sucedeu-se entre 23 de janeiro e 17 de julho de 2023, sendo que a montagem do sistema se deu nos dias 17 e 18 de novembro do ano anterior.

Foram feitas 3 épocas de produção, sendo que se foi adaptando a radiação, a rega, o tempo cultural e a distribuição das plantas no sistema ao longo do período experimental.

O método de trabalho prático foi o seguinte:

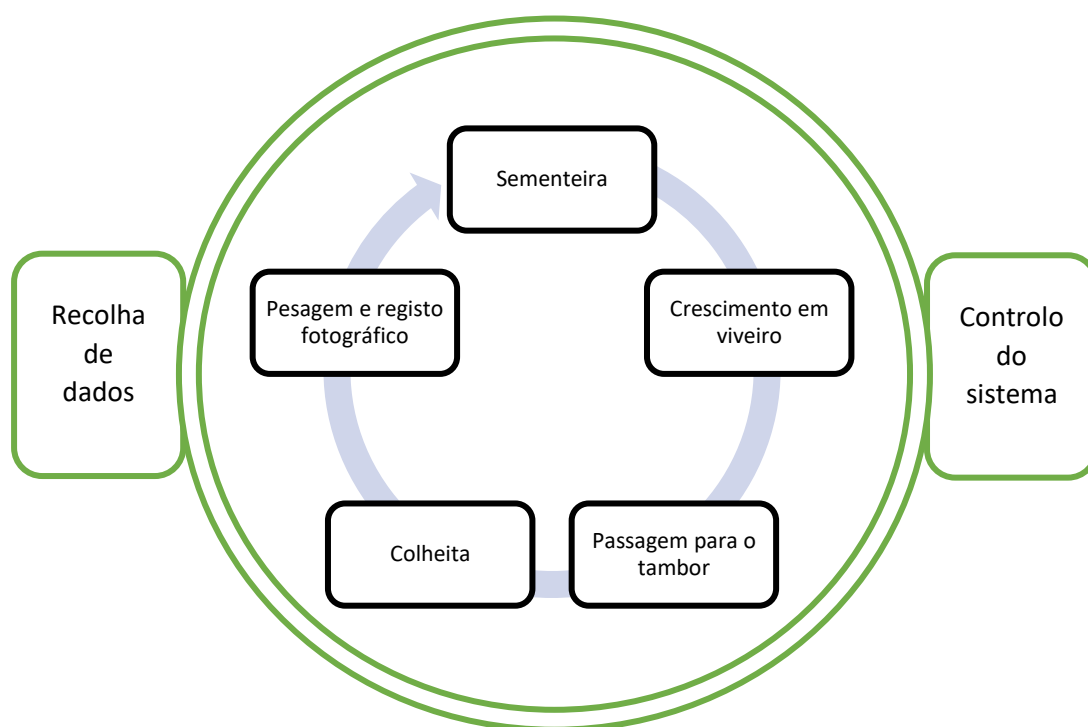


Figura 3.1 – Representação esquemática da componente prática realizada.

3.1. O sistema

O modelo utilizado foi o OGarden smart da empresa OGarden Group, sediada no Canadá. Este modelo não foi concebido para produções industriais, mas sim para uso doméstico, tendo como objetivo que cada pessoa possa ter em sua casa uma produção própria de vegetais (que possivelmente não precisam de herbicidas ou pesticidas) e que exige uma manutenção mínima, sendo a rega e o tempo de irradiação totalmente automatizados.

O OGarden smart é constituído por um módulo principal que inclui o depósito de água e o sistema de bombeamento, o tabuleiro de germinação (viveiro), o computador de automatização e monitorização das operações, o motor que faz girar as quatro rodas dentadas que vão encaixar no tambor de produção, o reservatório de rega do tambor (no topo do módulo) e o sistema de iluminação.

No topo do módulo principal está colocado o tambor rotativo encaixado nas quatro rodas dentadas.

O tabuleiro de germinação suporta até 30 plantas e o tambor suporta um máximo de 60 plantas, ou seja, no total o equipamento pode ter em produção 90 plantas.

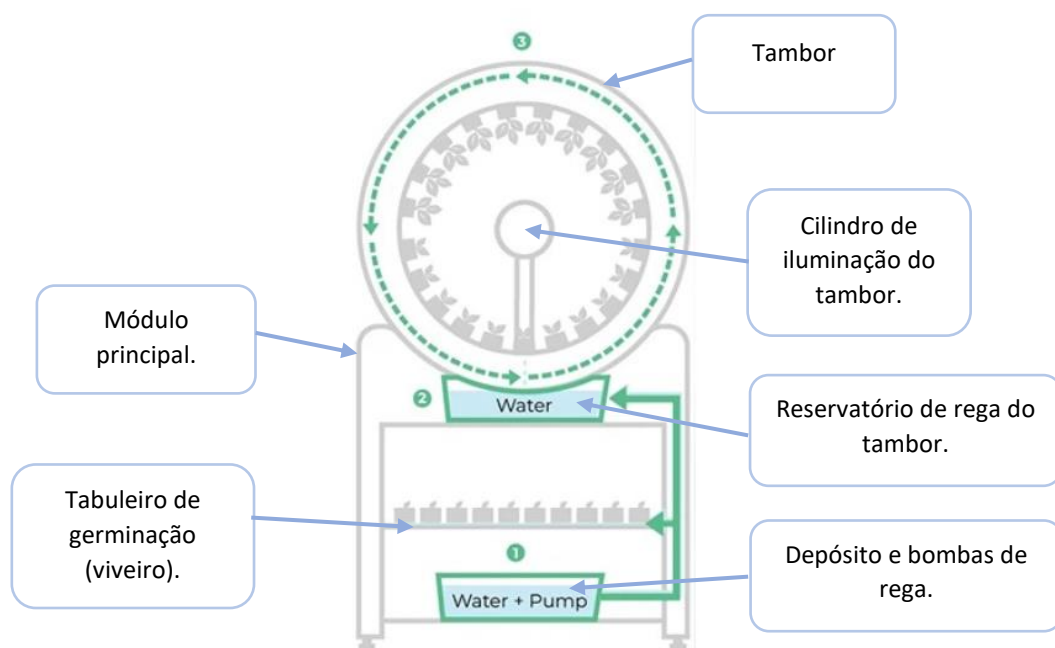


Figura 3.2 – Esquema do sistema OGarden smart.

(Adaptado do site: OGardensmart, 2023)

3.1.1. Modo de funcionamento

Para descrever o modo de funcionamento do sistema OGarden smart iremos ramificar em quatro partes: o subsistema mecânico, o subsistema de iluminação, o subsistema de rega e o subsistema de automatização.

- Subsistema mecânico

Como explicado anteriormente, existe um tambor rotativo em cima do módulo principal. As extremidades do tambor são dentadas e encaixam nas quatro rodas dentadas do módulo principal. As duas rodas dentadas dianteiras estão ligadas a um pequeno motor elétrico que as faz girar e, por conseguinte, faz rodar o tambor.

Cada volta do tambor tem a duração de 22 minutos, ou seja, o tambor dá cerca de 65 voltas por dia (24 horas). Por cada volta dada, os substratos permanecem 2 minutos e 30 segundos em contacto com o reservatório.

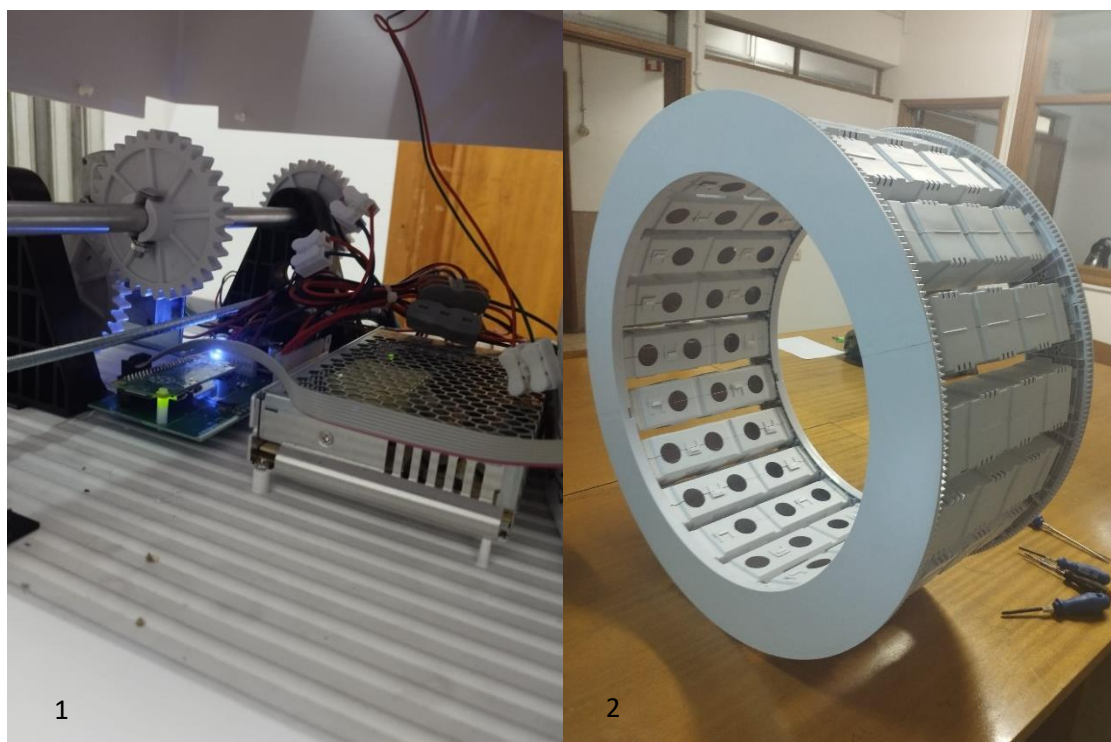


Figura 3.3 – Imagens do sistema mecânico.

1 – Motor elétrico e rodas dentadas dianteiras, 2 – Tambor com extremidades dentadas.

- Subsistema de iluminação

O sistema de iluminação está presente no viveiro e como eixo do tambor.

No viveiro apresenta-se com a mesma dimensão do tabuleiro de germinação, ou seja, cobrindo toda a superfície onde se encontram os substratos e as plantas. É constituído por 56 lâmpadas de emissão de radiação vermelha, por 8 lâmpadas de emissão de radiação azul e por 171 lâmpadas de emissão de radiação branca perfazendo um total de 235 lâmpadas.

No tambor as lâmpadas estão dispostas em torno de um cilindro (360 °) que se encontra como eixo. Aqui encontramos uma totalidade de 432 lâmpadas sendo que 108 são de emissão de radiação vermelha, 36 de radiação azul e 288 de radiação branca.

As lâmpadas estão distribuídas de acordo com um padrão regular que fornece a radiação de diferentes comprimentos de onda homogeneamente.

O fotoperíodo foi igual nas duas últimas épocas (13.5 horas) e diferente na primeira (16 horas).

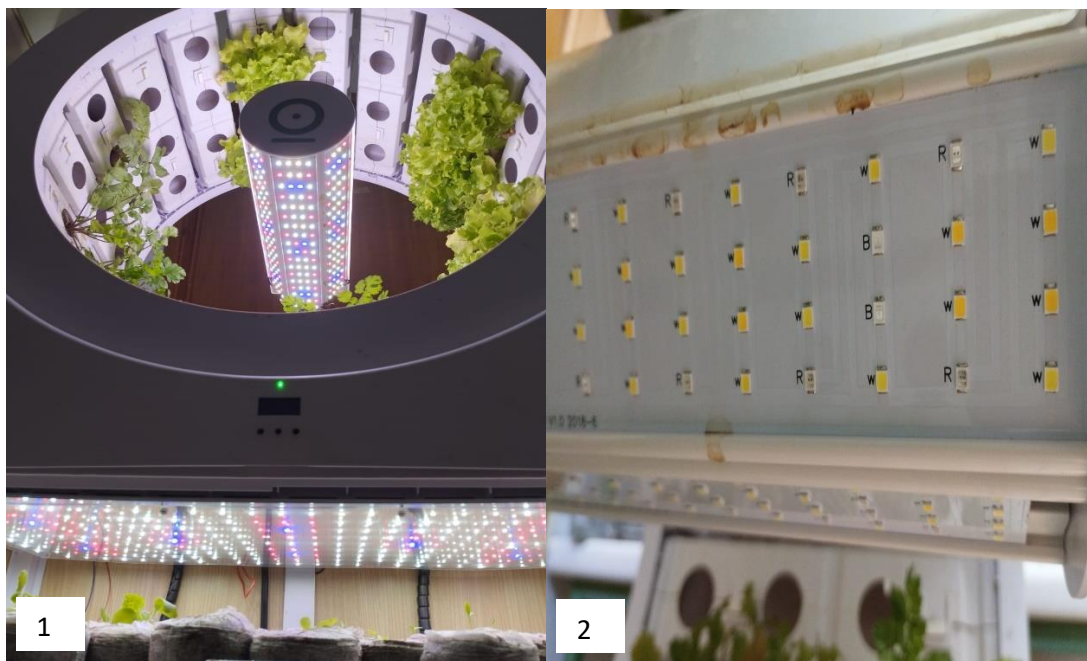


Figura 3.4 – Imagens do sistema de iluminação do sistema OGarden Smart.

1 – Sistema de iluminação do viveiro e do tambor rotatório, 2 – Lâmpadas LED de diferentes cores, pormenor de distribuição.

- Subsistema de rega

O sistema de rega tem o seu início no depósito que se encontra na base do módulo principal (como se pode observar na figura 3.1), tendo este uma capacidade de 12 L. No interior do depósito podemos encontrar duas bombas de água submersas de 24 volts (V), uma para levar água até ao tabuleiro de germinação e outra para o reservatório no topo do módulo principal que alimentará as plantas do tambor.

Tanto no tabuleiro de germinação como no reservatório do tambor existem sensores que indicam o limiar máximo de água que estes dois suportes podem receber, quando estes sinalizam a presença de água, são desligadas automaticamente as bombas.

As bombas possuem também um sensor que lhes indica o nível da água dentro do depósito, fazendo com que, quando o nível de água é baixo, as bombas desliguem de maneira a evitar que trabalhem a seco.

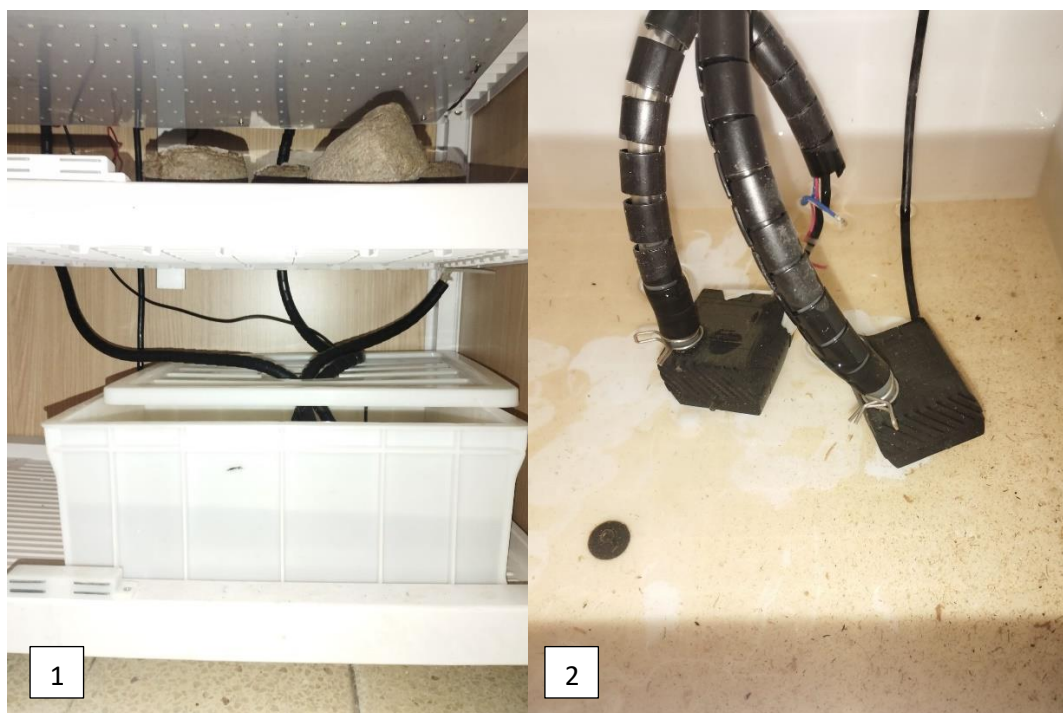


Figura 3.5 – Reservatório e bombas (2) do sistema de rega do OGarden Smart.

- Subsistema de automatização

O sistema de automatização controla todos os sistemas anteriormente descritos, facilitando desta maneira a gestão do equipamento pelo utilizador.

Na superfície frontal do equipamento existe um computador onde se pode modular o funcionamento de acordo com as necessidades. No menu do ecrã podemos observar os seguintes detalhes:

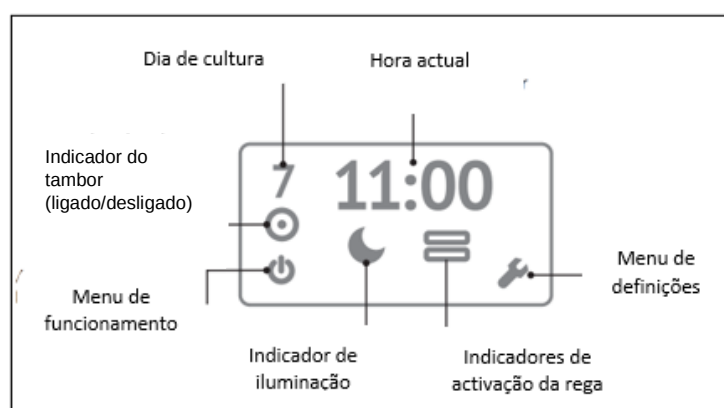


Figura 3.6 – Ecrã presente na superfície frontal do equipamento.

(Adaptado do site: RotaryGarden, 2023)

No menu das definições poderemos então definir os períodos de iluminação e a frequência de rega (não sendo a frequência do tabuleiro de germinação necessariamente igual à do reservatório do tambor). Já no menu de funcionamento podemos ativar o funcionamento do tabuleiro de germinação e do tambor, funcionando estes independentemente.

O período de iluminação é contínuo, não se podendo intercalar períodos de iluminação com períodos escuros mais do que uma vez, simulando o dia e a noite, mas com a particularidade de o utilizador poder alterar a duração do período de iluminação conforme as suas necessidades.

A frequência de rega tem um esquema predefinido tanto para o tabuleiro de germinação (Quadro 3.1) como para o reservatório do tambor (Quadro 3.2). Contudo esta frequência predefinida pode ser alterada conforme haja essa necessidade, podendo-se aumentar ou diminuir o espaçamento temporal entre regas, mas não a quantidade de água fornecida em cada rega.

Quadro 3.1 – Frequência de rega predefinida para o tabuleiro de germinação.

Frequência predefinida	Quantidade (ml)
Dia 1 (fase inicial)	1700
Dia 1 + 12 H (fase inicial)	1700
7 dias depois (fase regular)	1135
6 dias depois	1135
5 dias depois	1135
4 dias depois	1135
3 dias depois	1135
Frequência permanente de 3 dias	1135

Quadro 3.2 – Frequência de rega predefinida para o reservatório do tambor.

Frequência predefinida	Quantidade (ml)
Frequência permanente de 3 dias	5665

Durante as três épocas de produção, a frequência de rega foi sendo alterada conforme os moldes apresentados no parágrafo anterior. Em relação ao viveiro a frequência de rega foi igual nas três épocas de produção, tendo sido a predefinida. Já no tambor houve alterações entre épocas e dentro da mesma época. Assim sendo, na primeira época o sistema de rega funcionou de modo predefinido, ou seja, com três dias de distância. Contudo, na segunda época, o sistema de rega debitou com uma frequência inicial de dois dias e meio, passando para uma frequência de um dia e meio a partir da segunda semana de produção no tambor até à colheita dos rabanetes e, depois, alternou para uma frequência de dois dias até à colheita das alfaces e dos coentros. Já na terceira época, em que os rabanetes entraram no tambor três dias antes das restantes culturas, a frequência inicial foi de dois dias e meio, de um dia e meio desde a entrada das alfaces e coentros até à colheita dos rabanetes e de dois dias e meio até à colheita das outras duas culturas.

3.2. Sensor de temperatura e humidade

Foi usado um sensor de temperatura e humidade, colocado perto do equipamento, de modo a registar estas variáveis durante todo o processo produtivo.



Figura 3.7 – Sensor de humidade e temperatura DLP-TH1.

O sensor utilizado foi o DLP-TH1 e esteve ligado a um computador, entrando em funcionamento no dia 27 de janeiro até ao fim do tempo de experimentação, para recolher dados a cada hora. No computador esses dados são processados pelo software DLP-TH1 application, sendo apresentados em modo gráfico instantaneamente e com um histórico tabelado.

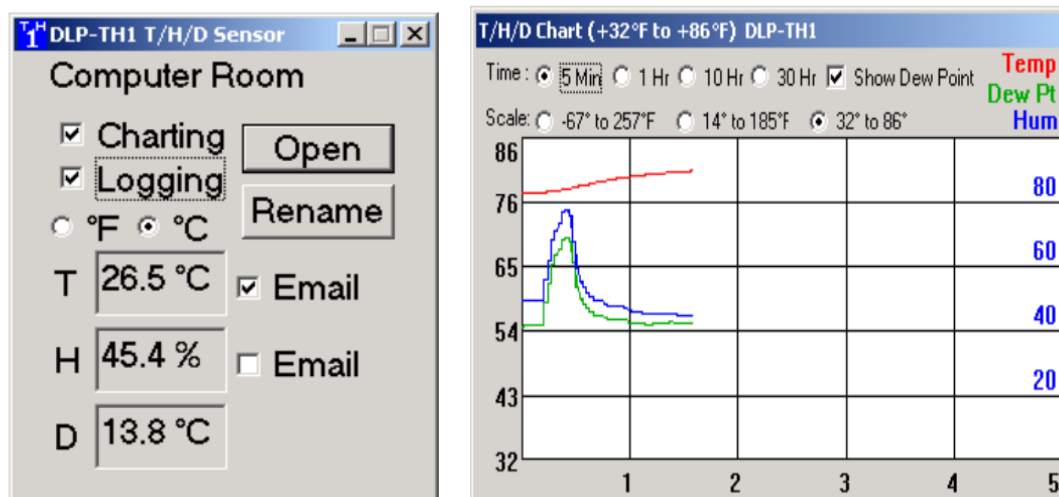


Figura 3.8 – Exemplificação do software DLP-TH1 application (site-DLP Design, 2023).

3.3. Consumos energéticos

Para delinear os gastos energéticos do equipamento, foi usado o contador de energia SmartLife Smart Plug (figura 3.7). Este contador funciona como tomada elétrica que se liga diretamente ao telefone e regista os consumos instantâneos.

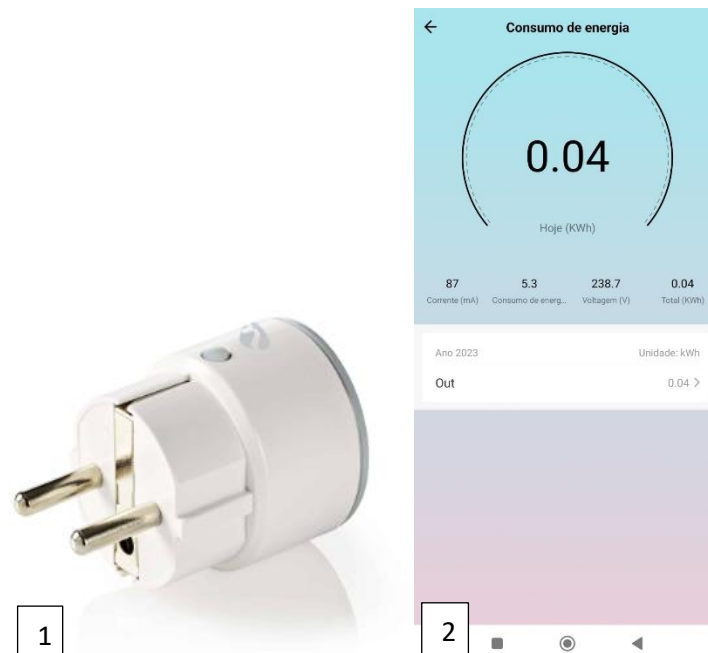


Figura 3.9 – (1) Tomada elétrica “SmartLife Smart Plug” e (2) layout da aplicação de apresentação dos consumos.

Desta maneira foi possível medir o consumo energético em vários cenários de utilização do equipamento: 1) com o tambor e viveiro preenchidos e as bombas de água a funcionar; 2) apenas com o viveiro e a correspondente bomba de água a funcionar; 3) apenas com o tambor e a correspondente bomba de água a funcionar; 4) apenas com as luzes acesas e bombas paradas; 5) com as luzes desligadas e o tambor a funcionar.

3.4. O substrato utilizado

O substrato utilizado veio na forma de cápsulas cilíndricas (pellets) envoltas numa membrana biodegradável que garante a manutenção da forma cilíndrica durante todo o período de utilização. Cada cápsula contém o substrato e o fertilizante de libertação lenta (não especificados pela empresa fornecedora) que ajudará no crescimento saudável das plantas.

O substrato utilizado é composto por turfa e 10% de perlite (caracterizados no capítulo 2.1.3.2).

Foi feita uma análise no laboratório de pedologia do ISA ao substrato (Anexo I), tendo sido obtidos valores de azoto total e de potássio e fósforo extraíveis (quadro 3.3).

Quadro 3.3 – Análise N-P-K ao substrato utilizado.

K ext (mg kg ⁻¹)	P ext (mg kg ⁻¹)	N total (g kg ⁻¹)
3383.8	55.45	6.72

Antes de serem utilizadas, as cápsulas estão comprimidas, esterilizadas e sofreram uma secagem rápida de alta temperatura. Ao interagirem com a água ganham volume, como se pode observar na figura 3.8, aumentando o volume três a quatro vezes.

Após a colocação da semente no substrato, é colocada vermiculite para fazer um isolamento da superfície e manter humidade junto da semente em germinação.

Os substratos foram humedecidos antes da sementeira nas últimas duas épocas de produção. Tal humedecimento não foi feito na primeira época, sendo os resultados estudados no capítulo 4.

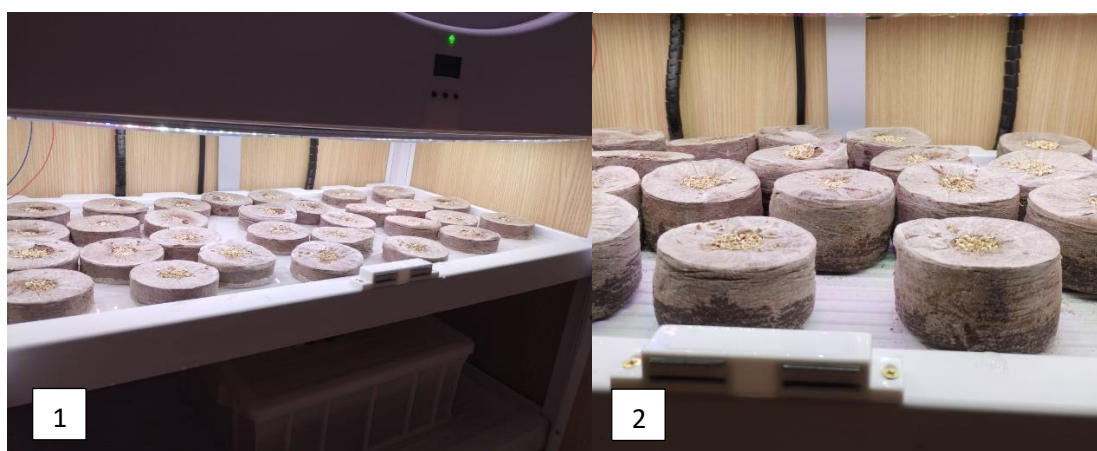


Figura 3.10 – Comparação entre cápsulas de substrato comprimido (1) e cápsulas expandidas (2).

3.5. A produção de comparação

Para avaliar o desenvolvimento das plantas no sistema de cultivo sem solo, foi colocado no mesmo espaço um sistema de cultivo sem solo horizontal, de rega manual e iluminação natural (figura 3.10).

Foi feita também uma produção de comparação, no mesmo sistema que a anterior, em estufa.

O substrato usado foi exatamente o mesmo e a altura de água fornecida ao tabuleiro de germinação do sistema OGarden smart foi a mesma que a fornecida ao tabuleiro de comparação. A frequência de rega foi também igual.

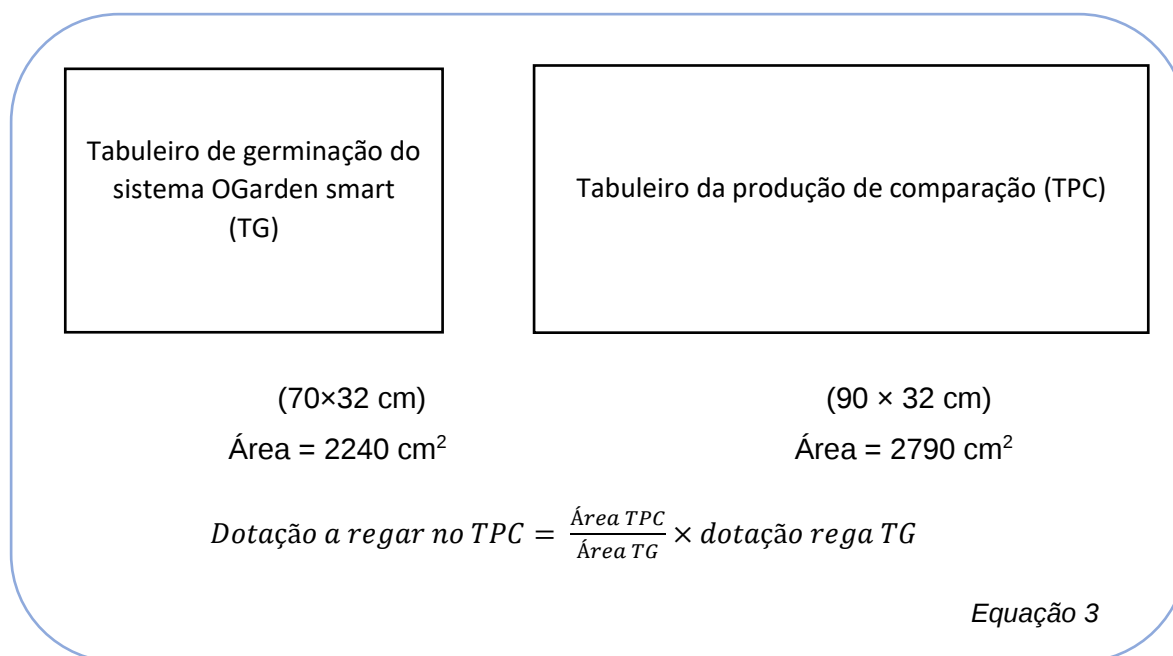


Figura 3.11 – Dimensão e cálculo da dotação de rega no tabuleiro da produção de comparação.

Quadro 3.4 – Dotações no tabuleiro de produção de comparação mantendo a altura de água presente no tabuleiro de germinação do OGarden Smart. A fase inicial corresponde aos primeiros dois dias.

Fase de rega	Dotação de rega no TG (ml)	Dotação de rega no TPC (ml)
Fase inicial	1700	2117.4 (≈2120)
Fase regular	1135	1413,7 (≈1415)

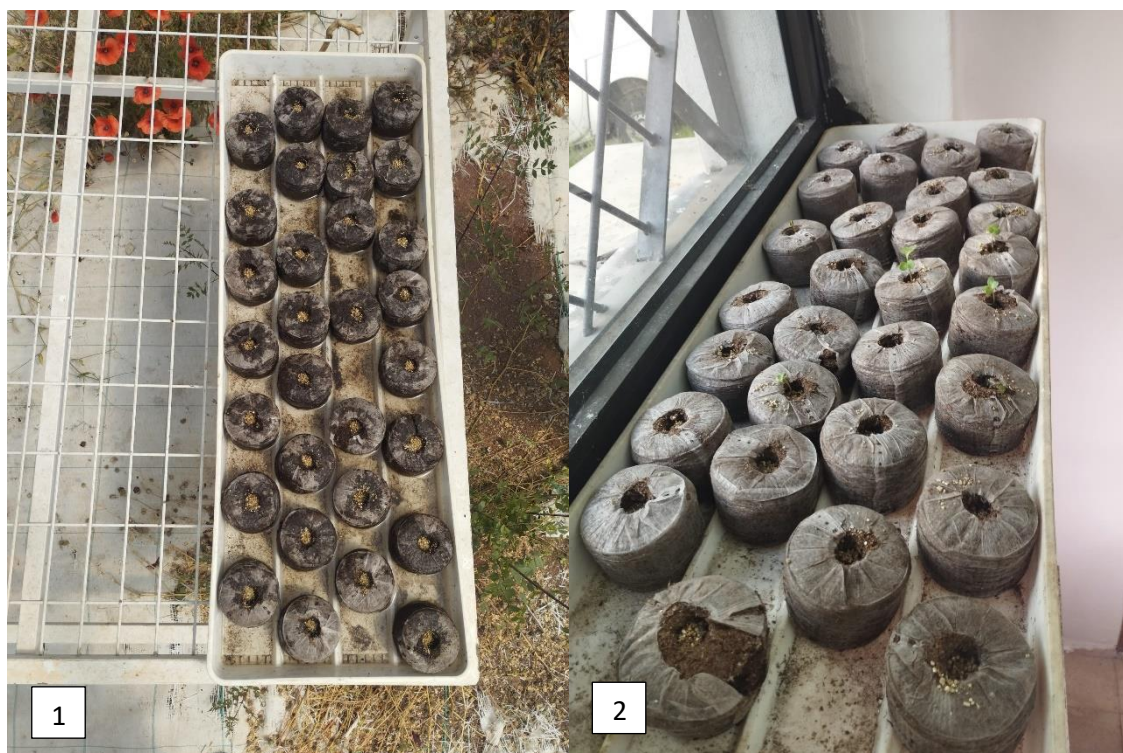


Figura 3.12 – Tabuleiros de produção de comparação. 1 – em estufa, 2 – no mesmo espaço que o sistema.

Faz-se saber que, em nenhuma das épocas de produção do sistema convencional, surgiu uma biomassa de interesse de onde pudessem resultar dados comparativos com o sistema OGarden smart.

3.6. Cálculo da eficiência do uso de água.

Para entender a eficiência do uso de água de cada época (no tambor), calculou-se a eficiência do uso de água considerando como biomassa toda a matéria verde fresca presente no tambor.

$$WUE = \frac{\text{Biomassa fresca produzida na vaga } x \text{ (g)}}{\text{Quantidade de água fornecida à vaga } x \text{ (L)}}$$

Equação 4

3.7. Pesagem dos produtos finais

Acabada a produção no sistema OGarden Smart, as plantas foram depois pesadas (balança de precisão *Kern PKS*) em fresco, no caso do rabanete separando a parte aérea da parte radicular, e, depois, colocadas numa estufa de secagem a 72 °C até que se estabilizasse o peso (seco). O peso da matéria seca foi, depois, anotado.



Figura 3.13 – Preparação após pesagem (1), colocação em estufa de secagem (2) e matéria seca após secagem (3) de rabanetes.

3.8. Recolha de dados

A recolha de dados foi feita ao longo do período experimental, acompanhando as diferentes épocas de produção.

Os dados relativos a cada época de produção foram recolhidos da seguinte maneira:

- 1) Datas de sementeira;
- 2) Taxas de germinação ao longo do período de viveiro;
- 3) Fotoperíodo concedido às plantas em viveiro;
- 4) Quantidade de água fornecida às plantas no viveiro e datas de rega;
- 5) Data de mudança para o tambor;
- 6) Fotoperíodo concedido ao longo da produção no tambor;
- 7) Quantidade de água fornecida às plantas no tambor e datas de rega;
- 8) Data de colheita ou corte;
- 9) Peso fresco das plantas produzidas;
- 10) Peso seco das plantas produzidas;

Os dados relativos a todo o período experimental foram os seguintes:

- 1) Temperatura e humidade (sensor DLP-TH1);
- 2) Duração de uma volta completa do tambor;
- 3) Número de voltas completas do tambor por dia (24 H);
- 4) Duração do contacto do substrato com a água por volta completa do tambor;
- 5) Número de lâmpadas azuis, brancas e vermelhas no viveiro e no tambor rotativo;
- 6) Consumo energético do sistema de iluminação;
- 7) Consumo energético do sistema mecânico;
- 8) Consumo energético do sistema de rega;
- 9) Consumo energético com o viveiro e o tambor em produção;
- 10) Consumo energético com apenas o viveiro em produção;
- 11) Consumo energético com apenas o tambor rotativo em produção.

3.9. Tratamento de dados

Os dados recolhidos foram organizados em Excel e tratados estatisticamente na plataforma R (<https://www.r-project.org/>).

Foram analisados três factores: a data (com três épocas como níveis – época 1, época 2 e época 3); a planta (tendo como níveis três culturas – alface, rabanete e coentro); o sistema (sendo os níveis os métodos de produção O Garden e convencional). As variáveis resposta analisadas foram a biomassa (em termos de matéria seca e matéria fresca), a rega (em função do sistema) e a taxa de germinação (também em função do sistema).

Em Excel foram elaborados gráficos para reportar variações em cada variável. Já no programa R foi analisada a relação entre factores. Inicialmente optou-se por fazer análises de variância (ANOVA), contudo os pressupostos desta análise não eram verificados, retirando validade à análise e, portanto, avançou-se para os testes não paramétricos (Kruskal-Wallis) usados para comparar as posições relativas dos dados ordenados entre três ou mais grupos independentes. O teste de Kruskal-Wallis faz uma seriação das amostras e compara a posição média relativa de cada nível do factor, ou seja, estabelece a classificação das posições associadas ao nível do factor.

O valor de significância estatística escolhida foi de 0.05. Aquando da visualização dos resultados do teste não paramétrico é fornecido um “p-value” que nos indica se há diferenças significativas entre os grupos. Sendo o valor apresentado menor que 0.05 então poder-se-á rejeitar a hipótese nula e concluir que existem diferenças significativas entre grupos de dados.

Como apoio à análise dos resultados estatísticos foram elaborados gráficos. Para ajudar a entender o não cumprimento dos pressupostos da análise de variância (ANOVA) foi observado o gráfico “residuals vs fitted” (resíduos versus valores ajustados), em que os pontos devem formar um padrão em redor de uma linha horizontal, caso contrário indica a não normalidade do modelo, e o gráfico “Q-Q residuals” (Resíduos Quantil-Quantil) que nos ajuda também a verificar a normalidade da distribuição dos resíduos, sendo que se os pontos seguirem a linha diagonal apresentada verifica-se o pressuposto de normalidade.

Para melhor interpretar os resultados dos testes não-paramétricos de Kruskal-Wallis foram elaborados diagramas de extremos e quartis, de modo a tornar evidentes diferenças entre grupos que não foram evidentes na análise sumária.

4. Apresentação e discussão dos resultados

4.1. Taxas de germinação

Ao longo do tempo de germinação, tanto no sistema convencional como no OGarden smart, foram anotadas as taxas de germinação de cada cultura. Em cada época foram semeadas dez plantas de cada cultura e, portanto, cada planta germinada corresponde a 10%.

Apresentam-se no quadro 4.1 as taxas de germinação de cada cultura por época de produção.

Quadro 4.1 – Taxas de germinação nas diferentes épocas e sistemas.

	OGarden smart			Convencional		
	Época 1	Época 2	Época 3	Época 1	Época 2	Época 3
Alface	80%	80%	50%	60%	90%	10%
Rabanete	90%	90%	90%	90%	90%	80%
Coentro	60%	90%	60%	80%	70%	60%

Foram então feitos dois testes não paramétricos de Kruskal-Wallis para comparar as taxas de germinação entre sistemas e entre culturas.

A comparação estatística entre sistemas não favoreceu o OGarden smart ($p=0.514$), assumindo como resultado a inexistência de diferenças significativas entre os dois sistemas (resultado estatístico do teste alocou os dois sistemas ao mesmo grupo). Calculando as médias de germinação entre sistemas com os dados do quadro anterior chegamos aos resultados de 78% para o OGarden smart e 70% para o sistema convencional, confirmando a estatística anteriormente referida.

Já a comparação estatística entre plantas, feita através do mesmo teste, demonstrou que o rabanete tem uma taxa de germinação, no total dos dois sistemas, bastante superior às outras duas culturas, afirmando que a alface e o coentro pertencem ao mesmo grupo estatístico e que o rabanete pertence a outro superiormente colocado ($p=0.053$). Outra vez estes dados confirmam-se realizando um cálculo da média de germinação de cada planta, na totalidade das épocas e sistemas: 63% para a alface; 88% para o rabanete e 70% para o coentro.

Nas figuras 4.2, 4.3 e 4.4 podemos observar a evolução da germinação em cada sistema na primeira, segunda e terceira épocas, respetivamente. A primeira data que se

pode observar diz respeito à primeira observação após a sementeira, a última data refere-se à data de saída do tabuleiro de germinação e entrada no tambor, ou seja, ao dia em que as plantas do sistema OGarden smart já tinham desenvolvimento suficiente para integrarem o sistema rotativo.

Nas primeiras duas épocas, à data da primeira observação, a germinação deu-se primeiro no sistema OGarden smart. Na segunda época já tinha ocorrido germinação nos dois sistemas à data da primeira observação, contudo, a taxa de germinação no sistema OGarden foi maior.

Em todos os casos, com exceção dos coentros da primeira época, a germinação no sistema OGarden foi maior ou igual ao sistema convencional. O rabanete conseguiu obter uma taxa de germinação temporalmente mais rápida em todas as épocas. O mesmo se pode dizer para a cultura da alface, que embora tenha perdido vantagem na segunda época no dia 3 de abril, registou maioritariamente vantagem perante o sistema concorrente.

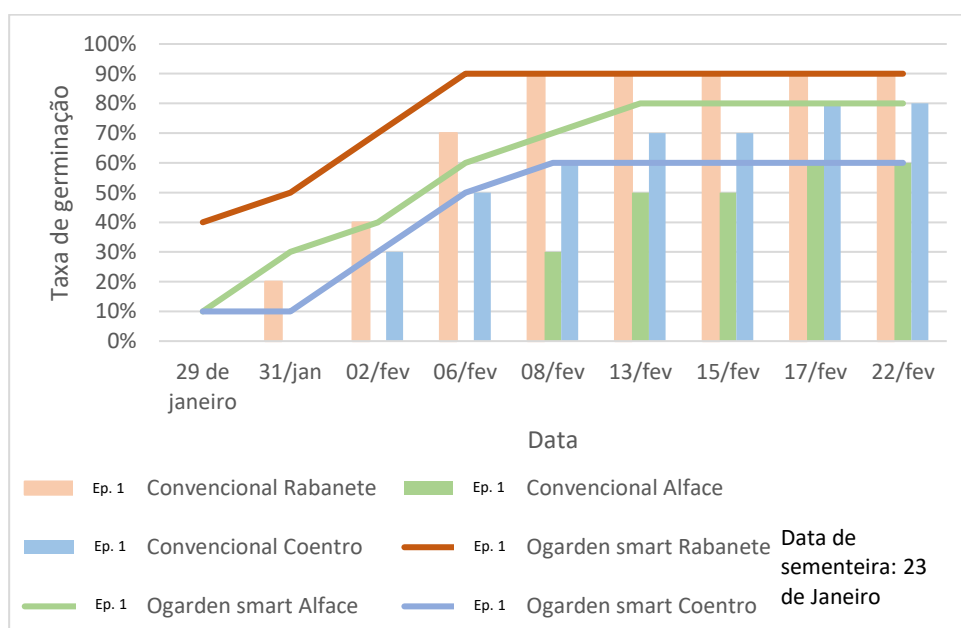


Figura 4.2 – Comparação temporal entre a germinação no sistema Ogarden smart e no convencional durante a primeira época.

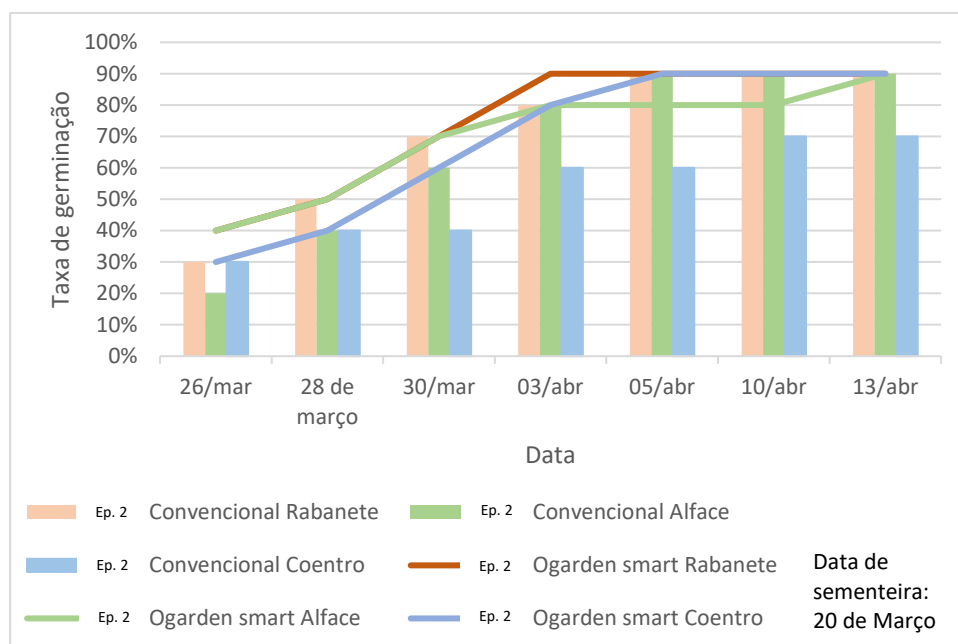


Figura 4.3 - Comparação temporal entre a germinação no sistema Ogarden smart e no convencional durante a segunda época.

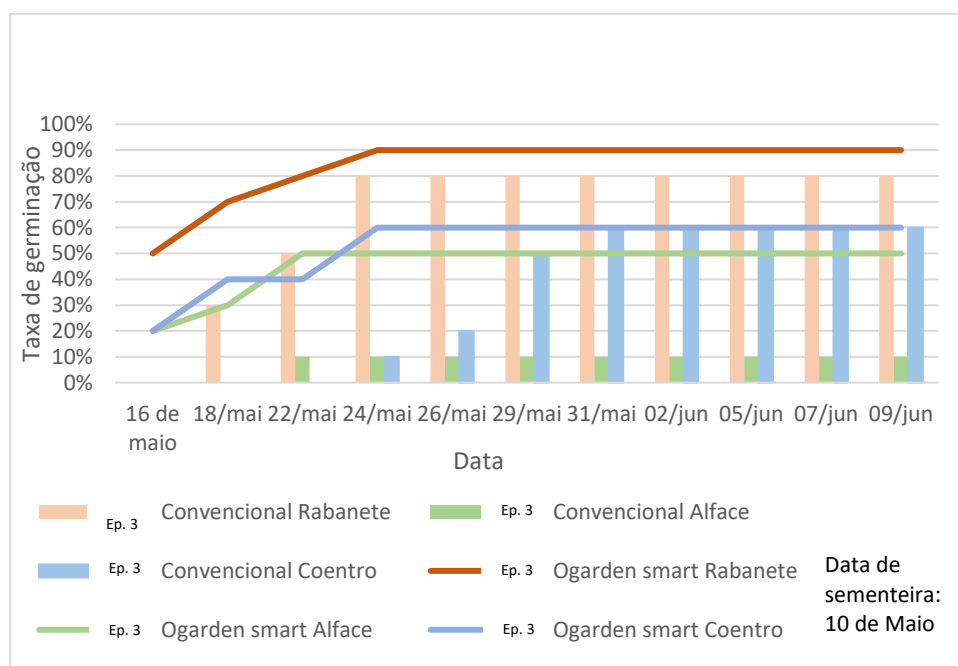


Figura 4.4 - Comparação temporal entre a germinação no sistema Ogarden smart e no convencional durante a terceira época.

Embora não se consiga observar nos gráficos acima o desenvolvimento ocorrido nas plantas germinadas no OGarden smart, este foi muito superior àquele ocorrido no sistema convencional, podendo-se comprovar tal afirmação analisando as imagens comparativas presentes na figura 4.5. Deve-se, aliás, referir que embora as taxas de germinação não se tenham diferenciado muito entre os dois sistemas, o

desenvolvimento das plantas germinadas no convencional foi quase nulo, tendo as plantas estiolado (alongamento disfuncional do caule na busca de luz) e cessado o crescimento imediatamente.

Recuperando uma frase escrita no capítulo de revisão bibliográfica que diz que “(...) mais do que fornecer energia para a fotossíntese a radiação actua sobre o desenvolvimento e o metabolismo das plantas através de complexos sinais químicos, tendo, por isso, a quantidade de radiação (intensidade e fotoperíodo) e a qualidade (composição espectral) um grande efeito no crescimento e na fisiologia das plantas”, encontramos nesta análise experimental um resultado claro. A intensidade luminosa fornecida no viveiro, conjugada com um fotoperíodo mais prolongado e consistente do que aquele (natural) fornecido ao sistema convencional, e com a composição espectral mais variada, levou a um desenvolvimento maioritariamente mais rápido e saudável.



Figura 4.5 – Desenvolvimento das plantas germinadas em ambos os sistemas. 1 (rabanete), 2 (alface) e 3 (coentro) – Sistema O'Garden smart. 4 (coentro), 5 (rabanete) e 6 (alface) – Sistema convencional. As fotografias foram tiradas na mesma data (13 de fevereiro).

Ao observar a figura acima, podemos ainda referir alguns detalhes causados pela variada composição espectral do viveiro: o número de folhas novas elevado, resultando da presença de radiação na zona espectral vermelha; a expansão foliar (visível especialmente na alface e no rabanete) atribuída à radiação da zona espectral azul e vermelha e o porte compacto das plantas (das três culturas) relacionado, segundo a revisão bibliográfica feita anteriormente, com a presença de radiação azul.

4.2. Tempos de cultura por época

Os dados referentes à data de sementeira e o dia de colheita foram recolhidos e tratados como exemplificado nas figuras 4.6 e 4.7. Foi de interesse analisar os tempos de cultura para cada espécie, ou seja, o número de dias desde a sementeira até à colheita, para que se pudesse justificar potenciais diferenças em termos de massa final (fresca e seca), de análise de rega e de adaptação ao próprio sistema.

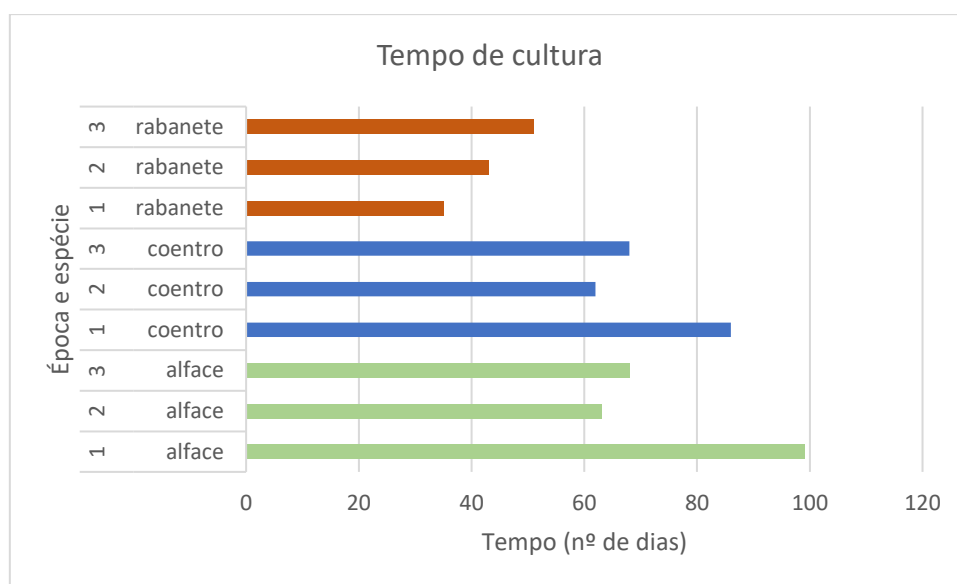


Figura 4.6 – Tempos de cultura de cada espécie em cada uma das três épocas.

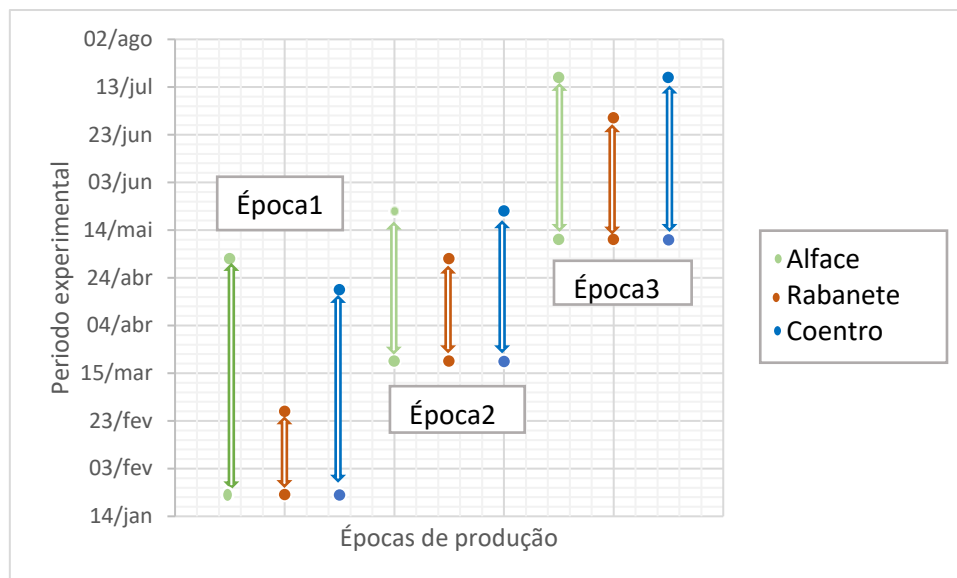


Figura 4.7 – Posicionamento temporal de cada época e espécie ao longo do período experimental.

Como se pode observar na figura 4.7, a segunda e terceira épocas começam antes da colheita da época anterior, isto acontece porque no período final de cada época já não se está a utilizar o viveiro, podendo-se começar uma nova época no período de desenvolvimento da época anterior.

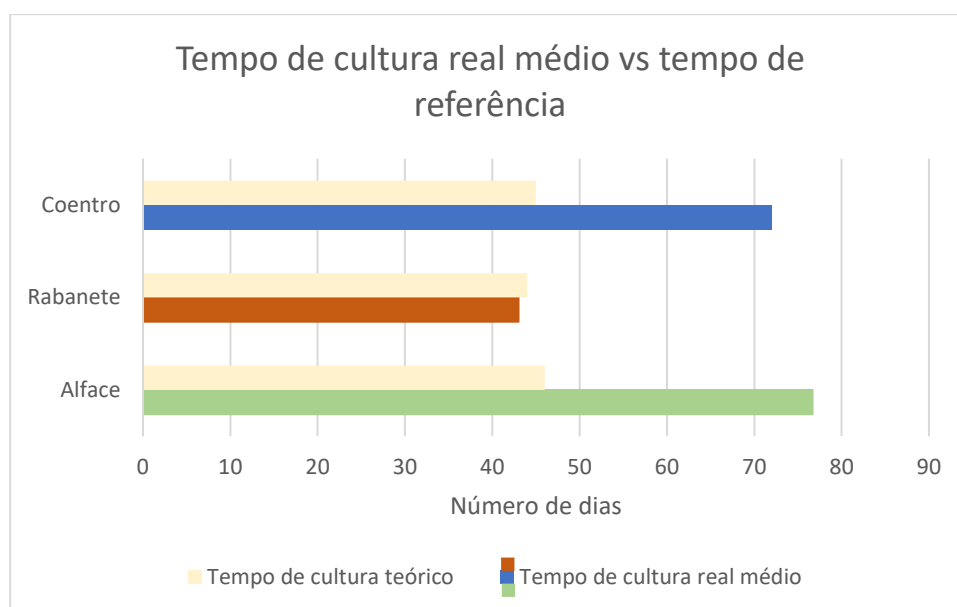


Figura 4.8 – Comparação entre o tempo cultural médio do conjunto das três épocas e o tempo cultural teórico em sistemas de cultivo sem solo horizontais.

Na figura 4.8 podemos observar a comparação entre a média dos tempos de cultura das três épocas e aquele usado como exemplo de referência no último subcapítulo de cada cultura do capítulo 2.4.

Destaca-se o rabanete com um tempo de cultura ligeiramente inferior. Já as outras duas culturas apresentam tempos de cultura muito superiores em relação aos teóricos. Convém, porém, referir que a colheita só foi feita quando era possível, havendo a impossibilidade de aos fins-de-semana ou feriados haver alguma operação cultural, ou mesmo em dias da semana incompatíveis com os horários pessoais, levando a um ligeiro aumento cultural em alguns casos. É também importante referir que o coentro sofreu três cortes na primeira época, prolongando o seu tempo de cultura e aumentando a média, e nas restantes épocas o critério de colheita foi a máxima produção por planta. Já a alface prolongou o tempo de cultura no OGarden smart porque, de facto, não se desenvolveu até dimensões inicialmente desejadas.

4.3. A matéria fresca e seca das culturas

No fim de cada época, como explicado anteriormente, foi feita uma pesagem da matéria fresca e da matéria seca. Tendo em conta que o sistema convencional não funcionou no desenvolvimento das culturas, impossibilitou-se a pesagem das plantas neste sistema. Com os dados recolhidos foi feito um tratamento estatístico de modo a entender qual a época mais produtiva para cada cultura.

Foram analisadas as médias de cada cultura por época, apresentando-se os valores no quadro 4.2. Foi também analisada a totalidade de matéria fresca e seca de cada cultura em cada época, como se pode observar no quadro 4.3.

Quadro 4.2 – Média da matéria fresca e seca (g) de cada cultura (por planta) por época de produção. Letras diferentes correspondem a valores significativamente diferentes de acordo com o teste de Kruskal-Wallis com $\alpha=0.05$

MF (g)				MS (g)		
Época	Alface	Rabanete	Coentro	Alface	Rabanete	Coentro
Época 1	13.21 ab	9.43 a	10.41 a	1.35 b	0.67 b	2.6 a
Época 2	14.37 a	10.93 a	8.89 a	1.83 a	1.06 ab	1.27 b
Época 3	6.94 b	8.27 a	8.12 a	0.68 b	1.04 a	1.22 b

Quadro 4.3 – Matéria fresca e seca (g) totais de cada cultura para cada época de produção.

	MF total (g)			MS total (g)		
Época	Alface	Rabanete	Coentro	Alface	Rabanete	Coentro
Época1	105.7	84.9	62.5	10.8	6	15.6
Época2	129.3	98.4	80	16.5	9.5	11.4
Época3	34.7	74.5	48.7	3.4	9.4	7.3

É perceptível, ao analisar o quadro 4.2, que:

- No caso da alface, em termos de matéria fresca, a segunda época foi mais produtiva que a primeira e significativamente mais produtiva que a terceira. Em termos de matéria seca, a segunda época é a que demonstra maior biomassa, mas difere pouco da primeira época e, mais uma vez, difere significativamente da terceira época.

É oportuno referir que a terceira época teve, como é possível observar no quadro 4.1, uma taxa de germinação bastante inferior, contribuindo para tal desfasamento. Para além da inferior taxa de germinação, devido ao menor número de plantas no sistema nesta época e à distribuição num padrão “zigzag”, houve dois substratos que, por não terem outro ao lado a fixar a posição, movimentaram-se dentro do suporte e impossibilitaram o crescimento normal das plantas, levando à sua destruição (motivo pelo qual podemos observar na figura 4.9, tanto em termos de matéria fresca como de matéria seca, o primeiro quartil no ponto zero).

Foca-se desde já, o reduzido crescimento das alfaces em qualquer das épocas, resultado de uma má adaptação ao sistema.

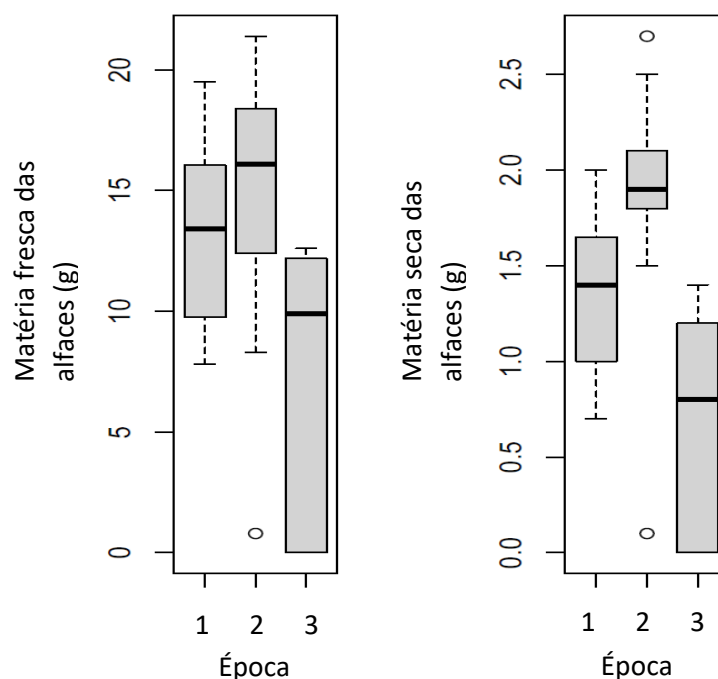


Figura 4.9 – Gráfico boxplot das três épocas para a cultura da alface relacionando com a matéria fresca (MF) e seca (MS).

- No caso do rabanete, em termos de matéria fresca não se apresentam diferenças estatísticas relevantes, tendo médias próximas. Contudo, ao analisar a figura 4.10, poder-se-á reparar que existem vários valores fora do intervalo esperado dos dados (outliers), indicando que, embora as médias entre épocas sejam próximas, na segunda época a variância dos dados é superior às outras duas épocas, apresentando um intervalo interquartil mais amplo, e um outlier com mais de 30 g, ou seja, com mais do triplo do peso das médias de todas as épocas. A primeira época apresenta três valores fora do intervalo esperado, indicando uma heterogeneidade na produção desta cultura. Mais uma vez a terceira época apresentou uma menor taxa de germinação e o mesmo problema descrito para a alface (destruição de plantas por movimentação de substratos no suporte), levando ao outlier de zero gramas que se pode observar na figura 4.10.

As duas últimas épocas apresentam uma maior matéria seca média do que aquela verificada na primeira época. A principal diferença entre estes dois grupos foi o fotoperíodo (relembrando que foi reduzido de 16 para 13.5 horas). No capítulo 2.2.2 indicou-se a eventual antecipação ou atraso de respostas fisiológicas e no constrangimento na captação de nutrientes devido a fotoperíodos desadequados. Compreende-se que a redução do fotoperíodo foi benéfica para o desenvolvimento das plantas.

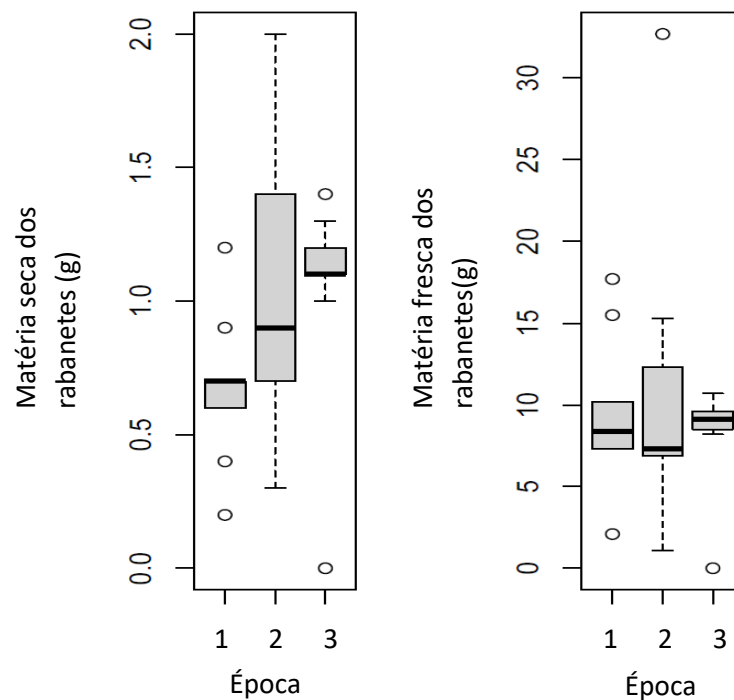


Figura 4.10 - Gráfico boxplot das três épocas para a cultura do rabanete relacionando com a matéria fresca (MF) e seca (MS).

- Em relação ao coentro, começando pela matéria fresca, podemos verificar uma semelhança estatística entre épocas (figura 4.11), sendo a primeira época detentora de uma ligeira vantagem em relação às outras duas. Já a segunda época apresenta uma maior variabilidade, compreendendo os valores máximos e mínimos. Esta variabilidade relacionar-se-á com o posicionamento dentro do tambor das várias plantas, sendo que plantas colocadas com uma vizinhança menos vantajosa, terão um menor desenvolvimento.

Analisando agora a matéria seca das três épocas podemos observar, na figura 4.11, que a primeira época apresenta valores superiores em relação às outras duas épocas, que se assemelham entre si. Faz então sentido, relacionar esta diferença com o facto de na primeira época se terem realizado duas fases de cortes antes da colheita final, aumentando o tempo de cultura e o incentivo ao desenvolvimento das plantas.

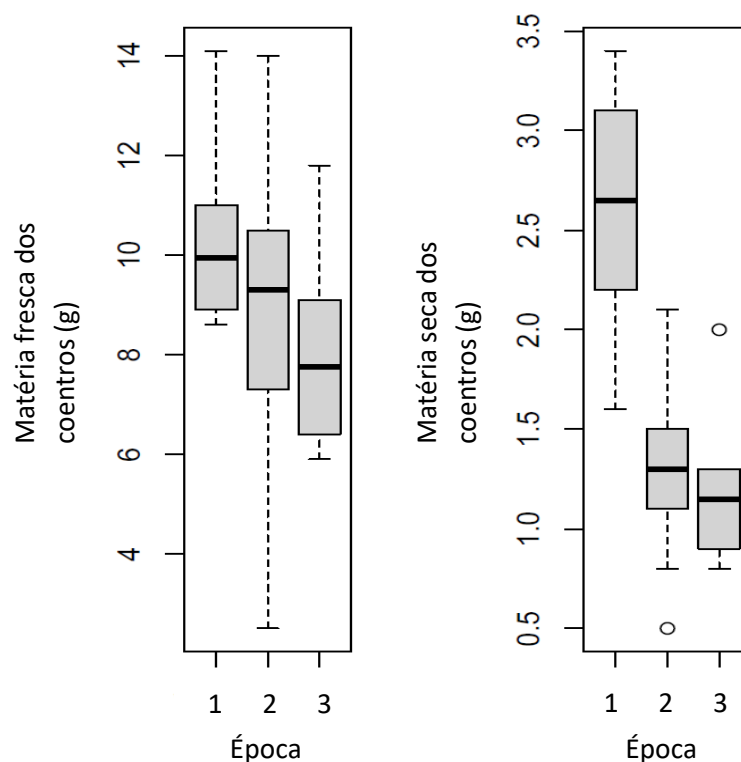


Figura 4.11 - Gráfico boxplot das três épocas para a cultura do coentro relacionando com a matéria fresca (MF) e seca (MS).

Na revisão bibliográfica foram recolhidas as produtividades de cada cultura em sistemas de cultivo sem solo horizontais em substrato, recuperamos esses valores no quadro 4.4.

Quadro 4.4 -Produtividade de referência em termos de matéria fresca/planta em sistemas de cultivo sem solo horizontais com substrato (da Silva et al., 2020; da Silva et al., 2018; Ossai et al., 2020; Both, 2002).

Cultura	Produtividade em matéria fresca/planta (g)
Alface	130
Rabanete	16
Coentro	40

Comparando estes valores com as matérias frescas médias apresentadas no quadro 4.2, podemos concluir que as produtividades culturais deste ensaio experimental ficaram longe daquilo que poderia ser uma produção competitiva. A única cultura que se aproximou de tais valores foi a do rabanete que, embora com uma média abaixo do valor de referência, teve nas primeiras duas épocas, plantas com massas frescas acima de 15 g. É então presumível, que aquelas plantas que não atingiram valores mais elevados tenham sofrido colocações desvantajosas no tambor, ou tenham sido desfavorecidas por uma colheita antecipada.



Figura 4.12 – Planta de rabanete em fase de desenvolvimento.

Deve referir-se a divergência entre os valores de referência da alface e aqueles obtidos experimentalmente. A segunda época foi aquela que apresentou uma maior média de matéria fresca para esta cultura e, mesmo assim, representa cerca de 10% do valor de referência do quadro 4.4. Veja-se que a segunda época teve um fotoperíodo 2.5 horas inferior à primeira época, podendo daqui resultar o melhor desenvolvimento. Recuperando os dados estabelecidos na revisão bibliográfica, sabemos que o fotoperíodo ideal para esta cultura é de 10 a 12 horas, o alargamento experimental desde fator poderá ter contribuído para o baixo desenvolvimento.

A alta vitrificação das alfaces e o baixo desenvolvimento deveram-se, maioritariamente, à intensidade luminosa presente no tambor, claramente superior ao suportado por esta cultura. Embora não tenham sido feitas medições à intensidade luminosa, medições importantes para estudos futuros, torna-se evidente, ao observar o desenvolvimento e os acidentes fisiológicos das plantas, que esta foi prejudicial (figura 4.13).



Figura 4.13 – Acidentes fisiológicos na alface. 1- Necrose marginal e vitrificação.

Ao analisar a figura 4.14 pode-se ainda observar o alongamento das primeiras folhas e o fraco desenvolvimento das novas (centrais), impedindo uma correta formação da alface. Recuperando os efeitos da radiação no espectro azul e vermelho delineadas no segundo capítulo desta tese, podemos concluir que o desenho do subsistema de iluminação do tambor não foi proveitoso para esta cultura, potenciando em demasia o desenvolvimento foliar, impedindo o empreendimento de recursos energéticos na formação de novas folhas.



Figura 4.14 – Alface com alongamento excessivo das folhas externas e pouco desenvolvimento das folhas novas.

As plantas de coentro, ao longo das três épocas de produção, atingiram cerca de 25% daquilo que seria a massa fresca de referência. O crescimento em altura desta cultura

tem efeito nestes valores, uma vez que, ao aproximar do foco central no eixo do tambor, as plantas começaram em processo de espigamento, empregando a energia nesta fase fenológica e não no desenvolvimento de novas ramificações e folhas. Também esta cultura sofreu com a intensidade luminosa presente no tambor, apresentando alguns sinais de stress (figura 4.15), como a desidratação, mesmo tendo o substrato húmido. O fotoperíodo foi adequado conforme aquele delineado no segundo capítulo (14 a 16 horas).



Figura 4.15 – Planta de coentro com folhas em stress (1)

4.4. Rega

A rega foi registada e tratada estatisticamente com o objetivo de detetar diferenças entre épocas, uma vez que não foi possível quantificar a quantidade de rega por cultura, mas sim para a totalidade de massa verde (conjunto de todas as culturas) presente em cada época. Seria do maior interesse poder estudar o consumo hídrico por cultura, contudo não se proporcionou a oportunidade, durante o período experimental alocado a esta dissertação, de fazer uma produção monocultural para cada uma das três culturas, de futuro será um objetivo a ter em conta.

Não se teve em consideração o sistema convencional, uma vez que a ausência de desenvolvimento das plantas levou a um menor requisito hídrico e depois à desistência prematura.

O consumo hídrico entre épocas teve diferenças muito ligeiras, tendo o teste não paramétrico assumido a semelhança ($p=0.36$). Podemos comprovar esta afirmação na figura 4.16, constatando uma diferença entre épocas no valor de cerca de 20 litros.

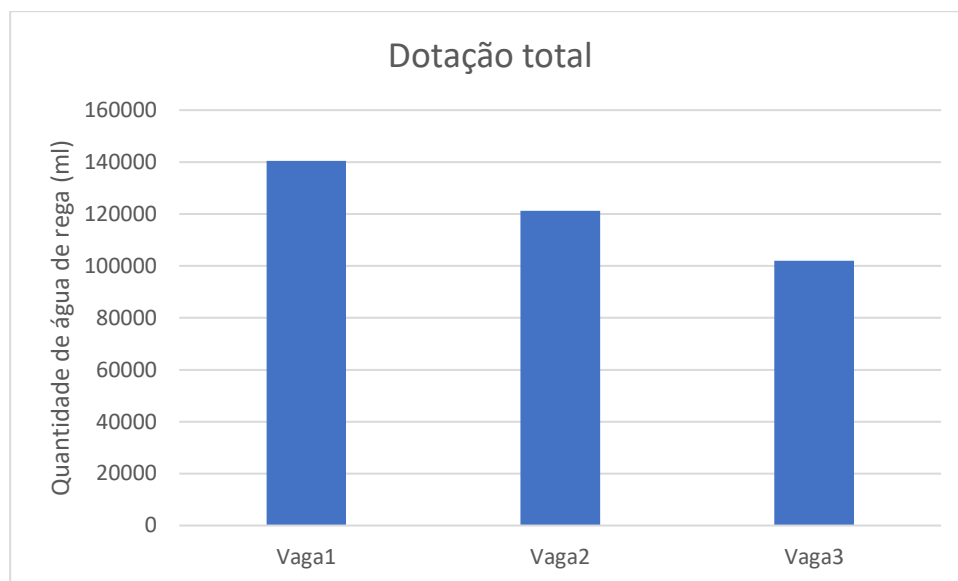


Figura 4.16 – Dotações (ml) de rega totais para cada época de produção.

Mesmo não se tendo conseguido estudar os diferentes requisitos hídricos de cada cultura no OGarden smart, é importante referir a diferença no tempo de cultura do rabanete que, diretamente, levou a um menor consumo hídrico.

O cálculo da eficiência do uso da água foi feito, como explicado no capítulo anterior, apresentando-se os resultados no quadro 4.6.

O perímetro interior do tambor é de 55.5 cm e a largura é de 38,10 cm. Apresenta-se a área horizontalmente ocupada pelo tambor na figura seguinte (figura 4.17).

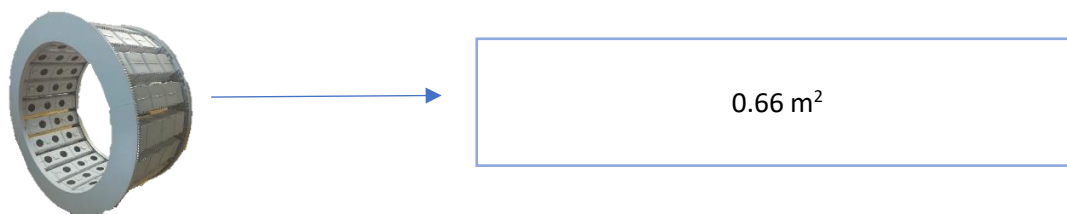


Figura 4.17 – Área de plantação no tambor do sistema OGarden smart

A quantidade de água aplicada por época em litros, é apresentada no quadro seguinte (quadro 4.5).

Quadro 4.5 – Dotações totais de rega por época (L)

	Dotação total de rega (L)
Época 1	140,505
Época 2	121,240
Época 3	101,985

Quadro 4.6 – Eficiência do uso da água de cada época (g/L)

	Eficiência do uso da água (g/L)
Época 1	1.92
Época 2	2.13
Época 3	1.87

Os valores de eficiência do uso de água que podemos observar indicam que a terceira época foi a menos eficiente. A explicação para este resultado estará relacionada com um número de plantas inferior relativamente às outras duas épocas e a um ajustamento incorreto da dotação de rega a aplicar. A redução da dotação entre a segunda e a terceira época foi de aproximadamente 16%, já a redução do número total de plantas foi de 30%. A frequência de rega foi igual à segunda época até à colheita dos rabanetes, contudo diminuiu deste ponto até à colheita das alfaces e coentros. A redução da quantidade de rega até à colheita dos rabanetes poderia ter aumentado a eficiência, todavia, a baixa eficiência do uso de água poderá também estar relacionada com o facto de três plantas (duas alfaces e um rabanete), não se terem desenvolvido por falta de suporte do equipamento (como explicado anteriormente), tendo a redução do número de plantas em relação à segunda época reduzido, não os 30% referidos anteriormente, mas sim aproximadamente 40%.

Os valores da eficiência do uso de água são todos bastante baixos e seriam consideravelmente mais baixos na ausência do rabanete, que se demonstrou com um desenvolvimento rápido e saudável. O coentro demonstrou um crescimento reduzido, contudo a alface apresenta-se como um caso mais flagrante, ganhando uma responsabilidade acrescida sobre a baixa eficiência.

4.5. Temperatura e humidade relativa

Foi recolhida, como dito no capítulo anterior, informação sobre a temperatura e humidade relativa durante todo o período de produção. No gráfico presente na figura 4.18 podemos verificar que ocorreu um aumento gradual da temperatura média, principalmente durante a primeira época, onde entre o início e o fim da produção a temperatura média variou aproximadamente 7 °C. Já na segunda época o aumento da temperatura média foi de aproximadamente 5 °C e na terceira época manteve-se relativamente constante.

A humidade relativa média teve um comportamento parecido, invertendo a tendência em relação ao que se sucedeu com a temperatura nas últimas duas épocas, estabilizando na segunda época e apresentando um ligeiro aumento na terceira.

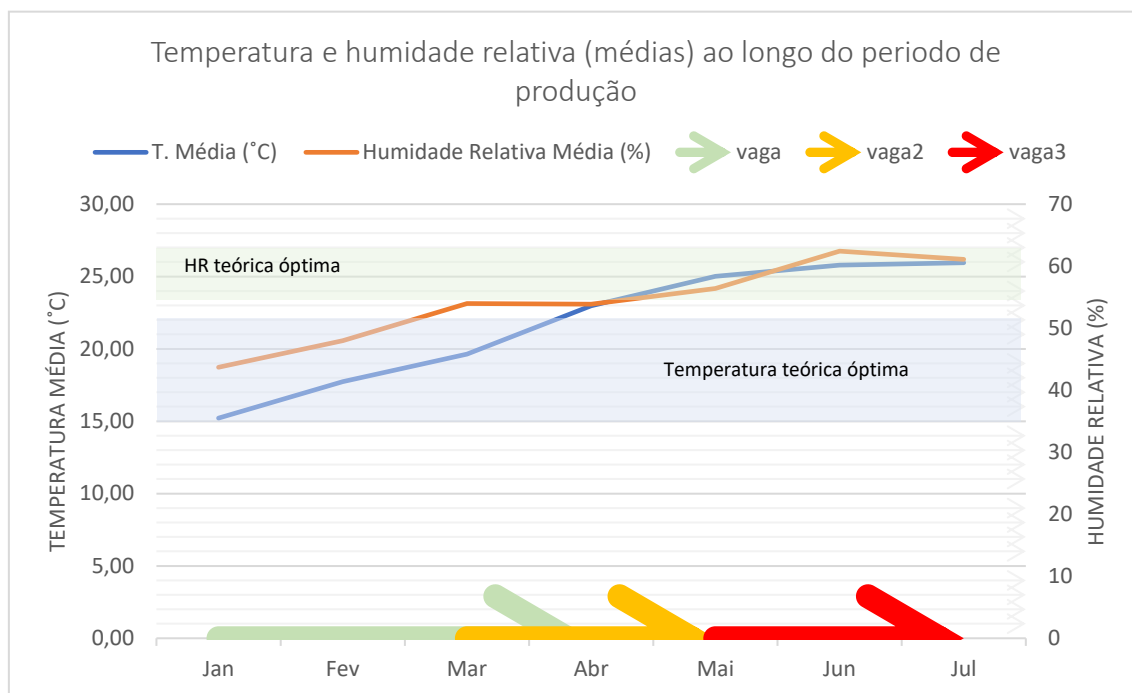


Figura 4.18 – Variação da temperatura e humidade relativa médias mensais ao longo do processo experimental.

Recuperando a informação relativa a cada cultura, descrita no segundo capítulo desta dissertação e marcada na figura 4.18 pelas manchas azul e verde, podemos referir que as culturas tiveram uma temperatura média mensal dentro dos parâmetros óptimos de produção nas primeiras duas épocas. Na terceira época a temperatura média mensal foi elevada comparativamente com a recomendação e, por isso, tendencialmente prejudicial. Os resultados deste factor prejudicial são visíveis ao analisar as taxas de

germinação da terceira época(e comparando com as outras duas) e a matéria fresca produzida, sendo flagrante o caso da alface, que teve, nesta época, metade da produção de matéria fresca que tinha sido obtida nas duas épocas anteriores.

Embora possamos ver na figura 4.18 que nas primeiras duas épocas a humidade relativa está abaixo daquilo que seria ideal, deve ser referido que o sensor não estava colocado dentro do sistema, mas sim na mesma instalação que este. Quer isto dizer que, devido à forma como o sistema está montado e como as plantas estão posicionadas, principalmente no tambor, a humidade relativa era provavelmente maior no interior deste, uma vez que tem o reservatório por baixo e os substratos húmidos em torno de toda a área ocupada pelas plantas.

Refere-se ainda a constante movimentação das plantas no sistema rotativo, obrigando a que haja uma circulação de ar em torno das mesmas. Esta circulação de ar provoca também uma homogeneidade de temperatura e humidade em toda a área produtiva e favorece a sanidade das plantas, reduzindo zonas de natural menor arejamento.

4.6. Substrato

Ao longo do processo produtivo surgiu a vontade de compreender as propriedades químicas dos substratos de modo a empregar os mesmos da forma que melhor favoreces-se as plantas em cultivo. Dando seguimento a esta necessidade, foi feita uma análise laboratorial para detetar o pH e a condutividade elétrica de cinco substratos diferentes: um novo, três já utilizados e um em utilização na época em desenvolvimento à data. Através da análise do quadro 4.7, percebeu-se que o substrato em utilização apresentava um pH mais elevado que o substrato novo, indicando que a entrada da cultura no substrato, com libertação de nutrientes, aumenta o pH, que é bastante baixo no substrato novo (5.03) e próximo de 6 no substrato em utilização. A turfa, componente base do substrato utilizado, tem um pH ácido (capítulo 2.1.3.2), justificando estes valores.

Observa-se também uma redução da condutividade elétrica, acompanhando o aumento do pH, com a utilização dos substratos, indicando uma redução da salinidade e melhoria das condições para a captação de nutrientes.

Recolhidos estes resultados optou-se por humedecer os substratos antes da sementeira das últimas duas épocas, impulsionando a libertação de nutrientes. O

resultado foi uma taxa de germinação mais rápida, como se pode observar na comparação dos gráficos presentes no capítulo 4.1, e maior na segunda época.

Quadro 4.7 – Resultados laboratoriais da análise ao pH e à condutividade elétrica (CE) dos substratos.

	Substratos				
	Substrato novo	Substrato usado 1	Substrato usado 2	Substrato usado 3	Substrato em utilização
pH	5.03	5.54	6.12	5.84	5.98
CE (μS/cm)	963	406	373	407	868

A cultura da alface poderá ser a única, conforme os dados recolhidos no segundo capítulo, a apresentar inadaptação a um pH com estes valores, contudo, não é evidente que a alface não se adapte, tal como explicado o capítulo referido anteriormente.

Embora não se tenha adicionado qualquer tipo de fertilização às culturas, uma vez que a empresa fornecedora do equipamento sugeria não haver necessidade de tal, comprovámos nas análises feitas no laboratório de pedologia do ISA (quadro 3.3) que o potássio extraível estava em grande concentração, sugerindo que poderá ter tido efeitos negativos na correta nutrição das plantas, podendo limitar a absorção de outros nutrientes por parte destas. Já o azoto e o fósforo encontram-se em concentrações relativamente baixas.

Eventualmente o recorrente contacto com a água do reservatório poderia levar a alguma lixiviação, contudo, dado que o sistema é rotativo, e que os substratos variam as suas posições em relação ao vetor da gravidade, poder-se-á presumir que as movimentações hídricas dentro do substrato contrariam a tendência de escorrimento da solução (agora) nutritiva.

Para análises futuras fica o propósito de efetuar um plano de fertirrega adequado ao sistema e que potencie o desenvolvimento das culturas.

4.7. Consumo energético

Tendo sido recolhido o consumo energético ao longo de um mês de produção, o valor final foi de 37.2 KWh, valor que considerámos elevado comparando, por exemplo, com uma máquina de lavar a loiça (equipamento vulgar em qualquer casa). No seguinte gráfico (figura 4.19) podemos visualizar a comparação entre o consumo médio de uma máquina de lavar a loiça (usada 5 vezes por semana) e o equipamento OGarden smart.

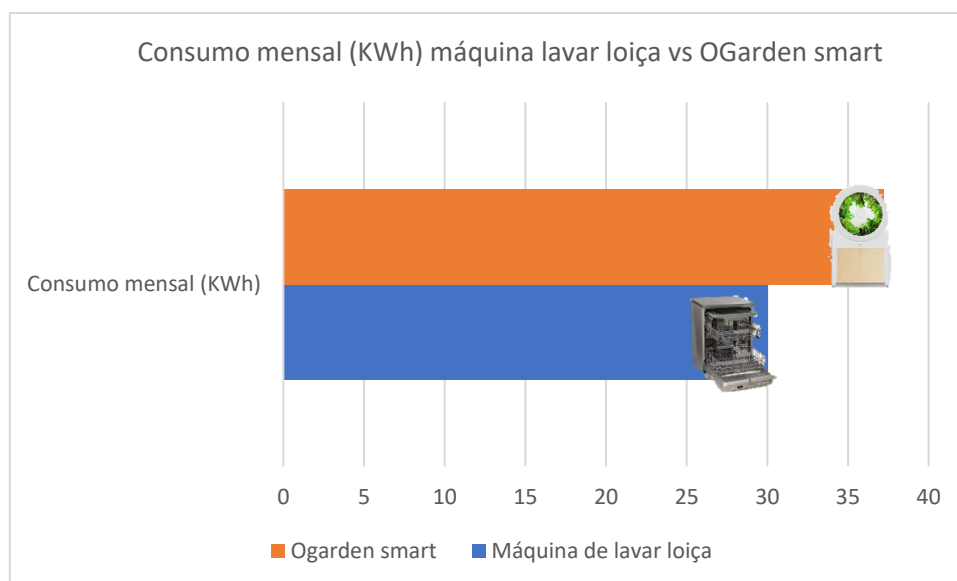


Figura 4.19 – Comparação entre o consumo mensal de uma máquina de lavar loiça e o sistema OGarden smart.

O consumo energético total do sistema OGarden é composto pelo somatório dos consumos parciais dos subsistemas. No seguinte gráfico podemos observar os valores obtidos com o contador SmartLife smart plug (figura 4.13).

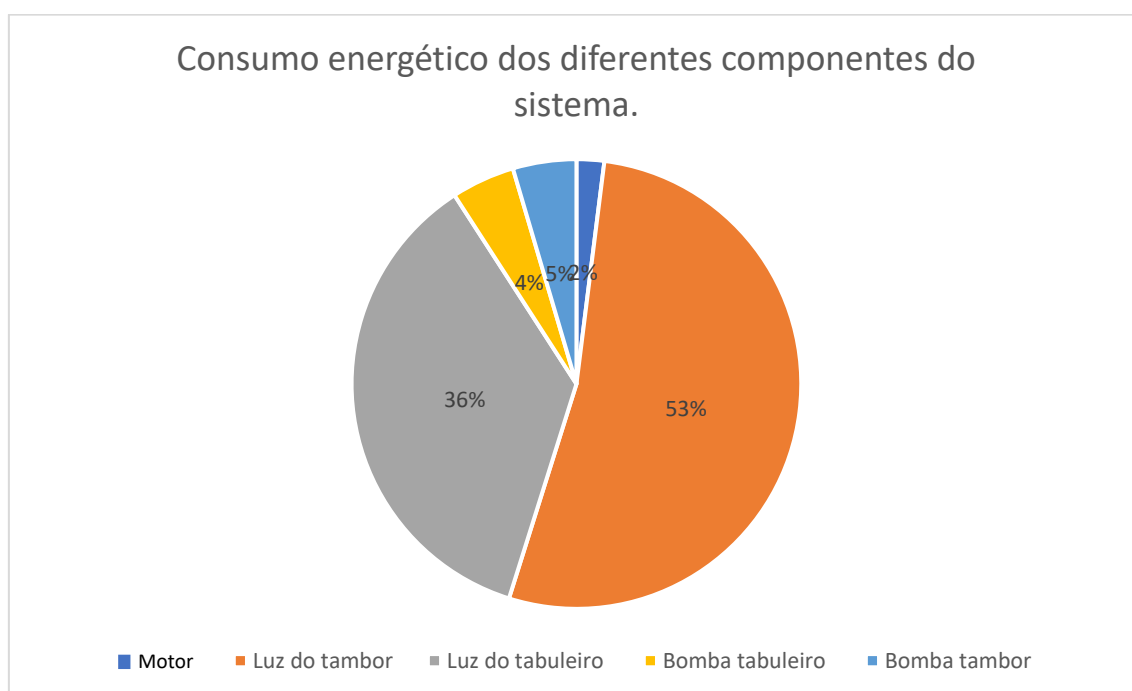


Figura 4.20 – Percentagens do consumo energético parcial dos diferentes componentes do sistema.

Torna-se evidente que o maior consumo energético é obtido pelo funcionamento do subsistema de iluminação, particularmente pelas lâmpadas presentes no tambor, tendo

o motor elétrico uma pequena representação (apenas 2%). Embora não tenha sido possível elaborar nesta dissertação uma análise prática às possibilidades de redução de iluminação, como por exemplo, a redução do número de lâmpadas, parece-nos, tendo em conta os resultados obtidos, que tal abordagem poderia fazer sentido e tornaria o sistema mais sustentável para o proprietário.

O sistema OGarden smart pode apresentar diferentes modos de funcionamento durante o período de produção, tendo o pico de consumo nos períodos de rega com plantas em germinação no viveiro e em desenvolvimento no tambor.

Estando o sistema ligado, o motor que faz rodar o tambor entra automaticamente em funcionamento, ou seja, no período noturno em que o subsistema de iluminação está desligado (e as bombas de rega também, salvo escassos minutos de eventual funcionamento de rega noturna), dá-se o consumo mínimo (representado no gráfico da figura 4.21 como “motor”).

Durante o período de produção, a maior parte do tempo de cultura é passado no tambor, fazendo com que a iluminação do tabuleiro do viveiro esteja desligada. Assim, neste tempo, o maior dispêndio energético provém da iluminação do tambor (representado por “Luz do tambor” na figura 4.21).

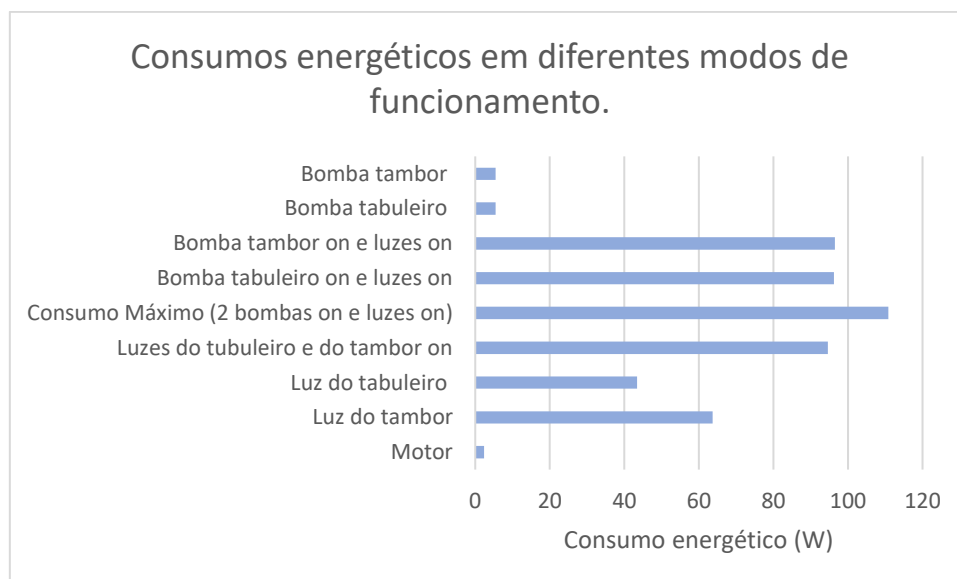


Figura 4.21 – Consumo energético em diferentes modos de funcionamento. O motor está sempre a funcionar.

É importante referir que a medição do consumo mensal foi feita desde o início da segunda época (durante um mês), ou seja, durante mais de metade do mês funcionou tanto com o tambor como com o viveiro, uma vez que o tambor estava ocupado com a

época anterior e o viveiro com a germinação desta época. Esta realidade não corresponde ao consumo “normal” do sistema, uma vez que os tempos de viveiro são bastante inferiores aos tempos de cultura no tambor. Podemos então aferir, através da figura 4.21, que num mês de funcionamento único do tambor, sem plantas em germinação no viveiro, com 16 horas de iluminação e 8 horas de período noturno, chegamos a um valor final mensal de 28.8 KWh. Este valor encontra-se bastante abaixo daquele aferido acima, continuando, ainda assim, a representar um consumo considerável para equipamento doméstico, podendo ser tomado como uma segunda máquina de lavar a loiça.

5. Considerações finais

Finalizado o período experimental e a análise dos resultados obtidos, retiram-se as seguintes conclusões:

- I. Embora a taxa de germinação no viveiro do sistema OGarden smart não seja substancialmente diferente do sistema convencional, o desenvolvimento inicial das plantas foi significativamente melhor, permitindo um saudável e rápido desenvolvimento. O mosaico das lâmpadas das três regiões do espectro que compõe a radiação PAR foi proveitoso e eficaz.
- II. O rabanete foi a única cultura que, de facto, se adaptou ao sistema rotativo, obtendo um tempo de cultura cativante e uma produção de biomassa dentro dos parâmetros óptimos de mercado. Um aperfeiçoamento das práticas de gestão do sistema e da cultura poderia levar a resultados muito interessantes, até para aplicações em dimensões de maior escala. A variação da posição em relação ao vetor da gravidade deverá ter sido impulsionadora do rápido desenvolvimento da planta.
- III. A alface não se adaptou ao sistema OGarden smart, maioritariamente por estar perante um sistema de iluminação desadequado para o desenvolvimento desta cultura. A produção não teve interesse para consumo. Uma redução da intensidade luminosa seria benéfica, tendo cuidado na diminuição de lâmpadas de emissão de radiação vermelho e azul, reduzindo a tendência de expansão foliar exagerada das primeiras folhas.
- IV. O coentro não encontrou neste sistema a oportunidade de um desenvolvimento até um porte comercialmente aceitável, contudo, poderá ser de interesse para uso doméstico, aplicando sucessivos cortes para evitar uma aproximação excessiva ao foco de luz central (incita o espigamento). Uma redução da intensidade luminosa poderia melhorar o aspeto fisiológico das plantas. Será de interesse futuro estudar formas de controlo sobre este parâmetro, tanto para esta cultura como para a alface.
- V. O sistema deve estar totalmente preenchido para a obtenção de melhores resultados produtivos. Linhas de produção incompletas levam a movimentação de substratos e consequente destruição das plantas.
- VI. Não se conseguiu estudar a eficiência de uso de água por cultura. No futuro será de interesse fazer uma época de produção para cada uma, de modo a obter esta informação e prever melhorias ao manejo do subsistema de rega.

Fez-se sim o cálculo da eficiência de uso de água para o total de matéria verde presente em cada época, sendo os resultados bastante baixos (média de 1.30 gramas por cada milímetro de rega). Estes baixos valores são, também, resultado da inadaptação referida anteriormente ao subsistema de iluminação.

- VII. Convém que o sistema seja colocado numa zona de baixa variação térmica, e que esta seja adequada ao cultivo de espécies hortícolas. Temperaturas altas afetam o normal crescimento das plantas experimentadas.
- VIII. Humedecer os substratos antes da sementeira para ir aumentando o pH é importante e permitirá uma germinação mais rápida e eficaz, uma vez que a turfa apresenta um pH ácido, eventualmente menos favorável à germinação. A entrada de água no substrato incentiva a libertação de nutrientes e a subida do pH para níveis mais adequados para o cultivo das espécies hortícolas em questão.
- IX. Estudos sobre uma possível fertirrega seriam desejados no futuro, uma vez que as análises obtidas indicam uma presença nutritiva pouco vantajosa. O sistema rotativo apresenta uma vantagem contrariando o fenómeno de lixiviação.
- X. Em termos sanitários o sistema é altamente vantajoso, não se tendo verificado a necessidade de uso de fitofármacos. O facto de as plantas estarem em constante movimento ajuda a um melhor arejamento, prevenindo condições de maior vulnerabilidade.
- XI. O sistema OGarden smart é desenhado para uso doméstico, concluindo-se que os gastos energéticos podem restringir o público de eventuais compradores. Uma adaptação do sistema de iluminação seria muito benéfica, quer em termos produtivos, quer em termos de poupança energética. Globalmente, revela-se um sistema com potencial para ser melhorado e poder encontrar o seu nicho em lares, mas também em restaurantes ou empresas.

Referências Bibliográficas

- Almeida, D. (2015). *Manual de Culturas Hortícolas: Vol. I* (3rd ed.). Editorial Presença.
- Almeida, D. P., & Reis, M. (2017). Engenharia Hortícola. *Porto: Agrobook*.
- Aloni, R., Langhans, M., Aloni, E., & Ullrich, C. I. (2004). Role of cytokinin in the regulation of root gravitropism. *Planta*, 220, 177–182.
- Atkins, C. A., & Smith, P. M. C. (2007). Translocation in Legumes: Assimilates, Nutrients, and Signaling Molecules¹. *Plant Physiology*, 144(2), 550–561.
<https://doi.org/10.1104/pp.107.098046>
- Avercheva, O. V., Berkovich, Y. A., Erokhin, A. N., Zhigalova, T. V., Pogosyan, S. I., & Smolyanina, S. O. (2009). Growth and photosynthesis of Chinese cabbage plants grown under light-emitting diode-based light source. *Russian Journal of Plant Physiology*, 56, 14–21.
- Barber, S. A., Walker, J. M., & Vasey, E. H. (1963). Mechanisms for movement of plant nutrients from soil and fertilizer to plant root. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 11(3), 204–207.
- Barrett, G. E., Alexander, P. D., Robinson, J. S., & Bragg, N. C. (2016). Achieving environmentally sustainable growing media for soilless plant cultivation systems—A review. *Scientia Horticulturae*, 212, 220–234.
- Battle, M. W., & Jones, M. A. (2020). Cryptochromes integrate green light signals into the circadian system. *Plant, Cell & Environment*, 43(1), 16–27.
- Both, A. J. (2002). Ten years of hydroponic lettuce research. *The State University of New Jersey, New Jersey*.
- Bourget, C. M. (2008). An introduction to light-emitting diodes. *HortScience*, 43(7), 1944–1946.
- Brandon, C. R., & Emmanuel, L. (2010). *Phototropism: Mechanism and Outcomes*.
- Bugayong, P. E., Casalla, J. V., Lopez, J. B., & Pacis, M. C. (2022). Smart Hydroponic System with Hybrid Switching Mechanism, LED Illumination, and IOT using Zigbee Technology. *2022 IEEE 14th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM)*, 1–6.
- Burattini, C., Mattoni, B., & Bisegna, F. (2017a). The impact of spectral composition of white LEDs on spinach (*Spinacia oleracea*) growth and development. *Energies*, 10(9), 1383.
- Burattini, C., Mattoni, B., & Bisegna, F. (2017b). The impact of spectral composition of white LEDs on spinach (*Spinacia oleracea*) growth and development. *Energies*, 10(9), 1383.
- Busch, M. B., & Sievers, A. (1990). Hormone treatment of roots causes not only a reversible loss of starch but also of structural polarity in statocytes. *Planta*, 181, 358–364.
- Castro, C., & Domingues, L. (2020). *Produção de hortícolas em modo de produção biológico*.
- Chambers, F. M., Beilman, D. W., & Yu, Z. (2011). Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeostudies of climate and peatland carbon dynamics. *Mires and Peat*, 7(7), 1–10.

- Chia, S. Y., & Lim, M. W. (2022). A critical review on the influence of humidity for plant growth forecasting. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1257(1), 012001.
- Cope, K. R., & Bugbee, B. (2013). Spectral effects of three types of white light-emitting diodes on plant growth and development: absolute versus relative amounts of blue light. *HortScience*, 48(4), 504–509.
- Craker, L. E., Seibert, M., & Clifford, J. T. (1983). Growth and development of radish (*Raphanus sativus*, L.) under selected light environments. *Annals of Botany*, 51(1), 59–64.
- da Silva, M. G., Soares, T. M., Gheyi, H. R., Costa, I. P., & Vasconcelos, R. S. (2020). Growth, production and water consumption of coriander grown under different recirculation intervals and nutrient solution depths in hydroponic channels. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 281–294.
- Diamantopoulos, E., & Durner, W. (2013). Physically-based model of soil hydraulic properties accounting for variable contact angle and its effect on hysteresis. *Advances in Water Resources*, 59, 169–180.
- Duan, M., Wang, J., Zhang, X., Yang, H., Wang, H., Qiu, Y., Song, J., Guo, Y., & Li, X. (2017). Identification of optimal reference genes for expression analysis in radish (*Raphanus sativus* L.) and its relatives based on expression stability. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1605.
- Dzisiahsari, S. (2020). Photoperiodic effects on yield components of coriander (*Coriandrum sativum* L.) grown in a heated greenhouse. *AGRIVITA Journal of Agricultural Science*, 42(2), 389–399.
- El-Kazzaz, K. A., & El-Kazzaz, A. A. (2017). Soilless agriculture a new and advanced method for agriculture development: an introduction. *Agric. Res. Technol. Open Access J*, 3, 63–72.
- Esmon, C. A., Tinsley, A. G., Ljung, K., Sandberg, G., Hearne, L. B., & Liscum, E. (2006). A gradient of auxin and auxin-dependent transcription precedes tropic growth responses. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(1), 236–241.
- Gangadhar, B. H., Mishra, R. K., Pandian, G., & Park, S. W. (2012). Comparative study of color, pungency, and biochemical composition in chili pepper (*Capsicum annum*) under different light-emitting diode treatments. *HortScience*, 47(12), 1729–1735.
- Gao, Q., Liao, Q., Li, Q., Yang, Q., Wang, F., & Li, J. (2022). Effects of LED Red and Blue Light Component on Growth and Photosynthetic Characteristics of Coriander in Plant Factory. *Horticulturae*, 8(12), 1165.
- Gerovac, J. (2016). The fundamentals of light and its impact on crop production. *Proceedings from the Horticultural Lighting Conference*.
- Ghamarnia, H., & Daichin, S. (2013). Effect of different water stress regimes on different coriander (*Coriander sativum* L.) parameters in a semi-arid climate. *International Journal of Agronomy and Plant Production*, 4(4), 822–832.
- Hai, N. N., Chuong, N. N., Tu, N. H. C., Kisiala, A., Hoang, X. L. T., & Thao, N. P. (2020). Role and regulation of cytokinins in plant response to drought stress. *Plants*, 9(4), 422.

- Harper, R. M., Stowe-Evans, E. L., Luesse, D. R., Muto, H., Tatematsu, K., Watahiki, M. K., Yamamoto, K., & Liscum, E. (2000). The NPH4 locus encodes the auxin response factor ARF7, a conditional regulator of differential growth in aerial Arabidopsis tissue. *The Plant Cell*, 12(5), 757–770.
- Heldt, H.-W. (1997). *Plant biochemistry and molecular biology*. Oxford University Press.
- Hogewoning, S. W., Trouwborst, G., Maljaars, H., Poorter, H., van Ieperen, W., & Harbinson, J. (2010). Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *Journal of Experimental Botany*, 61(11), 3107–3117.
- Holland, J. J., Roberts, D., & Liscum, E. (2009). Understanding phototropism: from Darwin to today. *Journal of Experimental Botany*, 60(7), 1969–1978.
- J. Heo, C. Lee, D. Chakrabarty, & K. Paek. (2002). Growth responses of marigold and salvia bedding plants as affected by monochromic or mixture radiation provided by a light-emitting diode (LED). *Plant Growth Regulat.*, 38, 225–230.
- Johkan, M., Shoji, K., Goto, F., Hashida, S., & Yoshihara, T. (2010). Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. *HortScience*, 45(12), 1809–1814.
- KÄMPF, A. N. (2000). Produção comercial de plantas ornamentais. *Guaíba: Agropecuária*, 254.
- Kaneko, Y., Kimizuka-Takagi, C., Bang, S. W., & Matsuzawa, Y. (2007). Radish. In C. Kole (Ed.), *Vegetables* (pp. 141–160). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-34536-7_3
- Khudoyberdiev, A., Ahmad, S., Ullah, I., & Kim, D. (2020). An optimization scheme based on fuzzy logic control for efficient energy consumption in hydroponics environment. *Energies*, 13(2), 289.
- Lages Barbosa, G., Almeida Gadelha, F. D., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., Wohlleb, G. M., & Halden, R. U. (2015). Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(6), 6879–6891.
- Lazzarini, L. E. S., Pacheco, F. V., Silva, S. T., Coelho, A. D., Medeiros, A. P. R., Bertolucci, S. K. V., Pinto, J., & Soares, J. D. R. (2017). Uso de diodos emissores de luz (LED) na fisiologia de plantas cultivadas: revisão. *Scientia Agraria Paranaensis*, 16(2), 137–144.
- Leyser, O. (2002). Molecular genetics of auxin signaling. *Annual Review of Plant Biology*, 53(1), 377–398.
- Liaros, S., Botsis, K., & Xydis, G. (2016). Technoeconomic evaluation of urban plant factories: The case of basil (*Ocimum basilicum*). *Science of the Total Environment*, 554, 218–227.
- Lieth, J. H., & Oki, L. R. (2019). Irrigation in soilless production. In *Soilless culture* (pp. 381–423). Elsevier.
- Lin, K.-H., Huang, M.-Y., Huang, W.-D., Hsu, M.-H., Yang, Z.-W., & Yang, C.-M. (2013). The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and

- edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata). *Scientia Horticulturae*, 150, 86–91. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.10.002>
- Liscum, E., Askinosie, S. K., Leuchtman, D. L., Morrow, J., Willenburg, K. T., & Coats, D. R. (2014). Phototropism: growing towards an understanding of plant movement. *The Plant Cell*, 26(1), 38–55.
- Maestre-Valero, J. F., Martin-Gorriz, B., Soto-García, M., Martinez-Mate, M. A., & Martinez-Alvarez, V. (2018). Producing lettuce in soil-based or in soilless outdoor systems. Which is more economically profitable? *Agricultural Water Management*, 206, 48–55.
- Manos, D.-P., & Xydis, G. (2019). Hydroponics: are we moving towards that direction only because of the environment? A discussion on forecasting and a systems review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(13), 12662–12672.
- Marcos Filho, J., & Kikuti, A. L. P. (2006). Vigor de sementes de rabanete e desempenho de plantas em campo. *Revista Brasileira de Sementes*, 28, 44–51.
- Massa, G. D., Kim, H.-H., Wheeler, R. M., & Mitchell, C. A. (2008). Plant Productivity in Response to LED Lighting. *HortScience Horts*, 43(7), 1951–1956. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.7.1951>
- Mawphlang, O. I. L., & Kharshiing, E. V. (2017). Photoreceptor mediated plant growth responses: implications for photoreceptor engineering toward improved performance in crops. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1181.
- Maynard, D. N., & Hochmuth, G. J. (2006). *Knott's handbook for vegetable growers*. John Wiley & Sons.
- Mekonnen, M., & Hoekstra, A. Y. (2011). *National water footprint accounts: The green, blue and grey water footprint of production and consumption. Volume 1: Main Report*.
- Mitchell, C. A. (2015). Academic research perspective of LEDs for the horticulture industry. *HortScience*, 50(9), 1293–1296.
- Mizuno, T., Amaki, W., & Watanabe, H. (2009). Effects of monochromatic light irradiation by LED on the growth and anthocyanin contents in leaves of cabbage seedlings. *VI International Symposium on Light in Horticulture 907*, 179–184.
- Morgan Pattison, P., Hansen, M., & Tsao, J. Y. (2018). LED lighting efficacy: Status and directions. *Comptes Rendus Physique*, 19(3), 134–145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.crhy.2017.10.013>
- Morita, M. T., & Tasaka, M. (2004). Gravity sensing and signaling. *Current Opinion in Plant Biology*, 7(6), 712–718.
- Morrow, R. C. (2008). LED Lighting in Horticulture. *HortScience Horts*, 43(7), 1947–1950. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.7.1947>
- Mou, B. (2008). Lettuce. *Vegetables I: Asteraceae, Brassicaceae, Chenopodiaceae, and Cucurbitaceae*, 75–116.
- Muyao Du, Zhenlei Xiao, Yangchao Luo (2022). Advances and emerging trends in cultivation substrates for growing sprouts and microgreens toward safe and sustainable agriculture, *Current Opinion in Food Science*. Volume 46. 100863.

- Nakamura, M., Nishimura, T., & Morita, M. T. (2019a). Bridging the gap between amyloplasts and directional auxin transport in plant gravitropism. *Current Opinion in Plant Biology*, 52, 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.07.005>
- Nakamura, M., Nishimura, T., & Morita, M. T. (2019b). Gravity sensing and signal conversion in plant gravitropism. *Journal of Experimental Botany*, 70(14), 3495–3506. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz158>
- Nguyen, D. T. P., Kitayama, M., Lu, N., & Takagaki, M. (2020). Improving secondary metabolite accumulation, mineral content, and growth of coriander (*Coriandrum sativum* L.) by regulating light quality in a plant factory. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 95(3), 356–363.
- Nguyen, D. T. P., Lu, N., Kagawa, N., Kitayama, M., & Takagaki, M. (2020). Short-term root-zone temperature treatment enhanced the accumulation of secondary metabolites of hydroponic coriander (*Coriandrum sativum* L.) grown in a plant factory. *Agronomy*, 10(3), 413.
- Nicola, S., Fontana, E., Hoeberechts, J., & Saglietti, D. (2004). *Raphanus sativus* production in soilless or traditional culture systems and postharvest packaging. *V International Postharvest Symposium 682*, 1303–1310.
- Nobel, P. S. (1983). *Biophysical plant physiology and ecology*. WH Freeman and company.
- Olympios, C. M., & Choukr-Allah, R. (1999). Overview of soilless culture: advantages, constraints, and perspectives. *Protected Cultivation in the Mediterranean Region*, 31, 307–324.
- Ossai, C., Ogbale, S., Balogun, M. O., & Akpeji, S. C. (2020). Production of Radish (*Raphanus sativus* L.) in Nigeria Using the Hydroponics System. *Journal of Environmental and Agricultural Studies*, 1(2), 6–9.
- Paradiso, R., & Proietti, S. (2022). Light-quality manipulation to control plant growth and photomorphogenesis in greenhouse horticulture: The state of the art and the opportunities of modern LED systems. *Journal of Plant Growth Regulation*, 41(2), 742–780.
- Pearson, L. J., Pearson, L., & Pearson, C. J. (2010). Sustainable urban agriculture: stocktake and opportunities. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 8(1–2), 7–19. <https://doi.org/10.3763/ijas.2009.0468>
- Pedro Rau. (2017). A cultura do rabanete. *Revista Jardins*.
- Pedro Rau. (2018). A cultura do coentro. *Revista Jardins*.
- Philosoph-Hadas, S., Friedman, H., & Meir, S. (2005). Gravitropic Bending and Plant Hormones. In G. Litwack (Ed.), *Vitamins & Hormones* (Vol. 72, pp. 31–78). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0083-6729\(05\)72002-1](https://doi.org/10.1016/S0083-6729(05)72002-1)
- Pinho, P., Jokinen, K., & Halonen, L. (2017). The influence of the LED light spectrum on the growth and nutrient uptake of hydroponically grown lettuce. *Lighting Research & Technology*, 49(7), 866–881.

- Piovene, C., Orsini, F., Bosi, S., Sanoubar, R., Bregola, V., Dinelli, G., & Gianquinto, G. (2015). Optimal red: blue ratio in led lighting for nutraceutical indoor horticulture. *Scientia Horticulturae*, 193, 202–208.
- Pokorny, F. A., Gibson, P. G., & Dunavent, M. G. (1986). Prediction of bulk density of pine bark and/or sand potting media from laboratory analyses of individual components. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 111(1), 8–11.
- Raviv, M., Lieth, H., & Bar-Tal, A. (2019). *Soilless culture: Theory and practice: Theory and practice*. Elsevier.
- Raviv, M., Wallach, R., Silber, A., & Bar-Tal, A. (2002). Substrates and their analysis. *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals*, 25–102.
- Rubatzky, V. E., & Yamaguchi, M. (2012). *World vegetables: principles, production, and nutritive values*. Springer Science & Business Media.
- Sack, F. D. (1991). Plant Gravity Sensing. In K. W. Jeon & M. Friedlander (Eds.), *International Review of Cytology* (Vol. 127, pp. 193–252). Academic Press.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0074-7696\(08\)60695-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0074-7696(08)60695-6)
- Sakamoto, M., Komatsu, Y., & Suzuki, T. (2021). Nutrient deficiency affects the growth and nitrate concentration of hydroponic radish. *Horticulturae*, 7(12), 525.
- Samuolienė, G., Brazaitytė, A., Sirtautas, R., Noviškova, A., & Duchovskis, P. (2011). Supplementary red-LED lighting affects phytochemicals and nitrate of baby leaf lettuce. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 9(3–4), 271–274.
- Santos Júnior, J. A., Gheyi, H. R., Cavalcante, A. R., Medeiros, S. de S., Dias, N. da S., & Santos, D. B. dos. (2015). Water use efficiency of coriander produced in a low-cost hydroponic system. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19, 1152–1158.
- Sardare, M. D., & Admane, S. V. (2013). A review on plant without soil-hydroponics. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2(3), 299–304.
- Sato, E. M., Hijazi, H., Bennett, M. J., Vissenberg, K., & Swarup, R. (2015). New insights into root gravitropic signalling. *Journal of Experimental Botany*, 66(8), 2155–2165.
- Schafer, G., de Souza, P. V. D., & Fior, C. S. (2015). Um panorama das propriedades físicas e químicas de substratos utilizados em horticultura no sul do Brasil. *Ornamental Horticulture*, 21(3), 299–306.
- Schmülling, T. (2002). New insights into the functions of cytokinins in plant development. *Journal of Plant Growth Regulation*, 21(1).
- Schnitzler, W. H. (2012a). Urban hydroponics for green and clean cities and for food security. *International Symposium on Soilless Cultivation 1004*, 13–26.
- Schnitzler, W. H. (2012b). Urban hydroponics for green and clean cities and for food security. *International Symposium on Soilless Cultivation 1004*, 13–26.
- Schwarz, M. (2012). *Soilless culture management* (Vol. 24). Springer Science & Business Media.

- Sergejeva, D., Alsina, I., Duma, M., Dubova, L., Augspole, I., Erdberga, I., & Berzina, K. (2018). *Evaluation of different lighting sources on the growth and chemical composition of lettuce*.
- Sharangi, A. B., & Roychowdhury, A. (2014). Phenology and yield of coriander as influenced by sowing dates and irrigation. *The Bioscan*, 9(4), 1513–1520.
- Silva, M. G. da, Oliveira, I. de S., Soares, T. M., Gheyi, H. R., Santana, G. de O., & Pinho, J. de S. (2018). Growth, production and water consumption of coriander in hydroponic system using brackish waters. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22, 547–552.
- Silva, M. G. da, Soares, T. M., Gheyi, H. R., Santos, C. C. dos, & Oliveira, M. G. B. de. (2022). Hydroponic cultivation of coriander intercropped with rocket subjected to saline and thermal stresses in the root-zone. *Revista Ceres*, 69, 148–157.
- Sipos, L., Boros, I. F., Csambalik, L., Székely, G., Jung, A., & Balázs, L. (2020). Horticultural lighting system optimization: A review. *Scientia Horticulturae*, 273, 109631. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109631>
- Stutte, G. W., Edney, S., & Skerritt, T. (2009). Photoregulation of bioprotectant content of red leaf lettuce with light-emitting diodes. *HortScience*, 44(1), 79–82.
- Swarup, R., & Bennett, M. (2014). Auxin transport: providing plants with a new sense of direction. *The Biochemist*, 36(2), 12–15.
- Swarup, R., Kramer, E. M., Perry, P., Knox, K., Leyser, H. M. O., Haseloff, J., Beemster, G. T. S., Bhalerao, R., & Bennett, M. J. (2005). Root gravitropism requires lateral root cap and epidermal cells for transport and response to a mobile auxin signal. *Nature Cell Biology*, 7(11), 1057–1065.
- Swarup, R., & Péret, B. (2012). AUX/LAX family of auxin influx carriers—an overview. *Frontiers in Plant Science*, 3, 225.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (1991). *Plant Physiology*. Benjamin/Cummings Publishing Company. <https://books.google.pt/books?id=KeIUAQAAIAAJ>
- Takahashi, N., Goto, N., Okada, K., & Takahashi, H. (2002). Hydrotropism in abscisic acid, wavy, and gravitropic mutants of *Arabidopsis thaliana*. *Planta*, 216, 203–211.
- Tavares, H. (1998). *A cultura da Alface*. DIREÇÃO-GERAL DE PLANEAMENTO E AGRICULTURA.
- Thomas, B., & Vince-Prue, D. (1996). *Photoperiodism in plants*. Elsevier.
- Touliatos, D., Dodd, I. C., & McAinsh, M. (2016a). Vertical farming increases lettuce yield per unit area compared to conventional horizontal hydroponics. *Food and Energy Security*, 5(3), 184–191.
- Touliatos, D., Dodd, I. C., & McAinsh, M. (2016b). Vertical farming increases lettuce yield per unit area compared to conventional horizontal hydroponics. *Food and Energy Security*, 5(3), 184–191.
- Trewavas, A. (2000). Signal perception and transduction. *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*, 930, 987.

- Violet-Chabrand, S., Matthews, J. S. A., Simkin, A. J., Raines, C. A., & Lawson, T. (2017). Importance of fluctuations in light on plant photosynthetic acclimation. *Plant Physiology*, 173(4), 2163–2179.
- Vinci, G., & Rapa, M. (2019). Hydroponic cultivation: Life cycle assessment of substrate choice. *British Food Journal*, 121(8), 1801-1812.
- Vox, G., Teitel, M., Pardossi, A., Minuto, A., Tinivella, F., & Schettini, E. (2010). Sustainable greenhouse systems. *Sustainable Agriculture: Technology, Planning and Management*; Salazar, A., Rios, I., Eds, 1–78.
- Weller, J. L., & Kendrick, R. E. (2008). Photomorphogenesis and photoperiodism in plants. In *Photobiology: The Science of Life and Light* (pp. 417–463). Springer.
- Wever, G., Van Leeuwen, A. A., & Van der Meer, M. C. (1996). Saturation rate and hysteresis of substrates. *International Symposium Growing Media and Plant Nutrition in Horticulture* 450, 287–296.
- Whitaker, T. W. (1974). *Lettuce production in the United States* (Issue 221). Agricultural Research Service, US Department of Agriculture.
- Wojciechowska, R., Długosz-Grochowska, O., Kołton, A., & Żupnik, M. (2015). Effects of LED supplemental lighting on yield and some quality parameters of lamb's lettuce grown in two winter cycles. *Scientia Horticulturae*, 187, 80–86.
- Wolverton, C., Ishikawa, H., & Evans, M. L. (2002). The kinetics of root gravitropism: dual motors and sensors. *Journal of Plant Growth Regulation*, 21(2).
- Yorio, N. C., Goins, G. D., Kagie, H. R., Wheeler, R. M., & Sager, J. C. (2001). Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation. *HortScience*, 36(2), 380–383.
- Yongkang T., Yunze S., Hongqi F., Hao W., Ruixin M., Weidang A., Zhiqiang W. (2023). Study on primary physicochemical characteristics and nutrient adsorption of four plant cultivation substrates. *Life Sciences in Space Research*. Volume 36. 2023. Pages 78-85.
- Zhang, Y., Kacira, M., & An, L. (2016). A CFD study on improving air flow uniformity in indoor plant factory system. *Biosystems Engineering*, 147, 193–205.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.04.012>

Anexos

a. Rabanete





b. Coentro





c. Alface



d. Sistema OGarden smart





