

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM TECNOLOGIAS COMPUTACIONAIS PARA O
AGRONEGÓCIO

MARCOS TIAGO ARAÚJO DE FRANÇA

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL EM UM
MODELO DE PLANTIO VERTICAL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MEDIANEIRA

2021

MARCOS TIAGO ARAÚJO DE FRANÇA

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL EM UM MODELO DE
PLANTIO VERTICAL**

Study of the Application of Artificial Lighting in a Vertical Farming Model

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Tecnologias Computacionais para o Agronegócio da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Augusto Vaghetti Luchese

MEDIANEIRA

2021



Esta obra está licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição, Não Comercial, Compartilha Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0). Para ver uma cópia desta licença, visite o endereço <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> ou envie uma carta para Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Medianeira**



MARCOS TIAGO ARAUJO DE FRANCA

ESTUDO DA APLICAÇÃO DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL EM UM MODELO DE PLANTIO VERTICAL

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Tecnologias Computacionais Para O Agronegócio da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Tecnologias Computacionais Aplicadas À Produção Agrícola E Agroindústria.

Data de aprovação: 23 de Agosto de 2021

Prof Augusto Vaghetti Luchese, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Alessandro Jefferson Sato, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Prof.a Fabiana Costa De Araujo Schutz, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Pedro Luiz De Paula Filho, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 24/08/2021.

RESUMO

FRANÇA, Marcos Tiago Araújo de. ESTUDO DA APLICAÇÃO DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL EM UM MODELO DE PLANTIO VERTICAL. 94 f. Dissertação de Mestrado – Mestrado em Tecnologias Computacionais para o Agronegócio, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2022.

Este trabalho teve como objetivo a análise da aplicação de iluminação artificial sobre cultivares de alface crespa, através do uso de LEDs, aplicados a uma nova metodologia de plantio conhecida como Fazendas Verticais. Para este fim foi realizada a construção de um modelo de plantio vertical protótipo, composto por 21 unidades de produção isoladas, dotadas de sensores para recolhimento de dados ambientais e atuadores para controle de iluminação intermitente RGB e irrigação hidropônica. Com o modelo construído, foram realizados dois ensaios experimentais: avaliação da aplicação de diferentes tratamentos de luz (vermelho, azul, roxo, branco) e aplicação de diferentes intensidades de luz branca (36 LEDs, 54 LEDs e 72 LEDs). Em ambos os experimentos, de duração de 30 dias, foram feitas as análises do peso total da massa fresca, peso da massa seca, área foliar e número de folhas. No primeiro experimento, realizado durante o verão e com uso de climatização, a aplicação do espectro branco (combinação entre vermelho, azul e verde), apresentou os melhores resultados em todas as variáveis analisadas, seguida pelo espectro roxo (combinação entre vermelho e azul), em contrapartida o tratamento vermelho apresentou os piores resultados, considerando que as amostras referentes ao mesmo pereceram após 15 DAT. No segundo experimento, após uma análise de regressão, observou-se que a intensidade de luz foi a variável que mais influenciou as massas obtidas (massa seca e massa fresca), em contrapartida, a intensidade de luz não apresentou influência significativa com o número de folhas. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Palavras-chave: agricultura, fazenda vertical, led, iot

ABSTRACT

FRANÇA, Marcos Tiago Araújo de. STUDY OF THE APPLICATION OF ARTIFICIAL LIGHTING IN A VERTICAL FARMING MODEL. 94 f. Dissertação de Mestrado – Mestrado em Tecnologias Computacionais para o Agronegócio, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2022.

This work aimed to analyze the application of artificial lighting on crispy lettuce cultivars, through the use of LEDs, applied to a new planting methodology known as Vertical Farms. For this purpose, a prototype vertical planting model was built, consisting of 21 isolated production units, equipped with sensors to collect environmental data and actuators for controlling RGB intermittent lighting and hydroponic irrigation. With the built model, two experimental tests were carried out: evaluation of the application of different light treatments (red, blue, purple, white) and application of different white light intensities (36 LEDs, 54 LEDs and 72 LEDs). In both experiments, lasting 30 days, the analyzes of the total fresh mass weight, dry mass weight, leaf area and number of leaves were carried out. of the white spectrum (combination between red, blue and green), presented the best results in all analyzed variables, followed by the purple spectrum (combination between red and blue), in contrast, the red treatment presented the worst results, considering that the referring samples at the same they perished after 15 DAT. In the second experiment, after a regression analysis, it was observed that the light intensity was the variable that most influenced the obtained masses (dry mass and fresh mass), on the other hand, the light intensity had no significant influence with the number of sheets. This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

Keywords: agriculture, vertical farming, led, iot

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Representação das Variantes de Clorofila responsáveis pela fotossíntese das plantas	17
FIGURA 2	– Abrangência de espectro (Comprimento de Onda) emitido por diferentes fontes de iluminação	20
FIGURA 3	– Lâmpadas de Vapor de Alta Pressão utilizada para cultivo <i>indoor</i>	21
FIGURA 4	– Variantes de Lâmpadas Fluorescente utilizada para cultivo <i>indoor</i>	22
FIGURA 5	– Diferentes variações de diodos emissores de Luz (LEDs)	23
FIGURA 6	– Dados referentes a concentração nutricional relativa na cultura de Acelga Pak Choi sobre diferentes espectros de luz após a semeadura	24
FIGURA 7	– Diferentes ramos de aplicabilidade da IoT na atualidade	27
FIGURA 8	– Exemplos de diferentes Plataformas Embarcadas da atualidade.	28
FIGURA 9	– Diagrama representativo de um sistema agrícola IoT controlado remotamente via <i>Dashboard</i>	30
FIGURA 10	– Protótipo de Sensor de Irrigação Inteligente (IoT), baseado na leitura da Umidade do Solo	31
FIGURA 11	– Mudas de Transporte de Alface Crespa (<i>Lactuca sativa var. crispata</i>)	33
FIGURA 12	– Logística da Cadeia Produtiva Agrícola Tradicional	35
FIGURA 13	– Capacidade de Direcionamento dos fótons emitidos por lampadas LEDS sobre uma superfície de produção	36
FIGURA 14	– Gráfico referente a curva de fotossíntese	37
FIGURA 15	– Gráfico referente á aplicação de diferentes sistemas hidropônicos documentados em artigos científicos no intervalo de 1993 a 2017	39
FIGURA 16	– Aplicação de um Modelo hidropônico com utilização de substrato (base-média)	39
FIGURA 17	– Aplicação de um Modelo hidropônico por flutuação	40
FIGURA 18	– Aplicação de um Modelo hidropônico com utilização da técnica NFT	41
FIGURA 19	– Representação de um Modelo Aquaponico Cíclico	42
FIGURA 20	– Representação de um Modelo Aeroponico	43
FIGURA 21	– Representação dos Modos de Construção de um Modelo de Plantio Vertical	44
FIGURA 22	– Torre de Produção Multinível Vertical utilizada pela Aerofarms	45
FIGURA 23	– Instalação interna para crescimento <i>indoor</i> da PlantLabs	46
FIGURA 24	– Instalações para <i>Vertical Farming</i> da Empresa Spread	46
FIGURA 25	– The Greenery, primeiro modelo de Fazenda Vertical em Contêiner disponível no mercado	47
FIGURA 26	– Níveis de Produção Vertical de hortaliças utilizados pela empresa brasileira Pink Farms	48
FIGURA 27	– Representação do projeto protótipo da Torre Multinível e seus periféricos	50
FIGURA 28	– Topologia Mestre/Escravo utilizada para Concepção do Modelo Vertical Protótipo	51
FIGURA 29	– Caixa de Conexão Cega acoplada aos níveis de produção	52
FIGURA 30	– Esquema elétrico referente às Caixas de Conexão Cega acopladas aos níveis de produção	53

FIGURA 31	– Placa Escrava (Mega 2560) acoplada ao <i>shield</i> de conexão	54
FIGURA 32	– Esquema eletrônico do <i>shield</i> de conexão	55
FIGURA 33	– Sensores Utilizados para o Recolhimento de dados do Modelo Vertical	56
FIGURA 34	– Gabinete de Controle dos níveis de produção	57
FIGURA 35	– Estrutura de Iluminação com uso do módulo WS2811 aplicadas no Modelo Vertical	59
FIGURA 36	– Projeto Protótipo para unidade de armazenamento e irrigação.	60
FIGURA 37	– Bandeja Hidropônica de Flutuação para plantio.	61
FIGURA 38	– Modelo de Plantio Vertical resultante	62
FIGURA 39	– Fluxograma referente à rotina de software utilizada no modelo de plantio vertical.	63
FIGURA 40	– Correção no módulo de hora DS3231	64
FIGURA 41	– Exemplo de arquivo de saída de dados ambientais capturados.	65
FIGURA 42	– Gráfico de Temperatura Média Diária durante a validação de ambiente	69
FIGURA 43	– Gráfico de Umidade média Diária durante o experimento de validação.	69
FIGURA 44	– Experimento de validação simulando a rotina de funcionamento (iluminação/irrigação).	70
FIGURA 45	– Bandeja Hidroponia por flutuação dotada de um areador	71
FIGURA 46	– Modelo de Plantio Vertical após o primeiro Ensaio Experimental	72
FIGURA 47	– Gráfico de Temperatura média Diária durante o experimento de crescimento com diferentes espectros de luz.	73
FIGURA 48	– Gráfico de Umidade média Diária durante o experimento de crescimento com diferentes espectros de luz.	73
FIGURA 49	– Representação de Amostras expostas a diferentes espectros de luz sobre culturas de alface durante o período de 30 dias	74
FIGURA 50	– Resultados do teste de Tukey referente ao total de folhas sobre diferentes tratamentos de luz	75
FIGURA 51	– Resultados do teste de Tukey referente à área foliar sobre diferentes tratamentos de luz	76
FIGURA 52	– Resultados do teste de Tukey referente à massa seca sobre diferentes tratamentos de luz	77
FIGURA 53	– Resultados do teste de Tukey referente à massa fresca sobre os tratamentos de luz (vermelho, azul, roxo e branco).	78
FIGURA 54	– Modelo de Plantio Vertical Experimental após a adição de novos pontos de iluminação.	79
FIGURA 55	– Gráfico de Temperatura média Diária durante o experimento de crescimento com diferentes proporções de luz.	80
FIGURA 56	– Gráfico de Umidade média Diária durante o experimento de crescimento com diferentes proporções de luz branca.	80
FIGURA 57	– Representação de Amostras expostas a diferentes proporções de luz branca sobre culturas de alface durante o período de 30 dias	82
FIGURA 58	– Gráfico de Dispersão referente aos parâmetros morfológicos de culturas de alface submetidas a diferentes proporções de LEDs Branco.	83

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Comparativo de especificações entre a plataforma Arduino e Raspberry Pi	29
TABELA 2	– Resultados amostrais obtidos a partir da aplicação de diferentes proporções de luz led branca (RGB) sobre culturas de alface durante 30 dias.	81

LISTA DE SIGLAS

LED	Light Emitting diode
Clh a	Clorofila a
Clh b	Clorofila b
RFA	Radiação Fotossinteticamente Ativa
IoT	Internet of Things
RFID	Radio Frequency Identification
IP	Internet Protocol
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
NFT	Fluxo Laminar de Nutrientes
DAT	Dias após o transplante
massa fresca	MF
massa seca	MS
área foliar	AF

LISTA DE SÍMBOLOS

CO ₂	Dióxido de Carbono
E	Energia pertencente ao fóton
f	Frequência da radiação eletromagnética
h	Constante de Planck

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVAS	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1 PROCESSO DE FOTOSSÍNTESE	16
3.1.1 Clorofila	16
3.1.2 Absorção de Luz	17
3.2 CRESCIMENTO INDOOR	18
3.2.1 Iluminação Artificial no Cultivo Indoor	19
3.2.1.1 Lâmpadas de Alta Pressão	21
3.2.1.2 Lâmpadas Fluorescentes	22
3.2.1.3 Lâmpadas LEDs	23
3.3 INTERNET DAS COISAS	25
3.3.1 Sistemas Embarcados	27
3.3.2 Aplicação da IoT na Agricultura	29
3.4 FAZENDAS VERTICAIS	31
3.4.1 Ecofisiologia da Alface	33
3.4.2 Viabilidade Logística e Econômica das Fazendas Verticais	34
3.4.3 Acesso a Iluminação para Produção	35
3.4.4 Uso de Água	37
3.4.5 Técnicas de Irrigação aplicadas as Fazendas Verticais	38
3.4.6 Modos de Construção	43
3.4.7 Fazendas Verticais na Atualidade	45
4 MATERIAIS E MÉTODOS	49
4.1 MODELO DE PLANTIO VERTICAL PROTÓTIPO	49
4.1.1 Projeto das Torres de Produção	49
4.1.2 Conexão entre equipamentos de Hardware utilizados	50
4.1.3 Sensores para o Recolhimento de Dados	55
4.1.4 Gabinete de Controle	57
4.1.5 Método de Iluminação	58
4.1.6 Sistema de Irrigação	59
4.1.7 Modelo de Plantio Vertical Resultante	61
4.1.7.1 Teste de Rotina de Execução	64
4.2 EXPERIMENTAÇÃO PRÁTICA	65
4.2.1 Seleção da Cultura	65
4.2.2 Caracterização dos Ensaios Experimentais	66
4.2.2.1 Análise da aplicação de diferentes combinações de Espectros de Iluminação	67
4.2.2.2 Análise dos Efeitos da aplicação de diferentes intensidades de iluminação sobre a cultura	67

5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
5.1	VALIDAÇÃO DO AMBIENTE DE TESTES	68
5.2	VALIDAÇÃO DE IRRIGAÇÃO	70
5.3	EXPERIMENTOS PRÁTICOS	71
5.3.1	Ensaio I	72
5.3.2	Ensaio II	79
6	CONCLUSÕES	85
6.1	TRABALHOS FUTUROS	85
	REFERÊNCIAS	87

1 INTRODUÇÃO

A evolução dos modelos produtivos na agricultura encontra-se diretamente associada ao avanço técnico-científico que, de forma mais intensa nas últimas décadas, vem se utilizando de suportes computacionais, melhorando a otimização de produção e qualidade da cultura e reduzindo os custos. Dentre as inovações tecnológicas, surge uma nova metodologia de plantio conhecida como Fazendas Verticais, ou modelo de plantio vertical, que tem como objetivo a produção em larga escala no meio urbano com o uso de tecnologia para monitoramento e automação de processos.

De acordo com Despommier (2011), as Fazendas Verticais se apresentam como uma metodologia de plantio que se utiliza de conceitos adotados em casas de vegetação, porém, diferentemente de uma casa de vegetação, a área plantada é disposta no formato de colunas, possuindo vários andares, otimizando a produção em relação a área de plantio.

A otimização de área plantada proporcionada pela utilização da metodologia de plantio vertical promovendo conseqüentemente o aumento na produção, possibilita o enfrentamento do aumento da demanda por alimentos, que por sua vez esta diretamente relacionada ao crescimento populacional. De acordo com a FAO (2017), estima-se que a população mundial deva chegar aproximadamente a 9,8 bilhões no ano de 2050, de forma que para atender esta demanda seria necessário um acréscimo de 70% na produção agrícola.

A ascensão de tecnologias como a IoT, também conhecida como Internet das Coisas, foi um fator determinante para a viabilidade de implantação das Fazendas Verticais. Para Ferreira et al. (2020), a IoT possibilita a conexão de sensores a objetos de forma que estes, por sua vez, se tornariam inteligentes possibilitando a tomada de decisões em tempo real através da captura de informações no contexto que se está inserido.

No Brasil, o Plano Nacional de Internet das Coisas tem como objetivo a aceleração da implementação da IoT em diversas áreas consideradas prioritárias, como cidades inteligentes, agricultura, saúde e indústria. Estima-se que a implementação deste conceito em larga escala poderá impactar positivamente a agricultura no país em aproximadamente US\$ 21 bilhões até o ano de 2025 (EMBRAPA, 2018).

Com a aplicação destas tecnologias na agricultura surge um novo segmento conhecido

como Agricultura Inteligente (do Inglês, Smart Farms), este novo ramo no qual as Fazendas Verticais encontram-se inserida, vem trazendo benefícios na medida em que se tem um controle maior do ambiente.

Entre os aspectos da agricultura que vem apresentando bons resultados da aplicação da IoT tem-se a economia de água. Destacando-se a solução proposta por Kamienski e Visoli (2018), conhecida como SWAMP, sendo esta uma das melhores plataformas de irrigação baseadas na aplicação de IoT, que visa desenvolver métodos para o gerenciamento inteligente de água na irrigação de precisão. Há atualmente 4 projetos pilotos instalados no Brasil e na Europa, nos quais o foco da plataforma envolve a capacidade de adaptação para diferentes culturas, climas e países.

Assim como outras metodologias presentes no escopo da agricultura inteligente as Fazendas Vertical vêm apresentando bons resultados referentes a economia de água se comparado com técnicas de plantio mais tradicionais. Na solução proposta por Adenaeuer (2014), na qual em uma Fazenda Vertical com capacidade de suprir a demanda de 15000 pessoas sendo necessários aproximadamente 217.000 litros de água diariamente, contudo por se utilizar de um sistema cíclico de reaproveitamento, seriam absorvidos diariamente apenas 14.000 litros pelas culturas ali produzidas, de forma que a perda para o ambiente seria mínima.

Além do gerenciamento do uso de água, a concepção de um modelo de produção que se utiliza de IoT, abre caminho para novas possibilidades, como a capacidade do uso de técnicas de processamento de imagem para monitoramento do crescimento de produção e controle de pragas (JHURIA et al., 2013), é gerenciamento e controle de fatores ambientais como temperatura, umidade do ar e níveis de Dióxido de Carbono (ZEIDLER et al., 2017), sendo este segundo um dos pilares envolvidos na aplicação das Fazendas Verticais.

Desta forma, o controle ambiental aplicado Fazendas Verticais, é responsável pelos bons resultados de qualidade do produto final, entre os estudos que corroboram esta afirmação tem-se o trabalho desenvolvido pela empresa holandesa PlantLabs. As fazendas verticais da PlantLabs utilizam 95% menos de água em relação a uma casa de vegetação tradicional, este resultado foi possível devido a implementação destes sistemas inteligentes no gerenciamento do ambiente, como controles de concentração de dióxido de carbono, temperatura, umidade do ar e do solo (KOERT, 2018).

Sendo classificada como um modelo de plantio *indoor*, as Fazendas Verticais, por serem aplicadas em um ambiente isolado para o controle do ambiente, é necessário a utilização de métodos alternativos de iluminação em substituição a luz solar. Atualmente, a utilização de Diodos Emissores de Luz (do Inglês *Light Emitting diodes*), também conhecidos como LED, apresenta os melhores resultados, no que tange a substituição da luz natural. Em relação

as fontes de iluminação artificial anteriores a aplicação de LEDs possibilita ao produtor a capacidade de aplicação de diferentes tratamentos de luz (regulagem da saída espectral) e o controle de intensidade luminosa.

Segundo (MICKENS et al., 2018), cuja pesquisa tinha como objetivo avaliar os impactos de diferentes espectros de luz sobre culturas de Acelga Pak Choi Vermelhas (*Brassica rapa var. chinensis*) para a produção no espaço fora da estratosfera, a combinação entre determinados espectros de luz apresenta influência direta em fatores morfológicos, como área de crescimento foliar e fatores nutricionais. É evidente que a flexibilidade obtida através do uso da tecnologia LED possibilita ao produtor a obtenção de culturas que atendam a sua necessidade. Desta forma mostra-se interessante um estudo envolvendo a aplicação prática do conceito de plantio vertical e suas peculiaridades, em especial a iluminação artificial.

1.1 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVAS

Com o surgimento das Smart Farms (do Inglês, Fazendas Inteligentes), fruto do advento tecnológico e popularização da IoT, novas metodologias de plantio tal qual as Fazendas Verticais (do Inglês *Vertical Farms*) vêm ganhando destaque. Como consequência da aplicação em um ambiente controlado e uso de técnicas de plantio sem solo, a utilização de modelos de plantio vertical proporcionam a diminuição da necessidade do uso de agrotóxicos para o controle de pragas, o que acarretaria na proteção dos lençóis freáticos, pois os resíduos advindos da utilização de agrotóxicos seriam coletados em locais específicos. De acordo com a ANVISA (2008), o Brasil se tornou desde 2008 o maior consumidor de agrotóxicos do mundo, ultrapassando os EUA.

Os modelos de plantio vertical são positivos devido a diminuição ou até mesmo o não uso de agrotóxicos na produção, bem como propiciam a redução da utilização de espaço físico, o que ensejaria a instalação no meio urbano, como é demonstrado pela empresa SPREAD (SPREAD, 2007). Esta aplicação, por sua vez, traz como vantagem a geração de empregos e otimização de logística, considerando a diminuição do tempo de transporte dos alimentos para o consumidor, permitindo até mesmo a compra sob demanda, o que diminuiria, ou até mesmo eliminaria o uso de conservantes (DESPOMMIER, 2013).

Um dos principais desafios na implementação de modelos de plantio vertical envolve a utilização de iluminação LED. O estudo realizado por Snowden et al. (2016), concluiu

que a resposta obtida através do uso de iluminação LED está diretamente relacionada ao cultivo/espécie no qual esta é aplicada, e em alguns casos relacionadas a duração do tratamento aplicado, estágio de desenvolvimento, intensidade luminosa ou outros fatores ambientais.

Considerando que a obtenção da iluminação artificial adequada é um grande desafio, espera-se com o desenvolvimento deste trabalho resultados referentes a aplicação de espectros de iluminação distintos, em um modelo de plantio vertical, através do uso LEDs e suas consequências em relação a morfologia da cultura utilizada (massas, numero de brotos e área foliar). Além de respostas ao que tange a aplicação de iluminação artificial. A execução deste trabalho almeja o estudo e documentação de parâmetros adjacentes ao modelo de plantio vertical como a aplicação da IoT para atuação e sensoriamento.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Construção de um modelo de plantio vertical de baixo custo aplicando conceitos inerentes a IoT, seguido pela execução de estudos no que se refere a aplicação de LEDs como fonte de iluminação primária.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolvimento de uma estrutura de plantio vertical (Fazenda Vertical), capaz de comportar a produção de alface crespa, dotada de atuadores de irrigação e iluminação.
- Aplicação de sensoriamento para recolhimento de dados ambientais (umidade do Solo, umidade do Ar, temperatura e níveis de CO_2), nos níveis de produção da estrutura de plantio vertical.
- Desenvolvimento de um software (rotina) autônoma para manutenção do sistema construído, utilizando-se de temporizadores para comunicação de dados, sensoriamento e atuação.
- Determinação da eficiência de diferentes tratamentos como espectro e intensidade luminosa distintos sobre alface de forma que seja possível determinar o melhor aproveitamento.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 PROCESSO DE FOTOSSÍNTESE

A fotossíntese consiste em um processo biológico realizado por algas, micro-organismos e plantas, através da absorção da energia solar e sua conversão em energia química (GONZÁLEZ, 2019). O processo biológico executado durante a fotossíntese nas plantas tem como objetivo a transformação do dióxido de carbono (CO_2) e água em macromoléculas de carboidratos (FLEXAS et al., 2011).

Complementando este conceito, de acordo com Margulis e Schwartz (2001), além da retirada de dióxido de carbono do ambiente, podem ser produzidos oxigênio ou enxofre, no caso das plantas, tem-se o oxigênio como resultado final do processo. De acordo com KRAUS (2005), o processo fotossintético nas plantas é realizado por um pigmento conhecido como clorofila.

3.1.1 Clorofila

Tendo um papel importante no processo de fotossíntese, a clorofila (Figura 1), especificamente a Clorofila "a" (Clh a), sendo esta variação presente em todos os seres que realizam a fotossíntese oxigênica. Enquanto que nas bactérias fotossintetizantes, sendo estas desprovidas de Clorofila "a", este processo é realizado através de um pigmento conhecido como bacterioclorofila (TAIZ; ZEIGER, 2006).

Além da Clh a outros pigmentos estão envolvidos no processo de fotossíntese, porém, de forma menos direta como a Clorofila "b" (Clh b), os carotenoides e as ficobilinas. A energia

luminosa absorvida por estes pigmentos, conhecidos como pigmentos acessórios, é transferida para os centros de reação, localizados sobre as membranas tilacoides. Existem dois centros de reação, o primeiro é responsável pela absorção de espectro de luz na faixa de 680nm e o segundo na faixa de 700nm que interagem entre si (SIEFERMANN-HARMS, 1985).

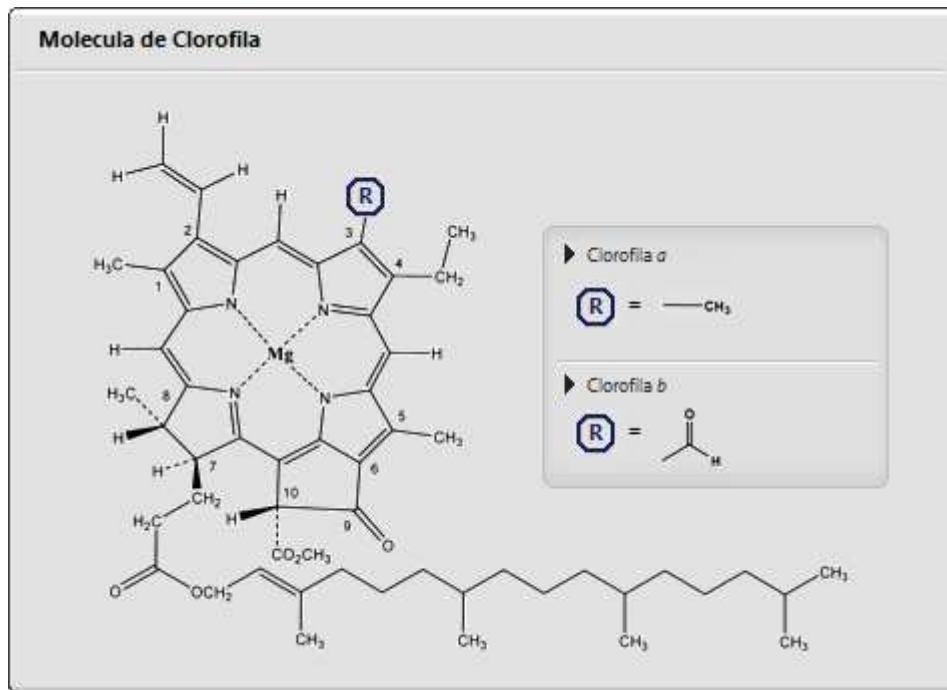


Figura 1 – Representação das Variantes de Clorofila responsáveis pela fotossíntese das plantas: Clh a (Clorofila a) e Clh b (Clorofila b).

Fonte: Adaptado de (STREIT et al., 2005)

3.1.2 Absorção de Luz

A absorção de luz é um fator crucial para o processo de fotossíntese que se utiliza da radiação solar que varia entre 300nm a 1000nm como fonte luminosa primária . Para este fim, contudo é feito o aproveitamento de apenas 50% da energia radiante solar que varia entre 300nm a 1000nm, sendo esta região conhecida como Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) (BOYLE, 2004).

A energia luminosa que compreende a região RFA é absorvida pela a cultura em pequenos pacotes de energia conhecidos como fótons, que são diretamente relacionados com o comprimento de onda (RAVEN et al., 2013). De acordo com Einstein (2001), os fótons são

partículas que compõem a luz e transportam energia contida nas radiações eletromagnéticas, podendo ser definidas pela equação 1, sendo E a energia pertencente ao fóton, f a frequência da radiação eletromagnética (Hz) e h a Constante de Planck.

$$E = h * f \quad (1)$$

Nas plantas os fótons são absorvidos através de um sistema de coleta conhecido como Antena, este é responsável por canalizar a energia absorvida por 50 a 1000 moléculas de clorofila, em conjunto com os pigmentos acessórios, para o centro de reação. Como o próprio nome remete é no centro de reação que são realizadas de forma contínua as reações fotoquímicas para transferência de elétrons com alta energia do aceptor para outras moléculas transportadoras (RAVEN et al., 2013).

A quantidade de luz solar sobre a qual uma cultura se encontra exposta é um fator importante para a execução do processo de fotossíntese. Contudo o excesso de luz mostra-se prejudicial, como consequência do excesso de exposição à luz tem-se dois efeitos conhecidos como processo de foto-inibição (reversível) e processo de foto-oxidação (irreversível) respectivamente.

A foto-inibição envolve danos aos centros de reação enquanto a foto-oxidação envolve os pigmentos receptores de luz, que após absorverem luz em excesso produzem radicais livres capazes de destruir as membranas dos cloroplastos (ANDERSON, 1986; ANDERSON; ANDERSSON, 1988). Com o objetivo de se produzir culturas de qualidade, atualmente são aplicadas técnicas para se evitar danos por excesso de iluminação, como o uso de iluminação artificial controlada.

3.2 CRESCIMENTO INDOOR

O acesso à luz solar se mostra essencial para execução do processo de fotossíntese e como consequência o crescimento saudável de uma cultura. Entretanto uma nova modalidade de produção, conhecida como cultivo *indoor*, que tem como objetivo a produção em ambientes internos que não possuem acesso a luz solar natural, utiliza métodos de iluminação artificiais para permitir a execução da fotossíntese.

O entendimento das condições nas quais são expostas as culturas no ambiente interno se mostra essencial para a produção *indoor*, considerando que apresenta significativas diferenças para os modelos de cultivo tradicionais em ambientes externos, afetando diversas

variáveis ambientais como condições de iluminação, temperatura, umidade, água e solo (PENNISI, 2009).

3.2.1 Iluminação Artificial no Cultivo Indoor

O acesso adequado à iluminação em ambientes *indoor* se mostra como o fator mais importante, considerando as necessidades da cultura para crescer e produzir frutos (PENNISI, 2009). Atualmente existem diversas alternativas para o acesso a iluminação em ambientes *indoor*, nas quais estas apresentam características únicas referente à emissão de fótons e sua abrangência de comprimento de onda (Figura 2), como: LEDs, lâmpadas de vapor de alta pressão ou lâmpadas fluorescentes.

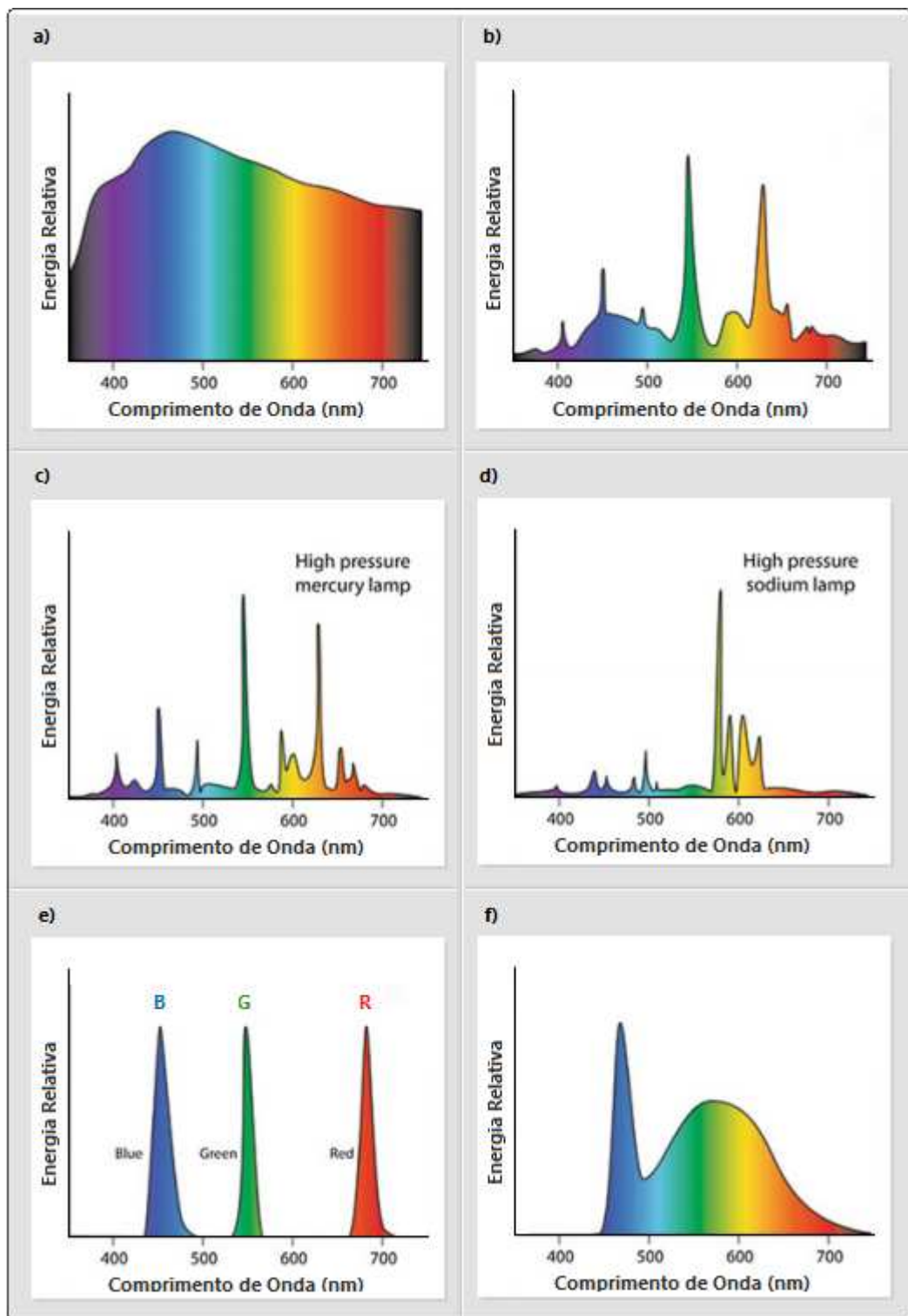


Figura 2 – Abrangência de espectro emitido por diferentes fontes de iluminação: (a) Luz Solar, (b) Lâmpada Fluorescente, (c) Lâmpada de Alta Pressão de Mercúrio, (d) Lâmpada de Alta Pressão de Sódio, (e) Lâmpadas LED Monocromáticas, (f) Lâmpada LED Branca "LED Azul com Fósforo"

Fonte: Adaptado de (GUPTA; AGARWAL, 2017)

3.2.1.1 Lâmpadas de Alta Pressão

As lâmpadas de alta pressão (Figura 3), uma subcategoria das lâmpadas de descarga, podem ser descritas como fontes de iluminação que operam sob alta pressão e temperatura, o seu funcionamento envolve a descarga da eletricidade através de um gás, sendo este ionizado durante o processo, por meio do uso de reatores. Os fatores pressão e temperatura estão diretamente relacionados ao espectro de iluminação resultante e sua eficácia luminosa, devido ao fato de que metais vaporizados conduzem eletricidade melhor sob alta pressão, levando a um maior número de excitações de elétrons e mais emissões termiônicas (KITSINELIS, 2011).

O grande diferencial entre as variações de lâmpadas de alta pressão disponíveis existentes envolve o vapor utilizado na sua concepção para o processo de descarga, como:

- **Vapor de Mercúrio:** Formadas a partir de uma mistura de vapor de Mercúrio e Argônio, sendo este último utilizado no tubo interno pressurizado. São lâmpadas de alta eficácia luminosa, aproximadamente 60 lumens/watt, sendo seu bulbo revestido com fósforo, com objetivo de garantir um isolamento térmico e proteção do produtor luminoso da radiação ultravioleta (Vrugt; Verwimp, 1980);
- **Vapor de Sódio:** Diferentemente das lâmpadas de mercúrio, as lâmpadas de Vapor de Sódio utilizam gás xénon em vez de argônio no seu tubo pressurizado. Apresentam uma cobertura maior sobre o espectro de iluminação visível em relação às Lâmpadas de Mercúrio, nas quais os vapores são mantidos com cerâmica ou tubo de alumínio policristalino, sendo estes capazes de lidar com a natureza corrosiva dos vapores de sódio sobre as condições de alta temperatura e pressão (KITSINELIS, 2011).



Figura 3 – Lâmpadas de Vapor de Alta Pressão utilizada para cultivo *indoor* (Mercúrio e Sódio).

Fonte: Adaptado de (GUPTA; AGARWAL, 2017)

Para o cultivo, as lâmpadas de vapor de alta-pressão, independentemente do tipo de gás utilizado, são capazes de fornecer iluminação para quaisquer tipos de planta, sem restrições a porte e quantidade. Não sendo recomendadas para produções *indoor* de pequeno porte. Para este uso, existe a necessidade de diversos ajustes no ambiente de cultivo para uma produção sustentável, como a instalação de exaustores devido à grande quantidade de calor gerada, além das mesmas apresentarem um alto consumo energético (PLANTEI, 2017).

3.2.1.2 Lâmpadas Fluorescentes

As lâmpadas fluorescentes (Figura 4) atualmente são bastante utilizadas para o plantio *indoor*, sendo estas lâmpadas de descarga de baixa pressão que se utilizam do gás mercúrio (GUPTA; AGARWAL, 2017). Essas lâmpadas apresentam grande eficiência energética, se comparadas a outras categorias como as lâmpadas incandescentes, além de apresentar uma qualidade de iluminação maior sobre diferentes ambientes (ZHU; HUMPHREYS, 2016). Cerca de 90% dos fótons emitidos por lâmpadas fluorescentes encontram-se entre 400nm a 700nm ou RFA, como resultado, a iluminação produzida se mostra próxima a iluminação solar.

Entretanto a saída espectral produzida por esta categoria de iluminação não pode ser regulada, além do fato que sua camada de revestimento apresenta temperaturas relativamente altas durante sua operação (GUPTA; AGARWAL, 2017).



Figura 4 – Variantes de Lâmpadas Fluorescente utilizada para cultivo *indoor*.

Fonte: Adaptado de (GUPTA; AGARWAL, 2017)

3.2.1.3 Lâmpadas LEDs

Sendo um objeto de estudo bastante abordado por cientistas que buscam alternativas sustentáveis em substituição à luz solar, as lâmpadas LEDs (Figura 5) se mostram uma alternativa eficiente para o plantio *indoor*, considerando diversos fatores como o seu baixo consumo energético e conseqüentemente baixa produção de calor (PLANTEI, 2017). A iluminação proveniente dos LEDs ocorre através de um estado sólido de chip de diodo semicondutor onde as radiações eletromagnéticas geradas por esse diodo são resultado da transição de elétrons dos orbitais de energia mais alto para o mais baixo (GUPTA; AGARWAL, 2017).

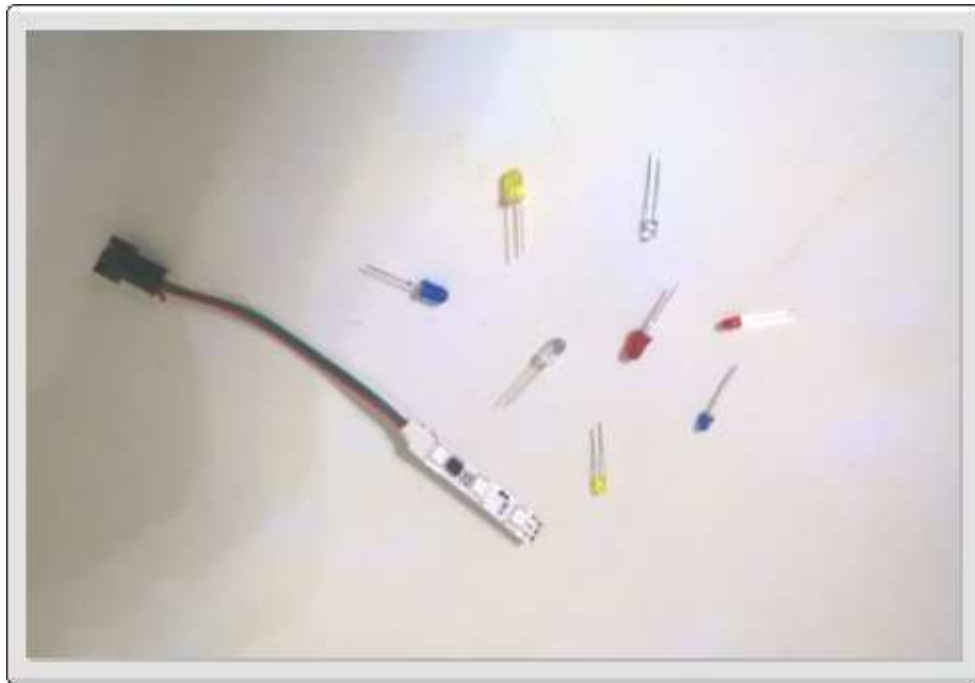


Figura 5 – Diferentes variações de diodos emissores de Luz (LEDs).

Fonte: Autoria Própria

Para o crescimento das plantas é necessária a utilização de fótons de iluminação presentes no intervalo RFA. Diferentemente das lâmpadas fluorescentes, a saída espectral resultante da iluminação LED pode ser regulada de forma que a cultura apresente a melhor resposta (RABARA et al., 2017). Esta característica se mostra um diferencial quando se trata do crescimento *indoor*, considerando que, de acordo com McCree (1971), alguns fótons apresentam-se mais eficientes durante o processo de fotossíntese do que outros, nos quais o espectro de luz vermelho que varia entre (600 - 700 nm) e azul (400nm - 500nm) são responsáveis por uma melhor taxa de assimilação de CO_2 (para produção de Oxigênio), destacando-se o espectro vermelho.

A combinação de diferentes espectros de luz LED, em especial entre o espectro de Luz vermelho e azul, vem apresentando excelentes resultados. De acordo com Mickens et al. (2018), cuja pesquisa envolveu o estudo de comparação entre diferentes espectros de luz, através do uso de LEDs, para o crescimento de Acelga Pak Choi Vermelhas, dentre as diferentes combinações de espectros aplicadas, a combinação entre vermelho e azul apresentou os melhores resultados, no que diz respeito ao crescimento foliar e níveis de antocianina (pigmentação).

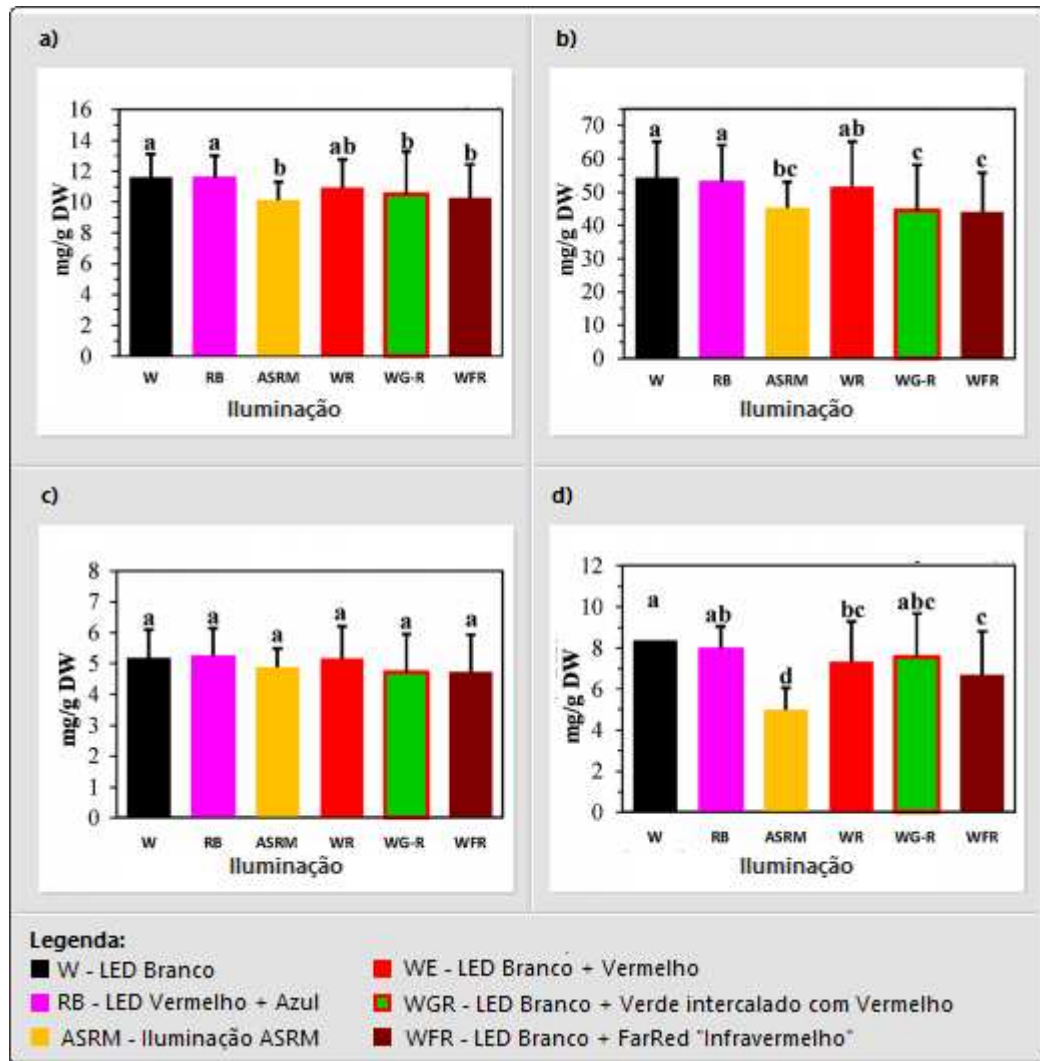


Figura 6 – Dados referentes a concentração nutricional relativa na cultura de Acelga Pak Choi sobre diferentes espectros de luz após a semeadura; a) Níveis de Cálcio "C"; b) Níveis de Potássio "K"; c) Níveis de Magnésio "Mg"; d) Níveis de Fósforo "P".

Fonte: Adaptado de (MICKENS et al., 2018)

A busca pela qualidade de iluminação para a melhoria dos níveis de antocianina, sendo este responsável pela pigmentação de determinadas culturas, quando utilizada iluminação LED, foi objeto de estudo de Keyser et al. (2019), no qual a utilização do espectro vermelho e azul, complementada com iluminação infravermelha (do Inglês *Far-red*) em plantas ornamentais,

apresentou resultados promissores, quando comparadas a plantas que crescem sem luz suplementar.

A capacidade de regular a saída espectral dos LEDs se mostra um diferencial, considerando que além de influenciar características morfológicas da cultura como o crescimento foliar, regula também a quantidade de antocianina e níveis de clorofila. A utilização de determinados espectros de luz influenciam na concentração de determinados nutrientes (Figura 6) presentes na cultura (MICKENS et al., 2018).

De acordo com a Figura 6, a aplicação de diferentes tipos de fontes de iluminação para o crescimento da cultura (variações do espectro de luz LED utilizado) apresentou influência direta na concentração de nutrientes presentes, em especial os níveis de fósforo, ficando evidente a necessidade de busca de qualidade de iluminação para otimizar o crescimento.

Dentro da comunidade científica não existe um consenso em relação a utilização do espectro de iluminação verde para a produção *indoor*. Inicialmente, no estudo de curta duração realizado por Went (1957), que teve como objeto de estudo a aplicação do espectro de luz verde através do uso de filtros sobre lâmpadas fluorescentes, verificou-se uma ineficiência da utilização do verde no plantio de tomates. Entretanto estudos recentes envolvendo a utilização de frações do espectro de iluminação verde com o uso de LEDs vêm apresentando resultados variados de acordo com a cultura utilizada.

De acordo com Kim et al. (2004), após experimentos realizados envolvendo a utilização de LEDs para aplicação do espectro de luz verde, verificou-se que a aplicação de 24% da mesma sobre uma cultura de alface em comparação a não utilização, trouxe como resultado um incremento da massa seca resultante da alface.

No ensaio científico realizado por Snowden et al. (2016), após a aplicação de diferentes espectros de luz de modo comparativo com uso de iluminação LED, verificou-se efeitos mínimos sobre a morfologia, variando de acordo com a cultura utilizada. Em contraste com a variação da utilização da luz azul, apresentou efeitos consideráveis sobre a morfologia das culturas (massa seca, área foliar, assimilação líquida) presentes no ensaio.

3.3 INTERNET DAS COISAS

Com o advento da Internet, a capacidade de comunicação e controle de dados em tempo real se tornou uma realidade, abrindo novas possibilidades. Dentre as possibilidades,

um novo paradigma surgiu, conhecido como Internet das Coisas (do Inglês *Internet of Things*) ou IoT. O termo IoT foi inicialmente utilizado para definir objetos interoperáveis conectados através do uso de Identificação de Rádio Frequência (do Inglês *Radio Frequency Identification*) ou RFID (ASHTON, 2009). Há, nos dias atuais, bem mais abrangência da IoT do que se acreditava inicialmente. Tem-se:

”Uma rede aberta e abrangente de objetos inteligentes com capacidade de auto-organização, compartilhamento informações, dados e recursos, agindo e reagindo diante de situações e mudanças no ambiente (MADAKAM et al., 2015).”

Seguindo a definição proposta por Madakam et al. (2015), de acordo com Höller et al. (2014), o termo Internet das Coisas surgiu com o objetivo de representar dispositivos eletrônicos que estão conectados com a internet, podendo estes possuir diferentes formas e capacidades, com um vasto escopo de conexões, e aplicações sobre uma ampla variedade de protocolos de rede, aplicativos e domínios de rede. Atualmente a IoT encontra-se aplicada em diversas áreas, e associada a diferentes tecnologias (Figura 7). De acordo com Miraz et al. (2015), determinados fatores foram imprescindíveis para o sucesso da adoção de tecnologias IoT nos dias atuais:

- **Adesão do IPV6:** Com o esgotamento dos endereços IPV4 disponíveis se aproximando, a chegada do IPV6 se mostrou crucial para o avanço das tecnologias IoT, considerando que, para a manutenção do sistema IPV4, seriam necessários bilhões de sensores dotados de um endereço IP (do Inglês *Internet Protocol*) único. Além da cobertura de endereços IP disponíveis, outro fator referente a adesão do IPV6 é a garantia de uma menor complexibilidade para o gerenciamento e proteção das redes de comunicação disponíveis a longo prazo;
- **Confiabilidade energética:** A necessidade de manter os sensores utilizados energizados por um período prolongado é um fator essencial para a aplicação de IoT. Em determinados ambientes, há enorme dificuldade de fornecimento de energia a esses sensores, o que obrigou a produção local de energia. Atualmente, na busca por soluções energéticas em ambientes de difícil produção e distribuição, fez-se necessário o uso de tecnologias como celulares, geradores solares, geradores térmicos, exploração de energia vibracional.



Figura 7 – Diferentes ramos de aplicabilidade da IoT na atualidade.

Fonte: Adaptado de (XU et al., 2014)

3.3.1 Sistemas Embarcados

A aplicação da IoT na atualidade está diretamente relacionada a popularização do uso de sistemas embarcados e sua acessibilidade ao público em geral. De acordo com AGUIAR (2011), um sistema embarcado é um sistema de hardware microprocessado, dedicado a realização de tarefas pré-definidas, designadas pelo sistema que o controla, geralmente possuindo restrições referentes ao tamanho físico, número de dispositivos acoplados e consumo energético. Entre os sistemas embarcados existentes no mercado, destacam-se a plataforma Arduíno e Raspberry Pi.

O Arduíno é uma plataforma embarcada livre que tem como diferencial a sua facilidade no uso para a montagem de circuitos e programação de software. As placas de Arduíno (Figura 8a), sendo estas capazes de executar a leitura de entradas (botões ou dados de sensores) e execução de saídas (ligar um LED ou publicar algo online), se apresentam como uma alternativa de baixo custo para a prototipação de sistemas embarcados (ARDUINO, 2020).

O Raspberry Pi é uma plataforma de baixo custo e compacta, que, utilizada em conjunto com um mouse e teclado, poderá realizar tarefas da mesma forma que um computador convencional. Graças à sua habilidade de interação com o mundo externo, a plataforma Raspberry Pi vem sendo usada para a prototipação de diversos projetos, como sensores de

estações climáticas e alimentadores para pássaros (RASPBerry, 2020).

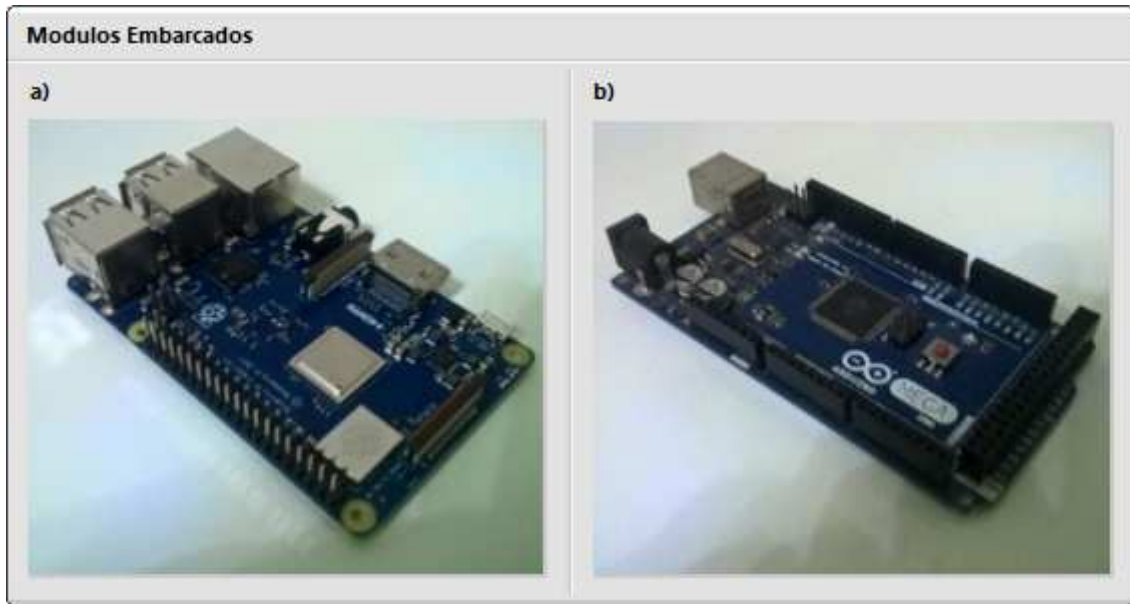


Figura 8 – Exemplos de diferentes Plataformas Embarcadas da atualidade; a) Placa Raspberry Pi (Modelo 3B+), b)Placa Arduino (Modelo Mega 2560).

Fonte: Autoria Própria

Um módulo embarcado é dotado de características específicas de acordo com o seu objetivo de aplicação, no caso da plataforma Arduino e Raspberry (Tabela 1), diferem-se principalmente no número de conexões lógicas disponíveis e poder de processamento, cabendo ao desenvolvedor a escolha de acordo com a demanda.

Tabela 1 – Comparativo de especificações entre a plataforma Arduino e Raspberry Pi

Módulo	Variante	Memoria RAM	Processador	Conexões USB	Portas Lógicas	Portas Digitais
Arduino	Nano 2	8 Kb	ATmega168 8 Mhz	1	6	14
	Uno	2 Kb	ATMEGA328 20 Mhz	1	6	14
	Mega 2560	2 Kb	ATmega2560 16 Mhz	1	54	15
Raspberry Pi	3 B+	1 GB	Cortex-A53 Quad 1.4 Ghz	4	0	27
	4 B	1 - 4 GB	Cortex-A72 Quad 1.5 Ghz	4	0	27

Fonte: Autoria Própria

3.3.2 Aplicação da IoT na Agricultura

Nos dias atuais, existe uma demanda crescente e promissora na aplicação de tecnologias IoT em diferentes indústrias (LI et al., 2012). Devido a esta demanda de utilização da IoT, algumas áreas da agricultura, como a chamada Agricultura Inteligente (do Inglês *Smart Agriculture*), se beneficiaram de forma positiva mais amplamente.

A Agricultura Inteligente se utiliza do monitoramento de variáveis ambientais, através de sensores, de forma que seja possível a automatização de tarefas e haja uma otimização na produção. Entretanto apenas o monitoramento e automatização não se mostra eficiente para o incremento da produção, de forma que existe a necessidade de implantação de um sistema integrado responsável por gerenciar os fatores que afetam a produção, desta forma, a utilização de tecnologias IoT, se mostra essencial (SUMA et al., 2017).

A utilização de métodos de comunicação sem fio se mostra essencial para o sucesso da aplicação de IoT no meio agrícola, devido à sua escalabilidade. Entretanto outros fatores se destacam, como a criação de um sistema (Figura 9) dotado de uma *Dashboard* que permita o gerenciamento do sistema como um todo, além de garantir ao produtor condições para uma

análise de produtividade (MUANGPRATHUB et al., 2019).

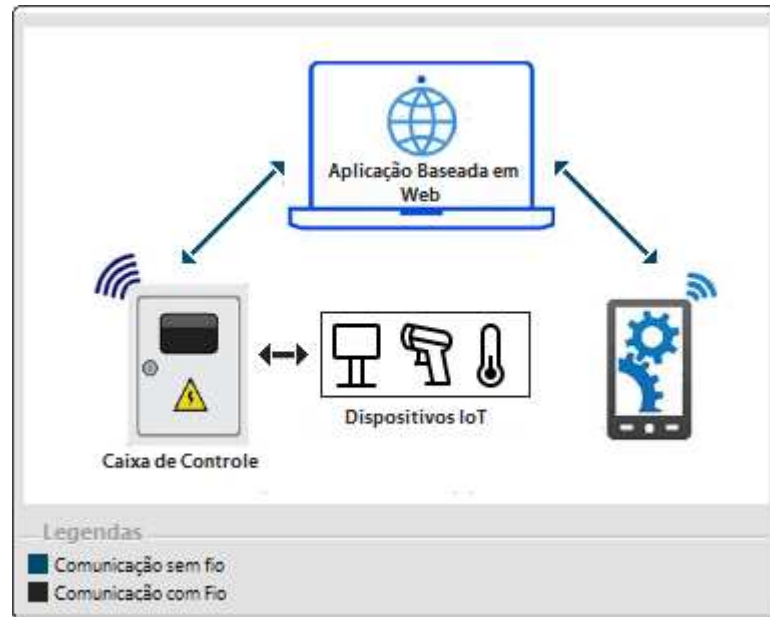


Figura 9 – Diagrama representativo de um sistema agrícola IoT controlado remotamente via Dashboard.

Fonte: Adaptado de (MUANGPRATHUB et al., 2019)

No trabalho realizado por Patil e Jadhav (2019), envolvendo a criação de um sistema de monitoramento baseado em IoT, que envolve leitura de dados ambientais e o envio dos mesmos para a nuvem de forma que o usuário execute uma ação, fica evidente a capacidade do agricultor em otimizar o cultivo de acordo com as necessidades da cultura. Para a construção do mesmo não houve a necessidade de utilização de equipamentos sofisticados, bastando um módulo de comunicação sem fio em conjunto com sensores responsáveis pela leitura dos dados capturados, demonstrando que a aplicação destes sistemas se encontra acessível nos dias atuais.

Além da melhoria na produção, tanto em quantidade e/ou qualidade, a aplicação de IoT na agricultura já apresenta resultados positivos em outras vertentes como o gerenciamento de irrigação como pode ser observado trabalho proposto por Nawandar e Satpute (2019), que teve como foco a construção de um sensor de irrigação inteligente do solo, baseada em dados ambientais (Figura 10), onde uso de IoT foi feito através do método de comunicação MQTT (do Inglês *Message Queuing Telemetry Transport*).

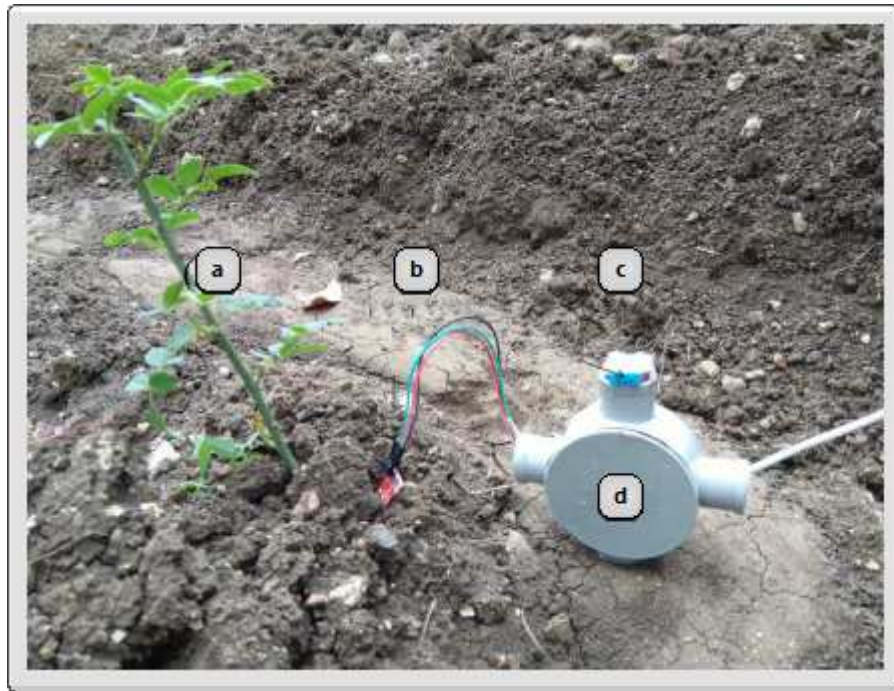


Figura 10 – Protótipo de Sensor de Irrigação Inteligente (IoT), baseado na leitura da Umidade do Solo: a) Planta; b) Sensor de Umidade de Solo; c) Sensor de Temperatura/Umidade do Ar; d) Controlador.

Fonte: Adaptado de (NAWANDAR; SATPUTE, 2019)

3.4 FAZENDAS VERTICAIS

Sendo também conhecidas como Fábricas de Plantas em alguns lugares do mundo, as Fazendas Verticais se apresentam como um novo conceito de agricultura em ambiente controlado, propício para o cultivo de diversos vegetais através do uso de tecnologia (DESPOMMIER, 2014). A abordagem de aplicação de tecnologia para controle ambiental utilizada na concepção das Fazendas Verticais, por sua vez, enquadrando as mesmas no escopo da Agricultura Inteligente.

Complementando Despommier (2014), de acordo com Birkby (2016), as Fazendas Verticais têm como objetivo o crescimento de culturas em um ambiente *indoor* dotado de iluminação, temperatura e nutrientes ideais. Com o objetivo de otimizar o espaço de plantio, as culturas são empilhadas em uma estrutura vertical. Com o crescimento das áreas urbanas, existe uma tendência para a perda de áreas agrícolas de cultivo (LOTZE-CAMPEN et al., 2008). A utilização de modelos verticais no ambiente urbano, como arranha-céus, mostra-se

uma alternativa viável (KALANTARI et al., 2017).

Em um primeiro momento, a aplicação de modelos verticais de plantio remete à Holanda durante a década de 50, sendo utilizados para a produção de cogumelos brancos. Para este fim, os cogumelos eram cultivados em edifícios climatizados, que se utilizavam de um composto especial em conjunto com uma camada de cobertura de turfa (BESTEN, 2019). Entretanto, a viabilidade de utilização de modelos verticais em larga escala comercial só foi possível a partir da década de 90, graças aos avanços tecnológicos referentes aos modelos hidropônicos e em menor número aeropônicos (DESPOMMIER, 2014).

Nas Fazendas Verticais existentes, a produção de hortaliças folhosas através do uso de iluminação LED se destaca por seu baixo porte, garantindo uma otimização de produção por espaço plantado e capacidade de direcionamento de determinadas faixas do espectro de luz para a otimização de pigmentação e crescimento foliar (DESPOMMIER, 2014; KOERT, 2018; MICKENS et al., 2018).

Dentre as hortaliças folhosas existentes, a Alface destaca-se como a mais importante no mundo, consumida principalmente *in natura* na forma de saladas, sendo a variante crespa a mais consumida no Brasil (SALA; COSTA, 2012). A alface é uma planta herbácea com caule diminuto, a cultura de alface possui duas variações (lisa e crespa), estas que por sua vez podem apresentar diversos tons de folhagem (verde ou roxa) (FILGUEIRA, 2003).

Podendo ser afligida por cerca de 75 tipos diferentes de pragas sendo este um problema recorrente no seu cultivo, desta forma havendo a necessidade do uso de pesticidas, que como consequência implica na presença de vestígios resultantes ao consumidor (FILGUEIRA, 2003). Com o advento do uso de cultivo *indoor* em Fazendas Verticais, a produção de produtos orgânicos, isto é, com redução substancial no uso de pesticidas, se mostra uma alternativa viável, devido a produção em ambiente isolado (DESPOMMIER, 2011).

O cultivo de cabeças de alface *indoor* com uso de LEDs, como nos modelos verticais, vem apresentando resultados superiores ao plantio tradicional. Variantes como a alface de carvalho roxa, quando cultivada no modelo *indoor*, apresentam coloração verde devido à ausência de radiação UV, entretanto se desenvolvem mais rapidamente com crescimento comparável ou, às vezes, superior a versão verde (PHILIPS, 2020). Além da sua importância comercial, tamanho compacto e o sucesso na aplicabilidade em Fazendas Verticais existentes, quando utilizadas através do transplante de mudas, o alface possui um sistema radicular ramificado e superficial (2,5cm do solo aproximadamente) (FILGUEIRA, 2003).

3.4.1 Ecofisiologia da Alface

A alface (Figura 11) é uma planta folhosa cujo ciclo fisiológico, que é influenciado diretamente pelos fatores climáticos do ambiente de produção, é dividido em duas fases (vegetativa e reprodutiva) (TIBIRIÇA et al., 2004).

”Na fase vegetativa, a planta desenvolve caule curto (10 a 15cm de comprimento), ao redor do qual nascem as folhas, formando-se uma roseta; essa fase encerra-se quando a cabeça está completamente desenvolvida. Na sequência, inicia-se a fase reprodutiva, na qual o caule sofre alongamento e se ramifica: cada ramificação forma uma inflorescência (TIBIRIÇA et al., 2004).”

Independente da variação de alface utilizada, sua produção é favorecida com a temperatura do ambiente variando entre 15°C e 25°C, na qual o plantio em altas temperaturas antecipa o florescimento da cultura, estimulando a produção de látex e, como consequência, surge um sabor amargo em suas folhas (EMBRAPA, 2020).



Figura 11 – Mudas de Transporte de Alface Crespa (*Lactuca sativa* var. *crispa*).

Fonte: Autoria Própria

Apresentando resistência a baixas temperaturas, sendo uma cultura de inverno, a alface pode suportar temperaturas mínimas de 6°C até máximas de 30°C (CERMENO, 1977). O crescimento das raízes, conseqüentemente a sua capacidade de absorção de água e nutrientes do solo é influenciada diretamente pela temperatura no meio radicular, no caso da alface,

o crescimento radicular apresenta melhores resultados com temperaturas superiores a 9°C (CORNILLON, 1980).

De acordo com Cermeno (1990), os valores referentes a umidade relativa do ar têm influência na qualidade da alface cultivada, onde ambientes com alta umidade favorecem o aparecimento de doenças. Desta forma, a produção deve ser realizada em ambientes com umidade relativa variando entre 60 a 80%, entretanto determinadas fases do ciclo da alface são beneficiadas com umidade inferior a 60%.

Para Sganzela (1977), os valores de temperatura e umidade ideais para o crescimento da alface, estão diretamente relacionados as etapas presentes no seu ciclo de crescimento: germinação de 15°C a 20°C e no desenvolvimento dependendo do período (dia/noite), 14°C a 18°C e 5 a 20°C respectivamente. Sendo estes valores de temperatura eficazes considerando a umidade relativa do ar variando entre o intervalo de 60% a 70%.

Além da temperatura e umidade do ar, a qualidade da alface é afetada diretamente pela quantidade de energia luminosa disponível durante o ciclo de desenvolvimento. O excesso de iluminação implica na aceleração deste ciclo e, como consequência, no sabor, visual (coloração e espessura) e diâmetro da cultura produzida (TIBIRIÇA et al., 2004).

3.4.2 Viabilidade Logística e Econômica das Fazendas Verticais

A aplicação do modelo vertical no meio urbano contribui para a questão ambiental, considerando o menor uso dos combustíveis fósseis que seriam utilizados na cadeia de suprimentos da indústria de alimentos (Figura 12). Esta economia é possível devido à proximidade entre a unidade produtora e o consumidor. Economicamente a aplicação do modelo vertical traz outros benefícios, como menor custo com maquinário, fertilizantes e mão de obra (ZHANG et al., 2018).

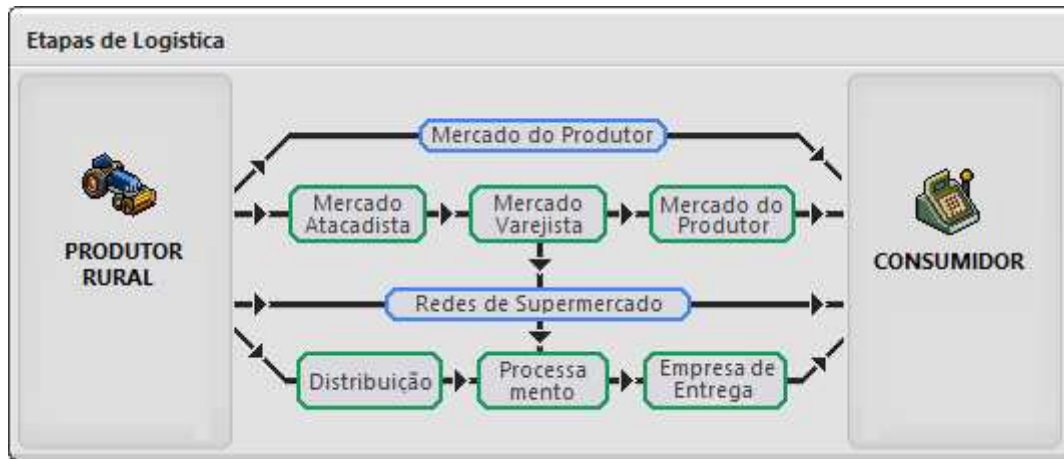


Figura 12 – Logística da Cadeia Produtiva Agrícola Tradicional.

Fonte: Adaptado de (ZHANG et al., 2018)

3.4.3 Acesso a Iluminação para Produção

De acordo com Despommier (2013), o acesso à iluminação de qualidade com baixo custo energético através do uso de iluminação LED foi um fator determinante para a viabilidade comercial da aplicação de Fazendas Verticais em escala comercial, comparado a outros métodos de iluminação artificial tradicionais. A utilização de comprimentos de onda específicos, com o uso de LEDs, possibilita ao produtor a obtenção de respostas fotomorfogênicas, bioquímicas ou fisiológicas da cultura produzida (GOMEZ; IZZO, 2018).

De acordo com Nelson e Bugbee (2014), o uso de sistemas de iluminação LED, garante a emissão de fótons com precisão, levando-se em consideração a distância do emissor. Em unidades de produção amplas, garante-se um custo benefício maior (Figura 13), todavia, à medida que a distância entre a fonte de iluminação e a cultura aumenta, a intensidade de luminosidade presente no nível de produção diminui (POORTER et al., 2012).

Devido ao crescimento da indústria de Fazendas Verticais, o surgimento de novas empresas com foco no segmento no uso iluminação LED para plantio é uma realidade. Apostando na expansão desse mercado, gigantes como Philips, Toshiba e Panasonic, vêm se posicionando como líderes não apenas na fabricação de equipamentos de iluminação de plantio, mas também como empresas de conhecimento no ramo de produção de plantas (HIGGINS, 2016).

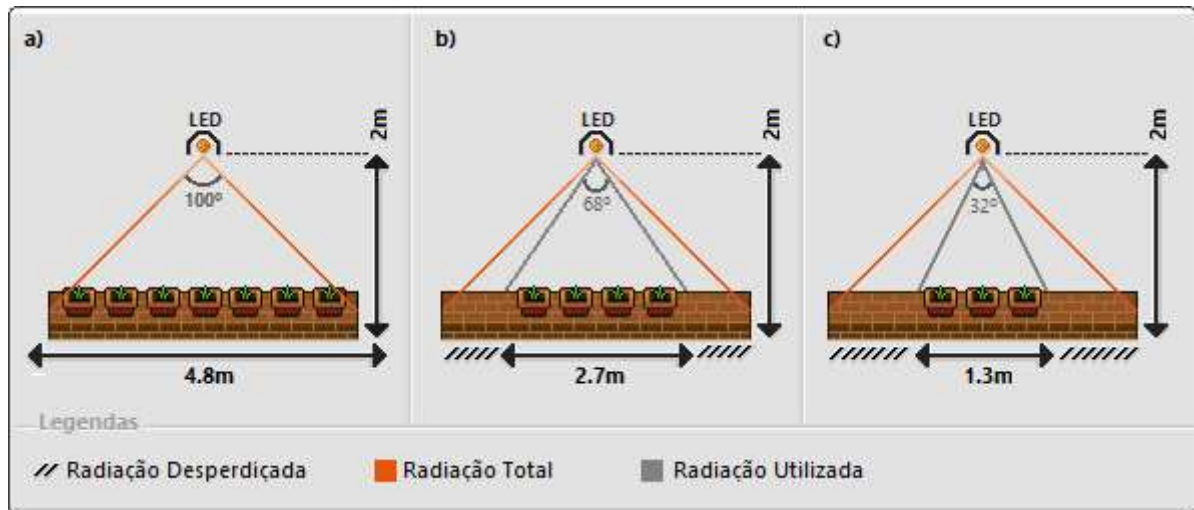


Figura 13 – Capacidade de Direcionamento dos fótons emitidos por lâmpadas LEDS sobre uma superfície de produção: a) Melhor utilização de iluminação sobre superfície de 4.7m; b) Subutilização de 2.1m de superfície para produção; c) Subutilização de 3.5m de superfície para produção.

Fonte: Adaptado de (NELSON; BUGBEE, 2014)

O Uso de iluminação LED para plantio *indoor* em larga escala, objetivo das Fazendas Verticais, apresenta desafios, independente da cultura utilizada, considerando suas diferentes características e necessidades. De acordo com AGC Lighthing (2020), para se alcançar um produto de qualidade com o uso de iluminação LED, devem ser considerados três fatores:

- **Tempo de Iluminação:** O controle do tempo de iluminação se mostra necessário, sugere-se o uso de um intervalo de descanso entre 12 e 16 horas;
- **Qualidade no Espectro de Iluminação:** O uso de iluminação de qualidade de acordo com a necessidade da cultura pode trazer um diferencial, atendendo a demanda de iluminação com base no seu ciclo de crescimento como a suplementação no uso do espectro de luz vermelho durante o período de floração;
- **Intensidade de Iluminação:** O controle de intensidade durante os ciclos de crescimento da cultura apresenta um efeito importante no resultado final. O fornecimento de iluminação deve ser ajustado de acordo com o crescimento da cultura e sua necessidade. Se a intensidade utilizada for insuficiente, a fotossíntese e a respiração da cultura não poderão atingir o mesmo grau, em contrapartida, em caso de intensidade superior ao ponto de saturação da luz na curva de fotossíntese (Figura 14 II), ocorrerá o desperdício elétrico. Desta forma, o ideal seria manter a intensidade da luz igual ao ponto de saturação da luz.

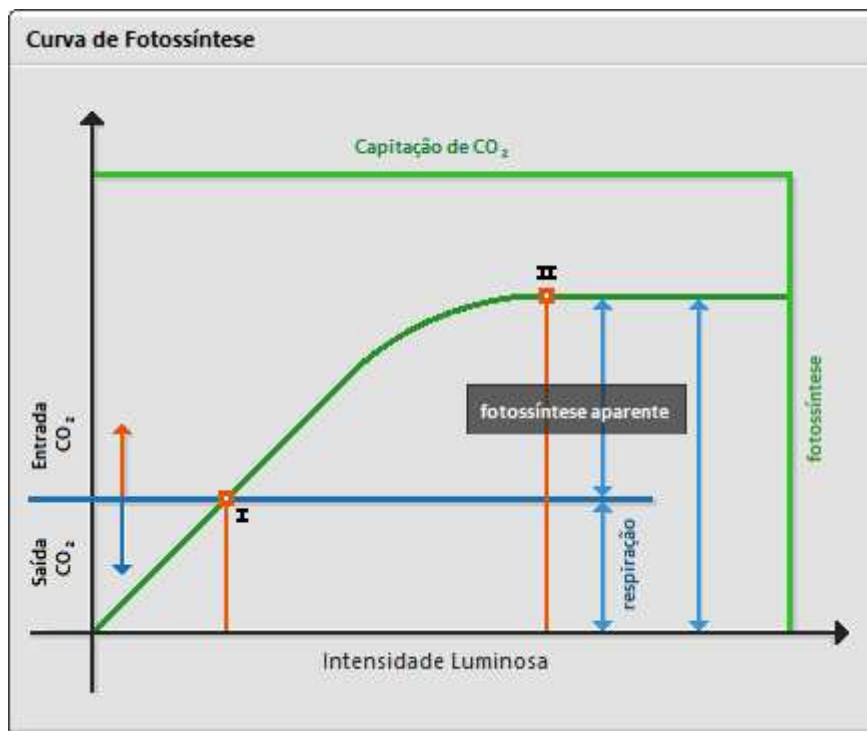


Figura 14 – Gráfico referente a curva de fotossíntese: I - Ponto de compensação Luminosa; II - Ponto de saturação luminosa.

Fonte: Adaptado de (AGC Lighting, 2020)

3.4.4 Uso de Água

De acordo com (PEREZ, 2014), na Europa é feito o uso de aproximadamente 3.000 litros de água por dia para cada pessoa, apenas para a produção de alimentos. Se considerado o ambiente controlado utilizado para a produção de alimentos no modelo vertical a economia de água se mostra uma realidade, como apresentado por Koert (2018), que apresentou um uso cerca de 90% menor em relação a modelos tradicionais.

Além da economia de água para a produção de alimentos, a aplicação de modelos verticais pode garantir outros benefícios como a capacidade de reciclagem dos suprimentos de água no meio urbano, utilizando-se de águas residuais impróprias para o consumo, tendo como resultado a sua purificação através da evapotranspiração (DESPOMMIER, 2010).

3.4.5 Técnicas de Irrigação aplicadas as Fazendas Verticais

Com o aumento da demanda por alimentos, houve a necessidade de aperfeiçoamento de técnicas de irrigação, para um aproveitamento mais sustentável dos recursos disponíveis, se destacando o uso da Hidroponia, Aquaponia e Aeroponia (SHROUF, 2017). Estas técnicas, amplamente aplicadas em sítios de produção vertical, tem alcançado resultados satisfatórios no que tange à qualidade da cultura e ao baixo consumo de água.

A Hidroponia, ou cultivo hidropônico, é um método de cultivo que envolve a aplicação de uma solução nutritiva aquosa diretamente nas raízes da cultura de forma intermitente, onde durante a sua aplicação o monitoramento do crescimento se mostra uma necessidade (ALVES, 2006). Como apontado por Carrasco et al. (1999), inicialmente o alto custo de implementação do método hidropônico para a produção de culturas em escala comercial se mostrou um empecilho, sendo este relacionado a custos variáveis como o consumo energético do sistema e ao uso da solução nutritiva.

Os modelos hidropônicos podem ser classificados em dois grupos: 1) Cultivo sem substrato, que inclui técnicas como NFT e sistemas de flutuação; 2) Hidroponia de base média, na qual se utiliza um certo volume de substratos, que garante o suporte para plantio da cultura e, por sua vez, a fixação de micro-organismos e nutrientes da solução, que quando houver necessidade serão utilizados pela cultura .(MAUCIERI et al., 2018).

Na revisão bibliográfica realizada por Maucieri et al. (2018), no intervalo de 1993 a 2017, referente a estudos que envolveram a implementação de modelos hidropônicos, observou-se que na maioria dos estudos usava-se o método de base média (com uso de substratos para suporte) seguido pelo método de hidroponia por flutuação (Figura 15). Entre os experimentos analisados, prevalecia o plantio das seguintes culturas: alface (*Lactuca sativa*), espinafre d'água (*Ipomea aquatica*), e tomate (*Lycopersicum esculentum*).

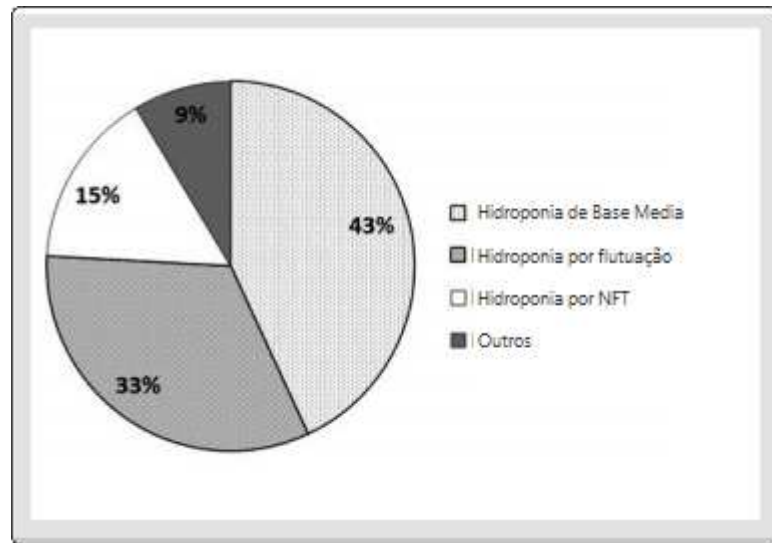


Figura 15 – Gráfico referente á aplicação de diferentes sistemas hidropônicos documentados em artigos científicos no intervalo de 1993 a 2017: (58 artigos)

Fonte: Adaptado de (MAUCIERI et al., 2018)

A hidroponia por base média é feita com a aplicação de substrato para suporte das raízes como: serragem, tijolos de argila, rochas de lava, fibra de coco (Figura 16). Este substrato deve ser capaz de armazenar os nutrientes presentes na solução utilizada, que por sua vez deve possuir pH neutro, deve ser livre de micro-organismos danosos, tanto para o ser humano e as plantas, desta forma prevenindo o apodrecimento radicular (Southern Nurserymen's Association, 2000).

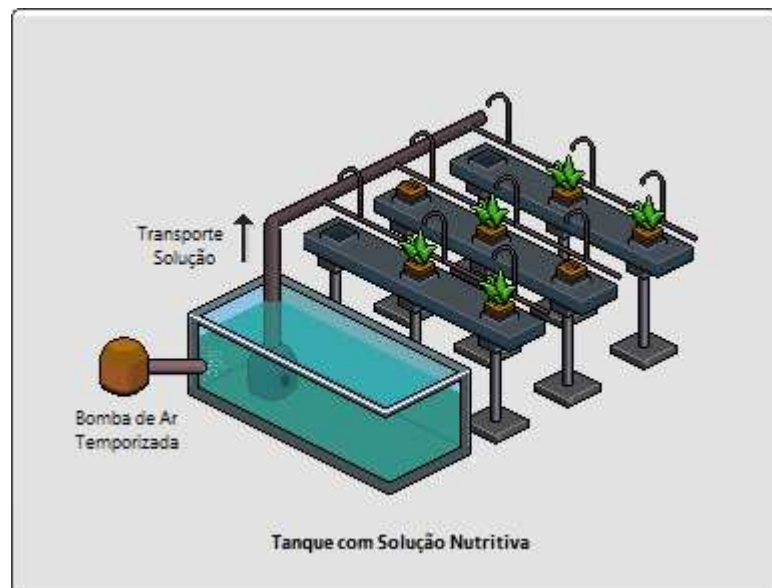


Figura 16 – Aplicação de um Modelo hidropônico com utilização de substrato (base-média).

Fonte: Autoria Própria

O método de hidroponia por flutuação (Figura 17), diferentemente da hidroponia por base média, não é feito do uso de substratos para sustentação da cultura (MAUCIERI et al., 2018). De acordo com Krisna et al. (2017), é importante a aeração da solução nutritiva utilizada, visto que a absorção de cálcio presente na solução pela cultura é diretamente relacionada a capacidade respiratória do seu órgão radicular.

Nos experimentos realizados por Ercan e Bayyurt (2014), observou-se que a aplicação de bomba de ar para oxigenação em conjunto com uma pedra porosa apresentava os melhores resultados, pois o oxigênio entregue se diluía melhor na solução. Neste mesmo estudo foram realizados testes referentes à aplicação de gerador de ozônio para oxigenação da solução, no qual verificou-se níveis razoáveis de desinfecção da solução nutritiva. Diante de exposto, recomendando-se a combinação entre as duas tecnologias.

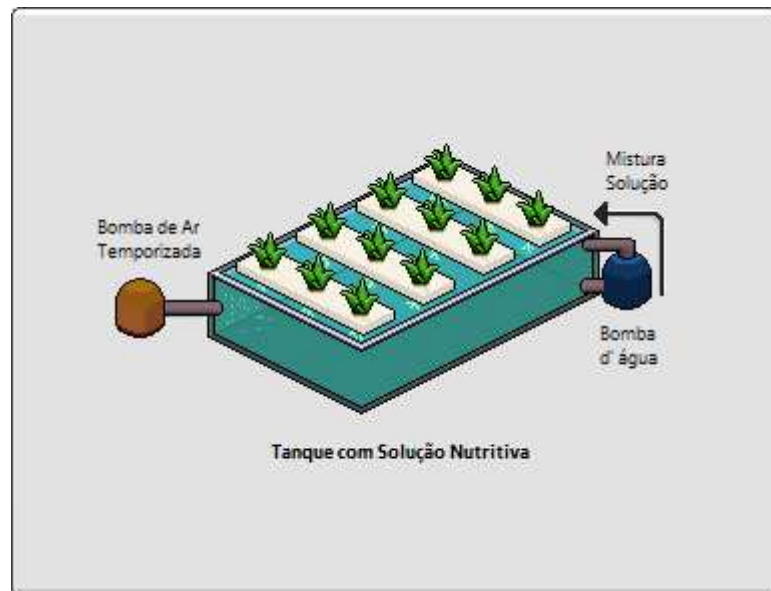


Figura 17 – Aplicação de um Modelo hidropônico por flutuação.

Fonte: Autoria Própria

Outra forma de aplicação do modelo hidropônico sem substrato é através do uso da técnica conhecida como Fluxo Laminar de Nutrientes (do Inglês *Nutrient film technique*) ou NFT (ALVES et al., 2011). Proposta por Alan Cooper, a técnica NFT tem como objetivo o desenvolvimento do sistema radicular da cultura, sendo este submerso parcialmente sobre um fluxo de água e nutrientes reciclados (Figura 18), respeitando-se uma determinada proporção de forma que também seja possível a absorção de oxigênio (STAFF, 1998).

Segundo Texeira (1996), atualmente os modelos hidropônicos por NFT não utilizam de substratos para a sustentação das culturas, como alternativa, faz-se uso de uma placa perfurada, que além da sustentação garante a proteção do sistema radicular da cultura contra a incidência

de iluminação solar e, como consequência, contra o aquecimento do mesmo.

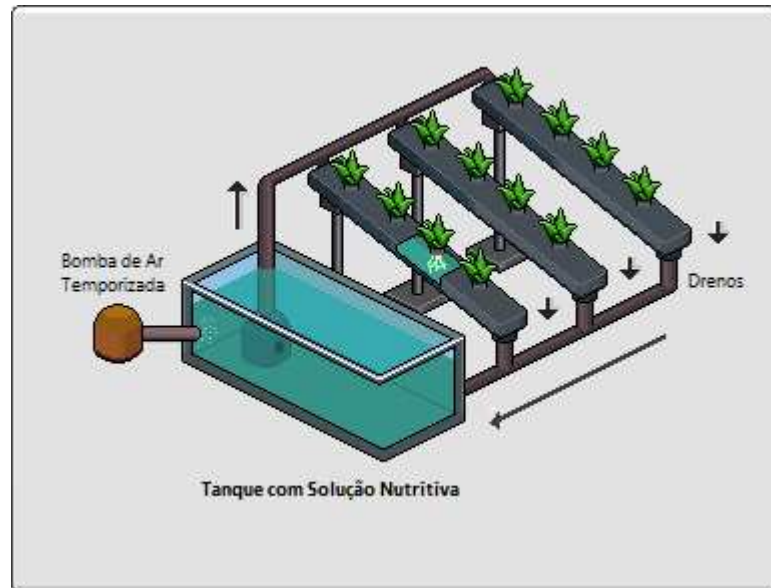


Figura 18 – Aplicação de um Modelo hidropônico com o uso da técnica NFT.

Fonte: Autoria Própria

De acordo com Santos (2009), a Hidroponia apresenta-se como uma alternativa aos métodos de cultivo tradicionais, visando uma melhor qualidade, sabor, aparência das culturas produzidas e uma menor ocorrência de pragas, ao mesmo tempo que oferece uma otimização dos recursos utilizados na produção. Como consequência do aumento da qualidade proporcionada pelo uso de hidroponia em relação aos métodos tradicionais de plantio, vem sendo observado um aumento na demanda destes alimentos por parte dos consumidores (SEIBERT et al., 2014).

A Aquaponia é uma técnica de cultivo sem solo, sendo uma variação da hidroponia, onde a solução nutritiva utilizada é obtida a partir dos resíduos provenientes de um tanque de criação de peixes (Figura 19) (BOONRAWD et al., 2020). Assim como a hidroponia a aquaponia consiste em um sistema de reutilização de água garantindo uma baixa perda de água para o ambiente, que ocorre através da evapotranspiração da cultura e evaporação da água no tanque de peixes, quando comparado a métodos de cultivo tradicionais e produção de pescados em tanques escavados (DIVER, 2006).

A solução nutritiva utilizada em sistemas aquapônicos é resultado da conversão de resíduos metabólicos dos peixes presentes, em especial a amônia que em excesso é bastante prejudicial à saúde dos mesmos, de forma que, a absorção dos nutrientes pela cultura garante a filtragem das impurezas. Esta conversão é possível pois o acúmulo de amônia no tanque atrai bactérias conhecidas como nitrosômonas que, por sua vez, produzem nitritos, que

atraem outra bactéria conhecida como nitrospira, que são responsáveis pela conversão dos Nitritos em Nitratos que, por sua vez, são nutrientes ideais para o desenvolvimento da cultura (BOONRAWD et al., 2020).

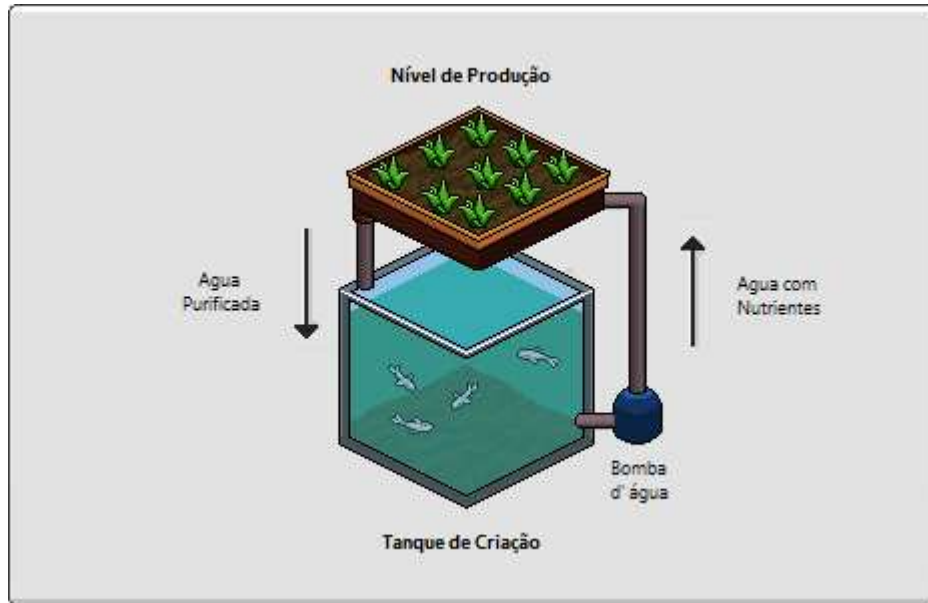


Figura 19 – Representação de um Modelo Aquapônico Cíclico.

Fonte: Autoria Própria

A Reutilização de água em forma cíclica pelos sistemas aquapônicos se mostra ecologicamente correta, comparada aos métodos de plantio tradicional, no qual ocorre o descarte de resíduos no meio ambiente, outra vantagem é a capacidade de criação de peixes sem o risco de introdução de espécies invasoras e patógenos no meio ambiente (BARBOSA, 2011).

A Aeroponia, é um método de irrigação derivado da Hidroponia, que se utiliza do conceito de plantio sem solo, onde é feita a utilização de uma solução nutritiva que é aplicada diretamente a raiz da cultura utilizada, onde, após a aplicação, o resíduo resultante é novamente armazenado em um compartimento, possibilitando um uso 95% menor, se comparado a métodos tradicionais de plantio (JACOBS; BEAN, 1963).

Diferentemente da Hidroponia e Aquaponia, nos sistemas aeropônicos a solução nutritiva é aplicada nas raízes da culturas através do método de pulverização com alta pressão (Figura 20), garantindo um maior acesso a oxigênio pelas raízes da cultura, estimulando o crescimento e atuando na inibição de patógenos (BLACKMORE, 1994).

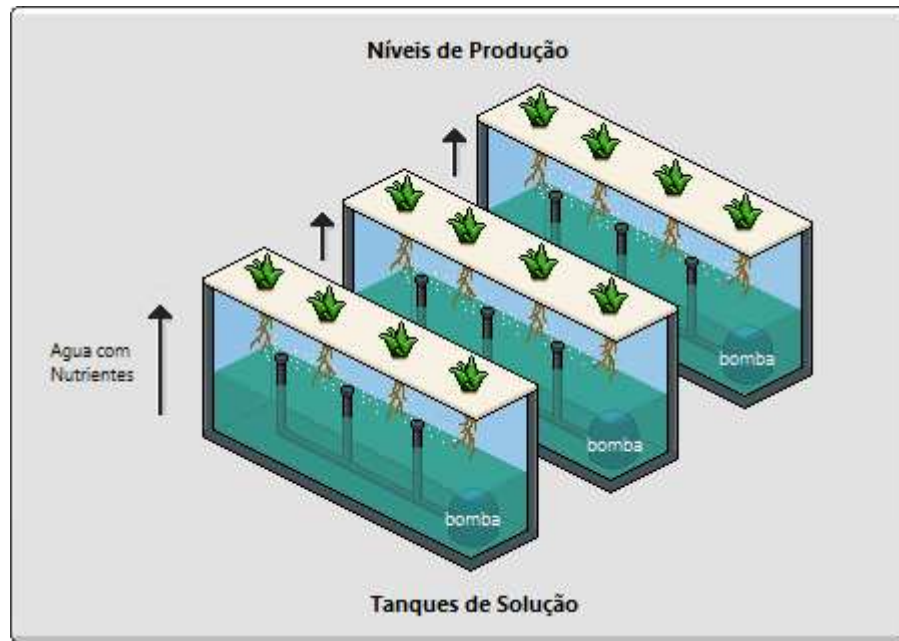


Figura 20 – Representação de um Modelo Aerônico onde a solução nutritiva é bombeada diretamente as raízes da cultura com alta pressão.

Fonte: Autoria Própria

Estudos como o realizado por Spinoff (2006) chegaram à conclusão de que a adoção de sistemas aerônicos para a produção agrícola proporciona uma redução na utilização de água em até 98%, bem como a redução no uso de fertilizantes em taxas de 60%, possibilitando um plantio sem uso de agrotóxicos.

3.4.6 Modos de Construção

De acordo com (BEACHAM et al., 2019), as fazendas de Agricultura Vertical podem ser classificadas em duas categorias, com base no seu modo de construção, sendo estas Pilhas Horizontais e Superfície de Crescimento Horizontal, onde as mesmas categorias apresentam diversas variações (Figura 21):

- **Pilhas Horizontais:** O uso de pilhas horizontais (Figura 21 (a, b)) tem como objetivo o cultivo em grande escala, já sendo aplicado em nível comercial com sucesso SPREAD (2007), sendo esta forma de construção aplicada com base no uso de diversas plataformas de crescimento horizontal, se utilizando de blocos de substrato para a fixação das raízes em conjunto com um sistema hidropônico por gotejamento;

- **Torres Multiníveis:** Sendo uma variação das Pilhas Horizontais, o sistema de Torres Multiníveis (Figura 21 (c)) envolve a construção de torres com diversos andares, porém, diferentemente do modelo de pilhas horizontais, os níveis existentes são isolados, permitindo a aplicação de uma maior variedade de culturas, considerando que a capacidade de aplicação de diferentes condições ambientes para os respectivos níveis;
- **Varandas:** Se apresenta como uma alternativa ao crescimento *indoor* com uso de Torres Multiníveis. O uso de Varandas (Figura 21 (d)) é aplicado na produção individual ou comunitária de empresas comerciais, também podendo ser utilizado para a produção de ervas para o consumo próprio;
- **Paredes Verdes:** Sendo Plataformas Verticais, as Paredes Verdes, ou Jardim Verticais, (Figura 21 (e)) são categorizadas como construções de superfície de crescimento Horizontal, situados geralmente em fachadas de edifícios. Traz vantagens estéticas, além de proporcionarem a redução do efeito de Ilhas de Calor em grandes centros urbanos, trazendo como consequência uma melhoria na qualidade do ar, já sendo aplicadas em metrópoles brasileiras como São Paulo (MANSANI et al., 2018);
- **Unidades de Crescimento Cilíndrico:** Uma categoria de crescimento em superfície, no sistema de crescimento cilíndrico (Figura 21 (f)), onde as culturas estão localizadas ao redor da superfície cilíndrica com seu devido suprimento de nutrientes.

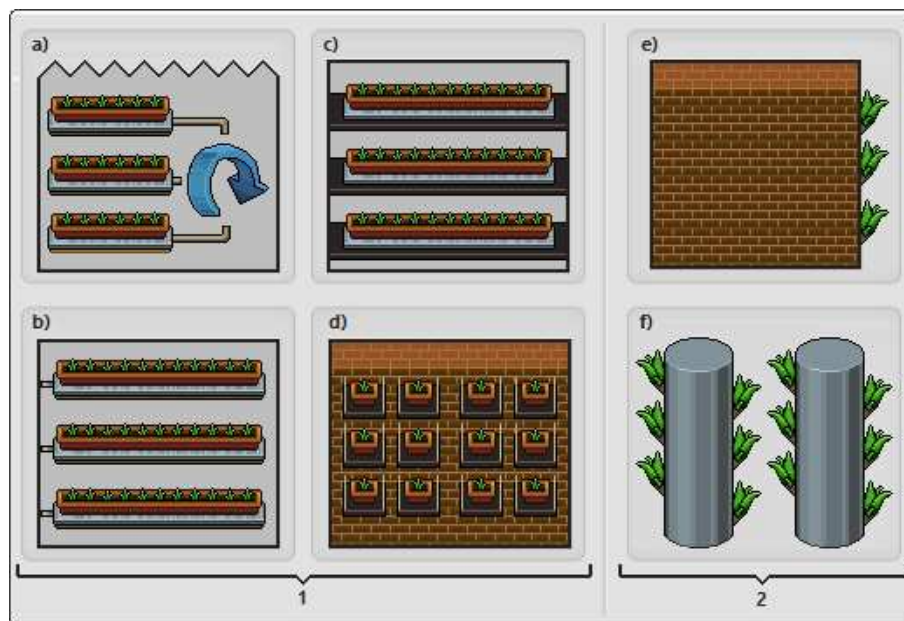


Figura 21 – Representação dos Modos de Construção de um Modelo de Plantio Vertical sendo 1) Pilhas Horizontais, 2) Superfície de Crescimento Horizontal; a) Pilha Horizontal com suporte a Rotação de Níveis, b) Pilha Horizontal tradicional, c) Torres Multiníveis Isoladas, d) Pilha Horizontal com Varandas, e) Paredes Verdes, f) Plataformas Verticais de Crescimento Cilíndrico.

Fonte: Adaptado de (BEACHAM et al., 2019)

3.4.7 Fazendas Verticais na Atualidade

A aplicação de modelos de plantio vertical para a produção de alimentos, atualmente, já é uma realidade. Empresas como a Aerofarms, localizada nos Estados Unidos, já fazem o uso dessa tecnologia para a produção de alimentos (Figura 22), através do uso de plantio sem solo, iluminação inteligente com uso de LEDs e utilização do método de irrigação aeropônico, garantindo uma economia de 95% de água, possibilitando a produção de alimentos em escala comercial e aperfeiçoamento constante através de coleta de dados referentes à produção (AEROFARMS, 2020).



Figura 22 – Torre de Produção Multinível Vertical utilizada pela Aerofarms para Plantio através do uso de LEDs e Aeroponia.

Fonte: Adaptado de (AEROFARMS, 2020)

No modelo de plantio vertical utilizado pela empresa Plantlabs, para a realização de fotossíntese através de iluminação artificial, são utilizadas lâmpadas LEDs (Figura 23). A combinação dos espectros de luz vermelha e azul apresentaram os melhores resultados (KOERT, 2018). Apesar de os resultados alcançados pela empresa serem bastante satisfatórios, esta acredita que ainda seja possível uma melhoria nos mesmos (KOERT, 2018).



Figura 23 – Instalação interna para crescimento *indoor* da PlantLabs com foco na utilização de LEDs como fonte de iluminação artificial em especial a combinação de espectro azul e vermelho.

Fonte: Koert (2018)

A capacidade de produção, que é possível graças à aplicação das Fazendas Verticais (Figura 24), pode ser demonstrada pelos números alcançados pela empresa SPREAD. Localizada no Japão, em meados de 2007 a SPREAD conseguiu alcançar a produção de 21.000 cabeças de alface por dia, sendo estas produzidas na sua unidade no centro de Tóquio (SPREAD, 2007).



Figura 24 – Instalações para *Vertical Farming* da empresa Spread no meio urbano com foco na produção de cabeças de alface.

Fonte: SPREAD (2007)

A empresa Baldia Farms, localizada na cidade de Dubai, atualmente utiliza um modelo de plantio vertical com objetivo de atender a demanda de uma região com dificuldade de acesso à água. Em um ambiente controlado, com a aplicação de iluminação artificial e um método de irrigação automatizado, alcançou-se uma economia de 90% em relação a modelos de plantio tradicionais de campo aberto (Baldia Farms, 2020).

Além de empresas que se utilizam da tecnologia de plantio vertical para a produção e comercialização de alimentos, surgiram empresas como a Freight Farms, com foco na venda de sistemas verticais para produção, através da fabricação e venda do Greenery (Figura 25), seguimento conhecido como Fazendas em Contêiner (do Inglês *Container Farms*), que consiste em um sistema de cultivo hidropônico sobre superfícies de crescimento horizontal com controle climático e uso de iluminação LED, adaptado/construído em contêineres intermodais (Freight Farms, 2020).



Figura 25 – The Greenery, primeiro modelo de Fazenda Vertical em Contêiner disponível no mercado.

Fonte: Freight Farms (2020)

Outras empresas atualmente estão envidando esforços na produção de tecnologias aplicadas ao modelo de plantio vertical. Com foco inicial em métodos de iluminação artificial. Assim como gigantes do mercado, a empresa Illumitex está direcionando esforços com o intuito de trazer uma transformação digital aos modelos de plantio vertical através do sistema FarmVisionAI, com a utilização de aprendizado de máquina, através do monitoramento por imagem com terabytes de informações armazenadas, disponibilizando ao produtor um painel de controle referente a sua produção com capacidade de mensurar o crescimento da produção de forma analítica (Illumitex, 2020).

Bastante aplicada ao redor do globo, como na América do Norte (Aerofarms), Europa (PlantLabs) e Ásia (Spread e Baldia Farms), as Fazendas Verticais no Brasil ainda são uma área pouco explorada. O primeiro empreendimento não apenas do Brasil mas da América Latina, a Pink Farms, empresa localizada no estado de São Paulo, que surgiu em meados de 2017, se utiliza do modelo de plantio vertical (Figura 26) para a produção e comercialização de hortaliças folhosas através do uso de iluminação artificial LED (Vermelho + Azul) e sistema de irrigação Hidropônico (Pink Farms, 2020).



Figura 26 – Níveis de Produção Vertical de hortaliças utilizados pela empresa brasileira Pink Farms com o uso de iluminação artificial LED para produção de folhosas.

Fonte: Pink Farms (2020)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MODELO DE PLANTIO VERTICAL PROTÓTIPO

Para a construção de um modelo de plantio vertical (Fazenda Vertical), foi feito o uso de sistemas embarcados acoplados a sensores de atuadores, estes que por sua vez, tem como objetivo a automação de tarefas e coletas de dados ambientais durante os experimentos de plantio realizados.

4.1.1 Projeto das Torres de Produção

Objetivando a experimentação com uso de LEDs para cultivo em ambiente controlado, inicialmente foi elaborado um projeto protótipo para construção de cada torre de produção presente na Fazenda Vertical protótipo (Figura 27). Desta forma optou-se pela construção de cada torre sobre a categoria de sistema de pilhas horizontal, mais especificamente o uso de torres multiníveis isoladas.

Devido a limitação de peso, cada torre de produção foi limitada a quatro níveis, sendo os três inferiores com dimensão 30x40cm, reservados a produção e o nível superior com dimensões de 30x30cm para a instalação de um gabinete de controle. Este gabinete por sua vez é dotado de uma caixa para instalação do hardware inerente a torre de produção e uma unidade de armazenamento para irrigação com capacidade máxima de 3 litros.

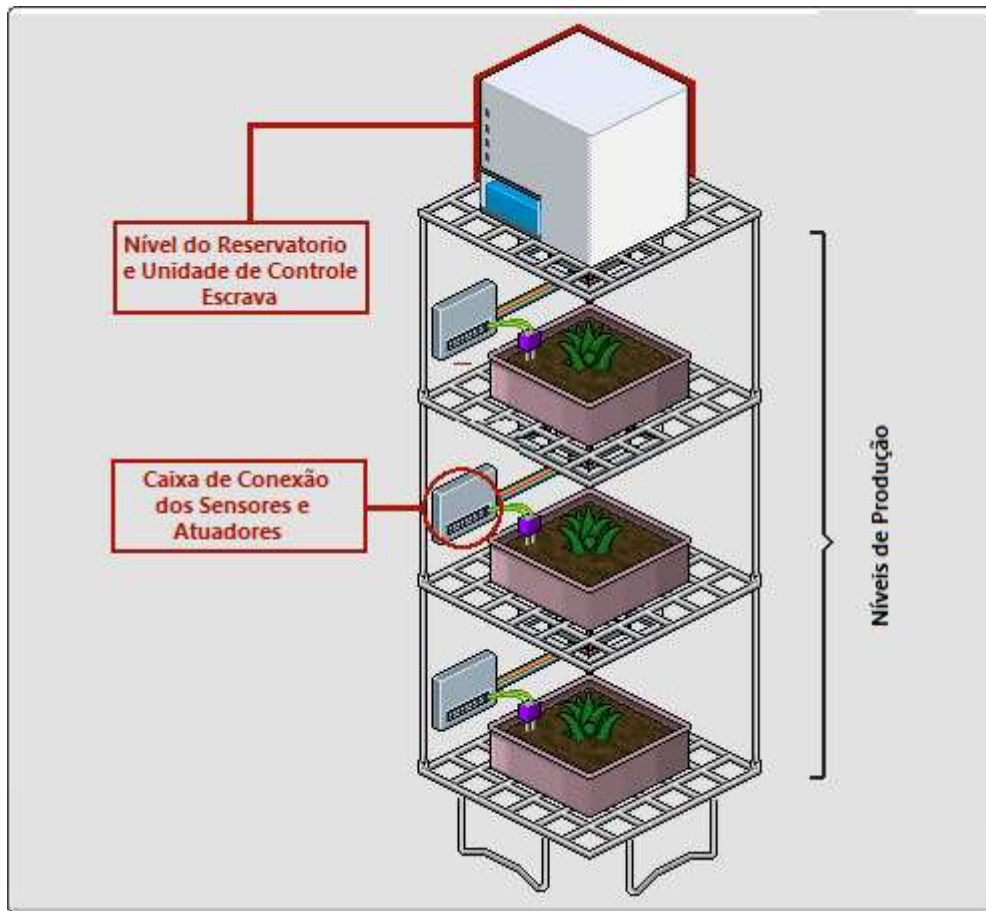


Figura 27 – Representação do projeto protótipo da Torre Multinível utilizados para a concepção do modelo vertical.

Fonte: Autoria Própria

4.1.2 Conexão entre equipamentos de Hardware utilizados

Para o controle do fluxo de dados e atuação das torres de produção do modelo de plantio vertical proposto, optou-se pela utilização da plataforma Arduino (Mega 2560) e Raspberry Pi (3B), combinadas através de uma topologia conhecida como mestre/escravo (Figura 28). Nesta topologia, foi feito o uso de vários módulos escravos conectados a um único módulo mestre através do uso de conexão serial.

Devido a sua maior capacidade de processamento, a plataforma Raspberry Pi foi utilizada como modulo mestre sendo responsável pela centralização dos dados coletados por

cada nível de produção da Fazenda Vertical protótipo, possibilitando o acesso externo das informações coletadas. Para o controle dos níveis de produção, optou-se pela utilização de diversas placas de Arduino, que neste caso atuam como módulos escravos, devido ao seu número relativamente superior de conexões de entrada/saída, sendo estas designadas ao gerenciamento dos dados de entradas dos sensores acoplados (coleta de dados) e atuação (iluminação e irrigação).

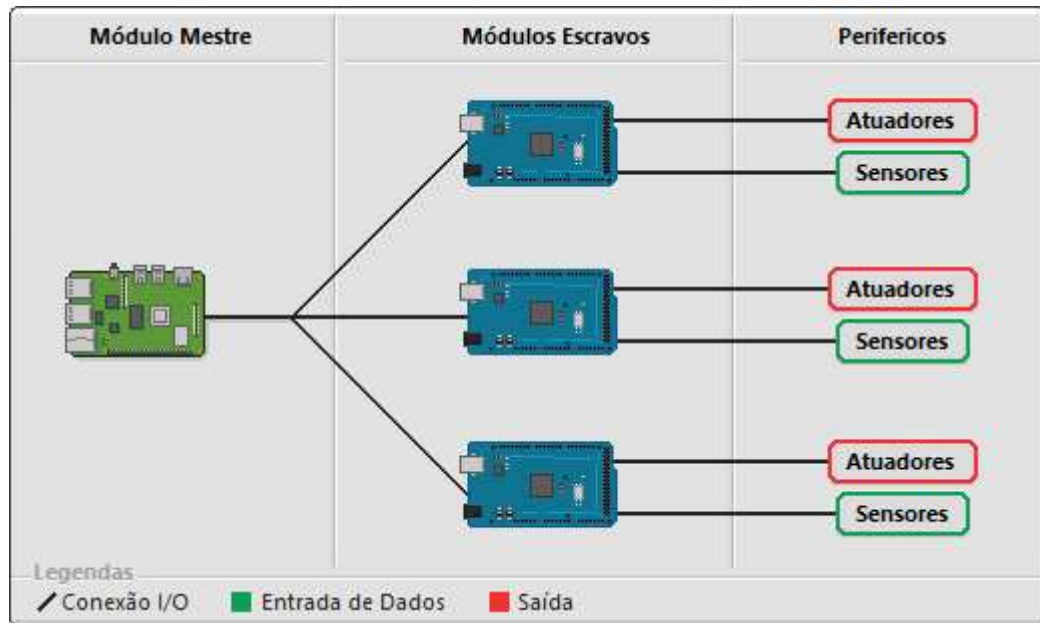


Figura 28 – Topologia Mestre/Escravo utilizada para Concepção do Modelo Vertical Protótipo

Fonte: Autoria Própria

Para acesso externo dos dados centralizados, foi modelada uma aplicação utilizando a linguagem Python¹, que, por possuir uma sintaxe mais simplificada, melhora a produtividade. A Linguagem Python, contudo, nativamente é incapaz de manipular uma conexão serial, para este objetivo foi utilizada uma biblioteca de terceiros conhecida como PySerial².

Para o acesso externo dos dados recebidos através do uso da biblioteca pySerial foi feita a construção de uma API de acesso externo. Entretanto, diferentemente de um sistema IoT tradicional, que se utiliza de APIs para a entrada e saída de dados, a API proposta terá como objetivo apenas a leitura de dados de saída (*read-only*), ou seja, para este trabalho não foi possível o controle externo dos atuadores do modelo vertical.

A API Web construída para este fim através do uso da biblioteca Flask³ é bastante rudimentar, possuindo três *endpoints*, retornando uma saída json, para acesso as informações

¹<https://www.python.org/>

²<https://pypi.org/project/pyserial/>

³<https://flask.palletsprojects.com/en/2.0.x/>

referentes aos níveis de produção:

- **Colunas:** Método Get para retornar uma saída referente a todas as torres e todos os níveis de produção que a compõem;
- **Colunas\{CÓDIGO}**: Método Get que retorna os dados referentes à uma coluna do modelo vertical específica, bastando informar o id na requisição;
- **Colunas\{CÓDIGO}\{NÍVEL}**: Método Get que retorna dado referente à um nível de produção específico, sendo apenas necessário passar o código id da coluna, seguido pelo id de nível, que varia de 1 até 3.

Para uma melhor organização dos sensores e atuadores presentes em cada nível de produção, foi feito o uso de caixas de conexão cega, (Figura 29) que posteriormente foram instaladas nos respectivos níveis, sendo estas responsáveis pela conexão, através do uso de um cabo IDC de 40 pinos, entre o nível de produção e o módulo escravo presente no gabinete de controle da torre.

Além das conexões de entrada/saída, as caixas de conexão cegas são dotadas de equipamentos reguladores de tensão com saída (3.3v e 5v) e capacitores eletrolíticos para sustentação de corrente do nível de produção, conforme pode ser observado na diagramação disposta (Figura 30).



Figura 29 – Caixa de Conexão Cega acoplada aos níveis de produção.

Fonte: Autoria Própria

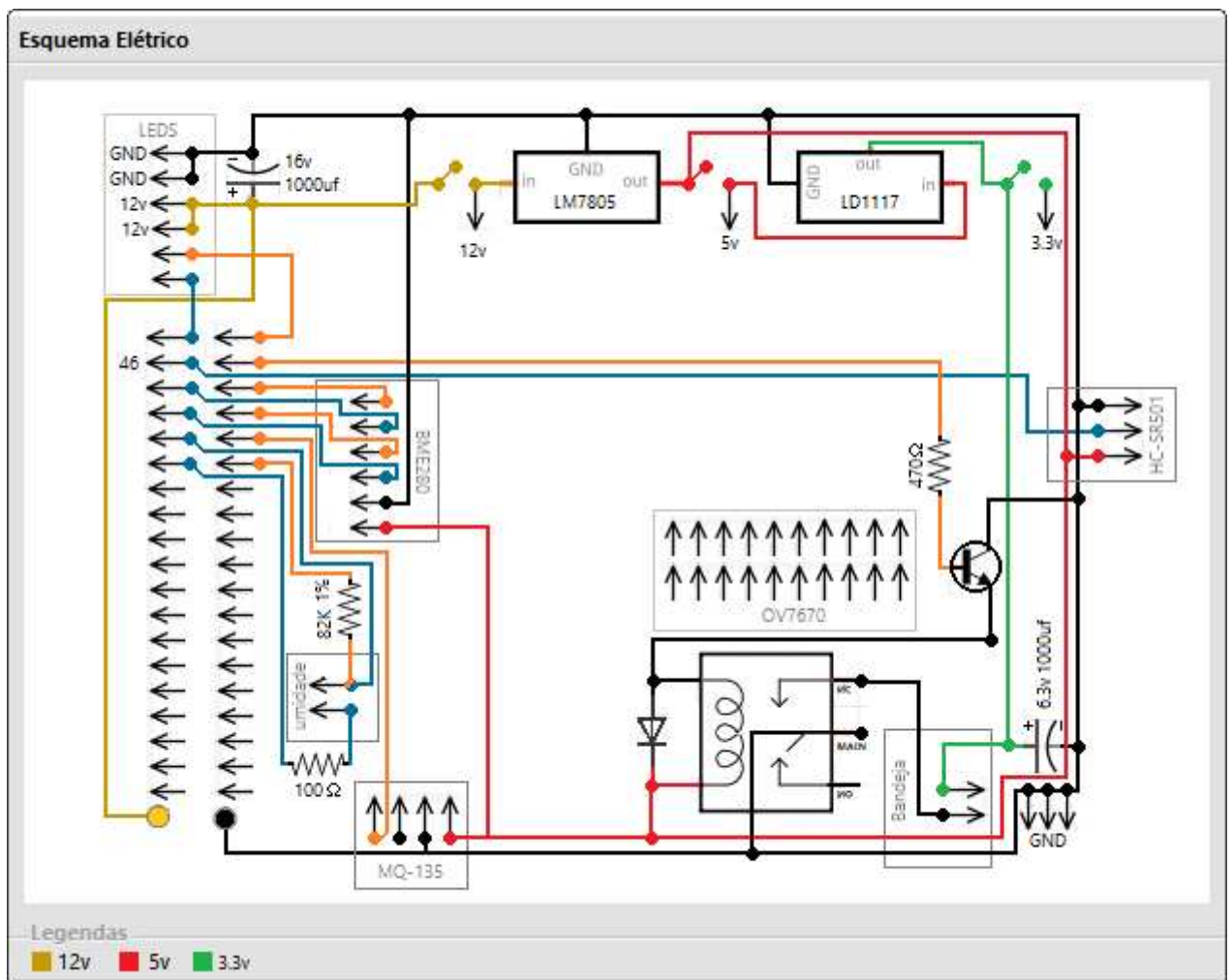


Figura 30 – Esquema elétrico referente às Caixas de Conexão Cega acopladas aos níveis de produção.

Fonte: Autoria Própria

Para facilitar a conexão entre as caixas de conexão cegas presentes nos níveis de produção e o módulo escravo presente no gabinete central, foi utilizada uma placa de prototipagem universal acoplável, desenhada especificamente para o modelo Mega 2560 (Figura 31a). Além dos conectores IDC para os níveis de produção, nesta placa foram instalados componentes de segurança e conectores que se interligam com outras peças de hardware presente no gabinete (Figura 31b).

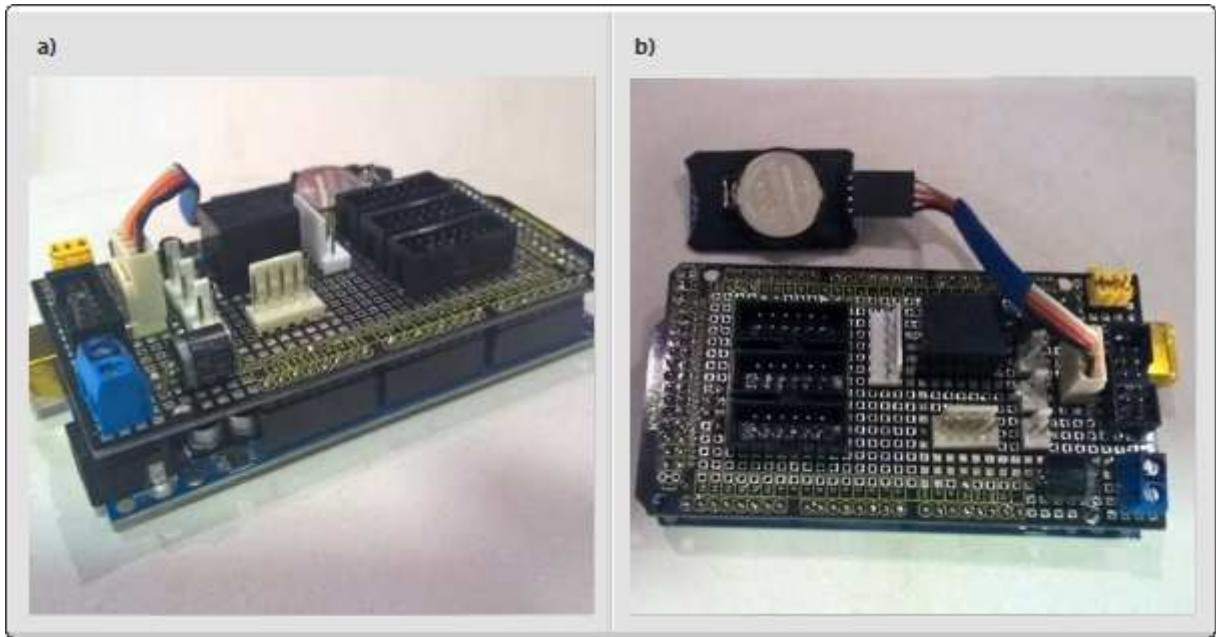


Figura 31 – Placa Escrava (Mega 2560) acoplada ao *shield* de conexão: a) Visão Frontal; b) Visão Superior.

Fonte: Autoria Própria

Os componentes de segurança instalados na torre de produção são fixados no *shield*, que por sua vez é dotado de um relê de 12v de chaveamento do terra, que funciona como uma chave geral, assim, caso ocorra uma queda abrupta de tensão, o sistema desarmará, desligando os níveis de produção, o que evitaria danos ao equipamento. Além do uso de uma chave geral, foi feita a instalação de um diodo de polaridade na trilha de alimentação para prevenir curto-circuito, como pode ser visto na esquematização (Figura 32).

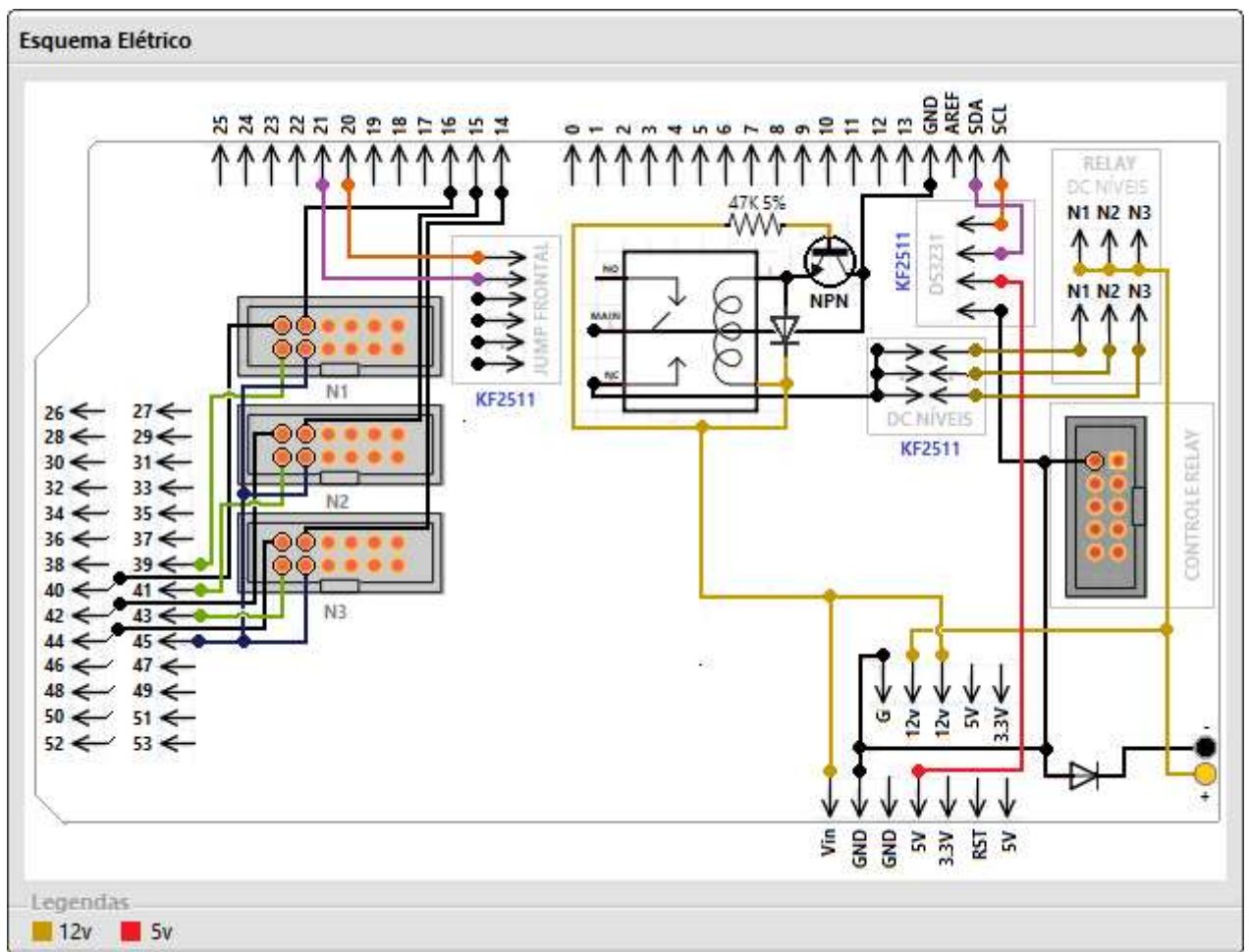


Figura 32 – Esquema eletrônico do *shield* de conexão.

Fonte: Autoria Própria

4.1.3 Sensores para o Recolhimento de Dados

Para garantir uma coleta de dados eficiente, e flexibilidade na aplicação do modelo de plantio vertical proposto, foi utilizado um conjunto específico de sensores (Figura 33), que foram posteriormente instalados nas caixas de conexões presentes nos níveis de produção:

- **Sensor BME280:** Possuindo um baixo consumo energético (3.3v) e sendo capaz de mensurar a umidade do ar, temperatura ambiente (-40...85°C) e pressão (300...1100 hPa), o módulo permite comunicação sobre os protocolos I2C (para curta distâncias) e SPI (longas distâncias) (BOSH, 2020);

- **Sensor de Umidade do Solo:** Sensor que se utiliza da condutividade elétrica do solo, através do uso de duas hastes, para mensurar o seu nível de umidade. Para o sensor de umidade solo foi utilizada uma solução proposta por Gardenbot (2020), utilizando do conceito de alternância dos polos, diferentemente dos sensores presentes no mercado, que como consequência apresentam problemas de corrosão ao processo de eletrólise;
- **Sensor de Carbono MQ-135:** Sensor capaz de medir a qualidade do ar, detectando faixas entre 10 a 1.000ppm (partículas por milhão) em conjunto com baixo consumo energético (5v) (SILÍCIO, 2020). Sua utilização neste projeto tem como objetivo a medição dos níveis de dióxido de carbono, pois essa variável tem influência direta na fotossíntese;
- **Módulo de Câmera OV7670:** Módulo de captura visual compatível com a plataforma Arduino, com capacidade de captura imagens com resolução de 640x480 com uma baixa tensão de operação (EMBARCADOS, 2020). A sua utilização garante o monitoramento do crescimento da cultura em tempo real além de permitir a análise dos dados visuais.

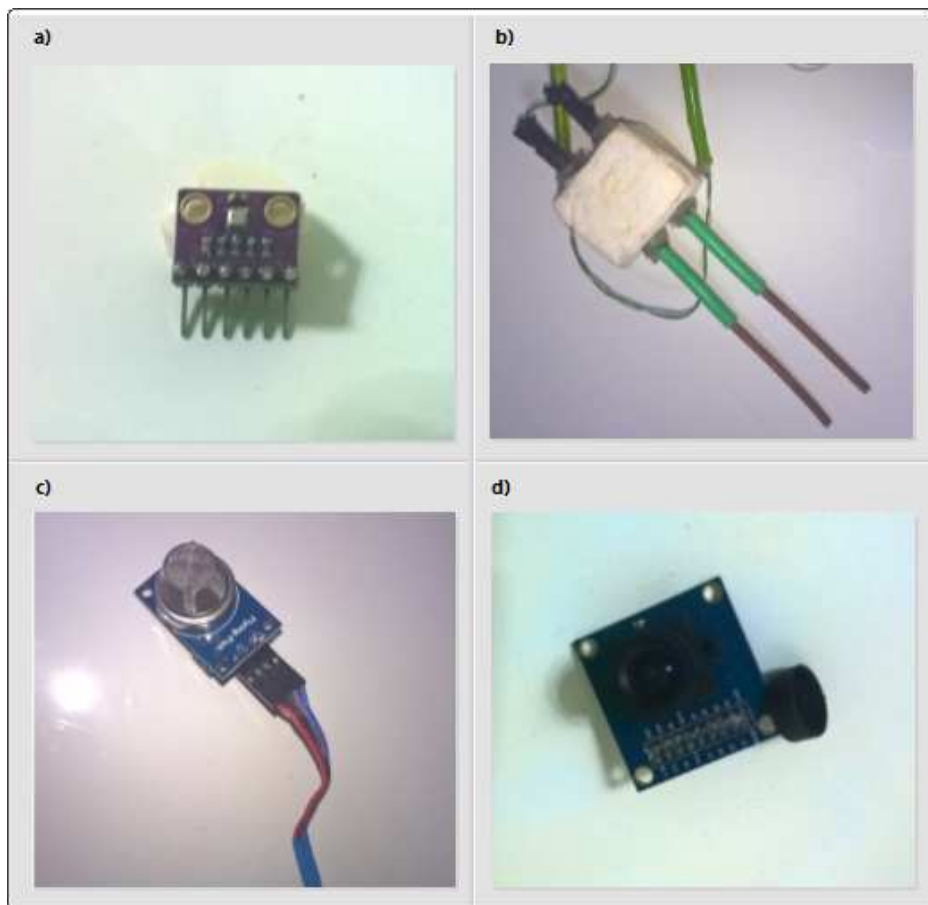


Figura 33 – Sensores Utilizados para o Recolhimento de dados do Modelo Vertical; a) Módulo de Temperatura e Umidade do Ar BME280, b) Módulo caseiro de Umidade do Solo, c) Módulo de Níveis de CO₂ - MQ135, d) Módulo de Câmera OV7670..

Fonte: Autoria Própria

4.1.4 Gabinete de Controle

De acordo com o projeto protótipo, cada torre deve possuir um gabinete central que deve estar alocado no topo da estrutura. Para este fim optou-se pela construção de uma estrutura em formato de caixa dividida em dois compartimentos sendo o compartimento esquerdo dotado dos equipamentos de hardware que compõem a torre (Figura 34a) e o direito, por sua vez, uma unidade de armazenamento com fins de irrigação (Figura 34b).

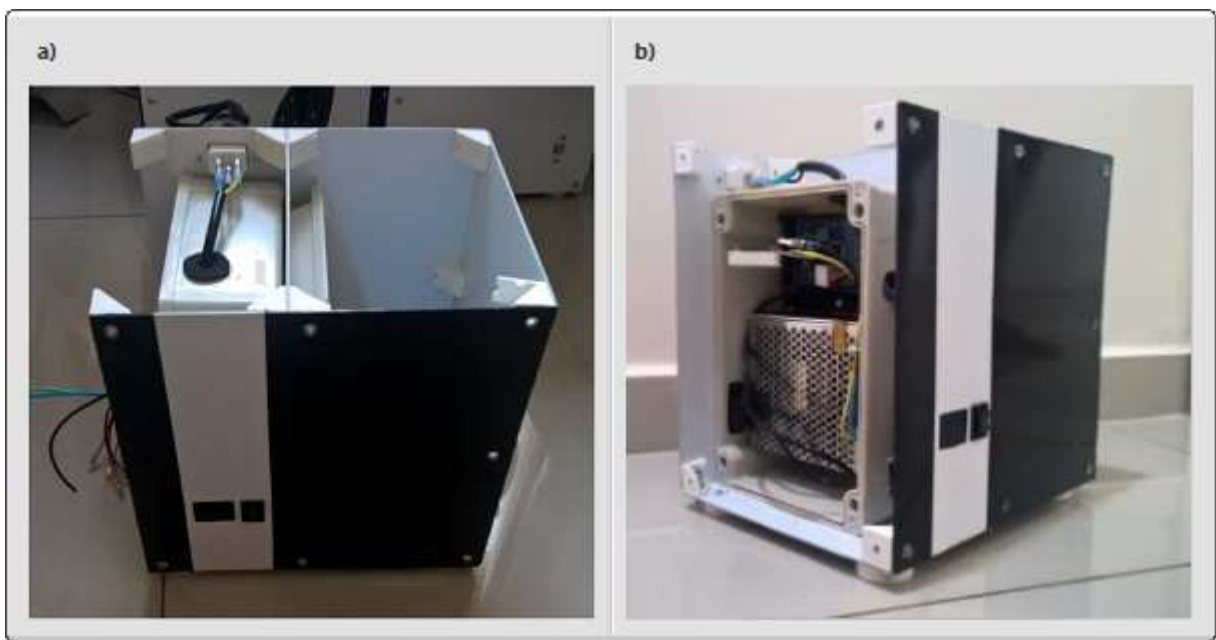


Figura 34 – Gabinete de Controle dos níveis de produção. a) Visão superior do Gabinete de Produção (Unidade de controle na esquerda, e tanque de armazenamento); b) Visão Lateral da unidade de Controle do Gabinete (Fonte de alimentação e outros periféricos).

Fonte: Autoria Própria

Para alojar os equipamentos eletrônicos do gabinete com segurança, utilizou-se uma caixa elétrica com proteção IP65, o que possibilitou a instalação da fonte de alimentação do sistema módulo escravo e seu respectivo *shield*. Possuindo saída de tensão de 12v e capacidade de corrente de máxima de 10a, a fonte de alimentação elétrica utilizada é conectada ao *shield*, que por sua vez tem a responsabilidade de alimentar o módulo Arduino, bem como os níveis de produção.

Além dos componentes supracitados, foi adicionada a cada gabinete de controle, uma porta USB 2.0 Tipo B na parte traseira, de forma que seja facilitada a conexão do módulo escravo presente com o módulo mestre. O gabinete possui ainda um display de 0.98 polegadas

na parte frontal para exibição de informações, e suporte para utilização de cartão de memória, possibilitando uma redundância das informações recolhidas.

4.1.5 Método de Iluminação

Dentre as diferentes tecnologias de iluminação disponíveis para esta tarefa, optou-se pela utilização de lâmpadas de LED, considerando seu custo benefício e resultados já alcançados nos modelos verticais existentes. Desta forma, a experimentação foi realizada através do uso da combinação dos espectros de Luz vermelho, azul e verde.

Devido a necessidade de utilização da combinação de dois espectros de luz, optou-se pelo uso de módulos LED RGB como alternativa a lâmpadas LED convencionais. Dentre os modelos disponíveis no mercado, foi adquirido o módulo WS2811 em fita, com alimentação de 12v e compatibilidade com a plataforma Arduino, o módulo WS2811 tem capacidade de trabalho com velocidades de até 400kbps (ADAFRUIT, 2020). Para sua aplicação, foi projetada uma estrutura de iluminação dupla se utilizando dos módulos RGB WS2811 com iluminação SMD 5050 em fita, este possuindo a capacidade luminosa de $70 \text{ lumens } m^{-1}$, consumo de $1.1W m^{-1}$ e ângulo de emissão de luz de 120 graus.

No total, a estrutura de iluminação dupla é composta por 36 e 12 módulos SMD respectivamente, se considerarmos a utilização dos seus respectivos diodos (Vermelho, Azul e Verde) simultaneamente, a estrutura conta com um total de 144 LEDs para cada nível de produção do modelo vertical (Figura 35). Para garantir o fornecimento de iluminação de qualidade pela estrutura, optou-se pela utilização de um formato retangular, pois possibilita um melhor direcionamento dos fótons emitidos, melhorando as condições para a execução do processo de fotossíntese.

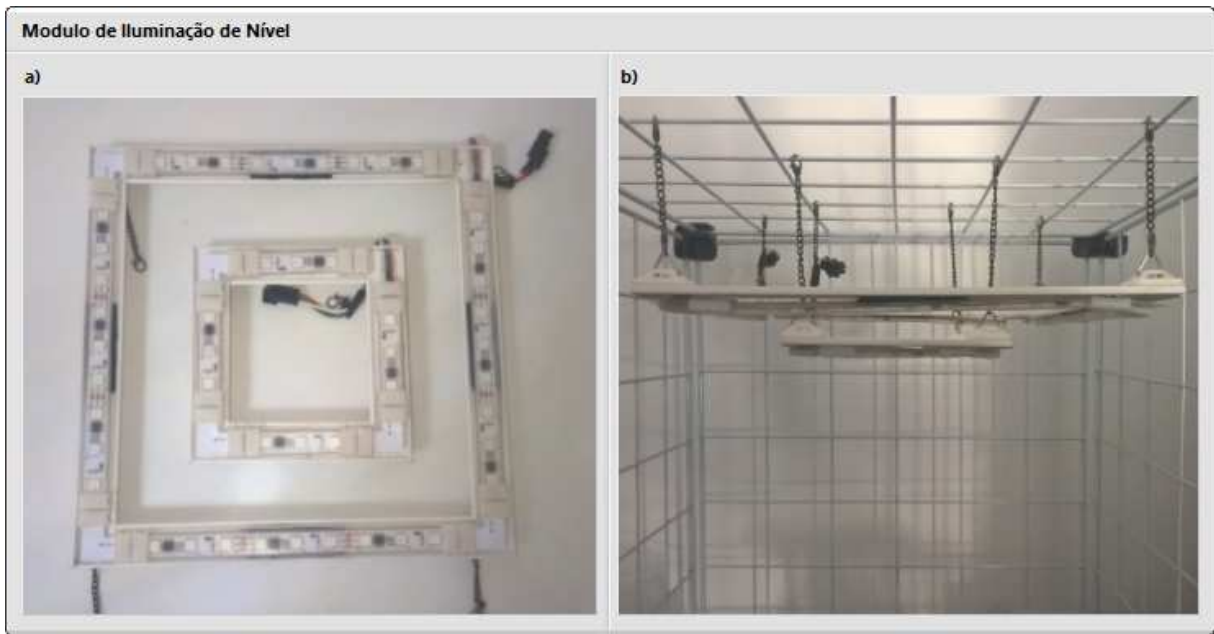


Figura 35 – Estrutura de Iluminação com uso do módulo WS2811 aplicadas no Modelo Vertical; a) Visão Superior do módulo; b) Visão Frontal do módulo já instalado.

Fonte: Autoria Própria

4.1.6 Sistema de Irrigação

Como supracitado, cada torre de produção presente no modelo de plantio vertical é dotada de um gabinete central, que por sua vez é dotado de um espaço para armazenamento de líquidos, possibilitando a aplicação de métodos de irrigação baseados na técnica de gotejamento.

Para este fim foi projetada uma unidade de armazenamento instalada no espaço reservado (Figura 36), sendo esta dotada de sensores de nível (nível alto e nível baixo) e bombas submersas (uma para cada nível de produção), conectadas a um adaptador de irrigação. A irrigação por gotejamento aplicada neste caso proporciona ao pesquisador uma flexibilidade de escolha em relação ao método de plantio (com ou sem solo).

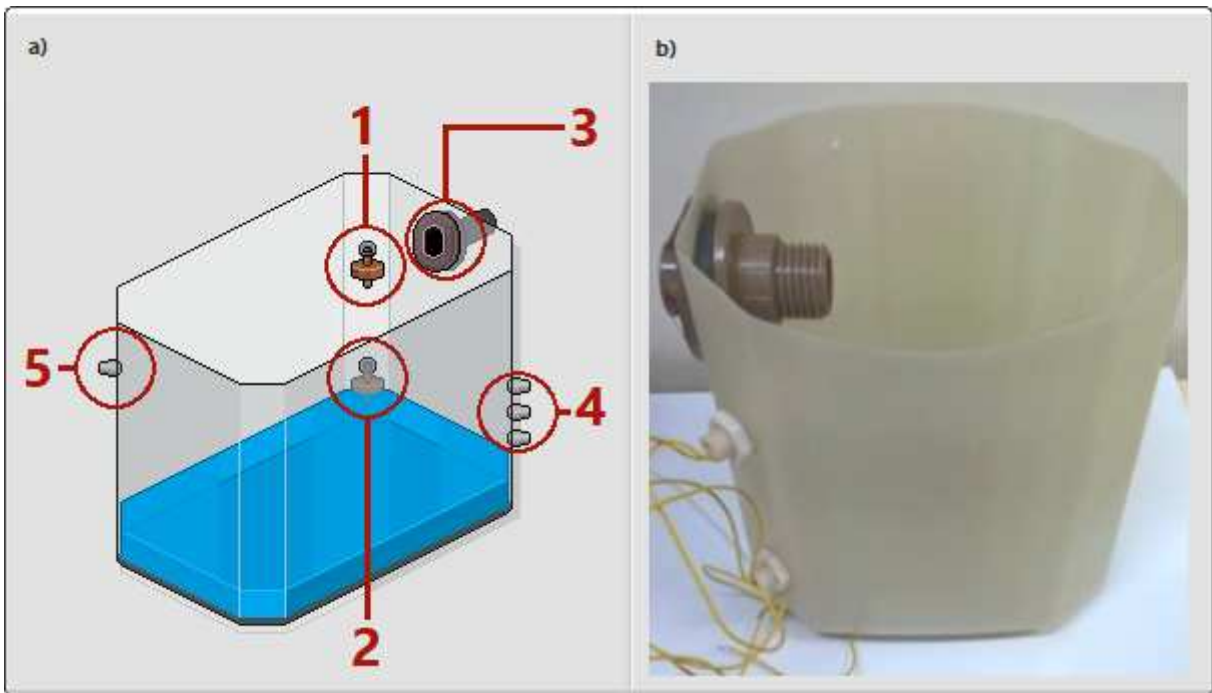


Figura 36 – Projeto Protótipo para unidade de armazenamento e irrigação: a) Projeto Esquemático (1- Sensor de Nível Alto, 2- Sensor de Nível Baixo, 3 - Válvula de Abastecimento, 4 - Saída de Irrigação dos Níveis, 5- Ladrão de Segurança); b) Modelo Protótipo construído.

Fonte: Autoria Própria

Apesar de promissor, a irrigação por gotejamento se mostrou impraticável durante o desenvolvimento deste trabalho, devido, principalmente, às limitações referentes ao ambiente de experimentação utilizado. Inicialmente havia a previsão de construção do modelo de plantio vertical em um ambiente externo, entretanto isto não foi possível, sendo esta por sua vez realizada em laboratório que não dispunha de estrutura adequada para a instalação do devido sistema hidráulico, e como consequência a falta de tempo hábil para os ajustes necessários.

Considerando estes empecilhos, buscou-se uma nova alternativa, optando-se pela aplicação de hidroponia por flutuação através da utilização de bandejas. Desta forma foi realizada uma atualização nas caixas de conexão cega presentes nos níveis de produção, permitindo a conexão das respectivas bandejas (Figura 37), que por sua vez são dotadas de uma bomba para mistura e oxigenação da solução nutritiva, sendo a raiz da cultura transplantada submersa na mesma.

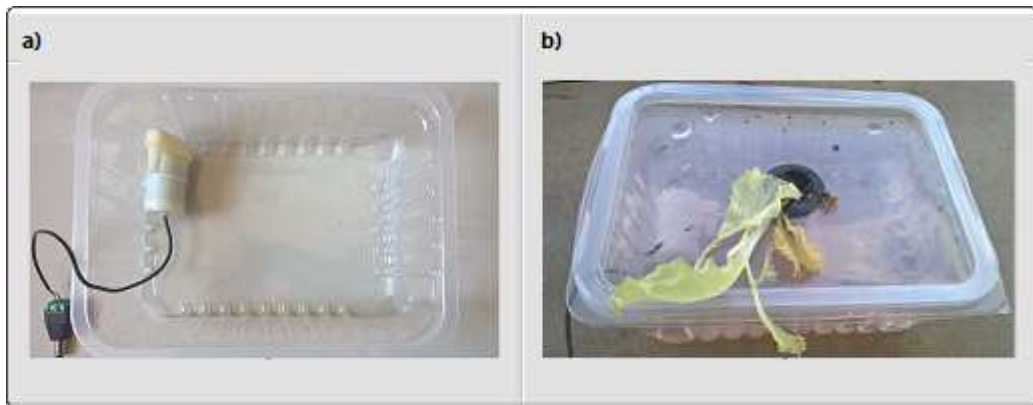


Figura 37 – Bandeja Hidropônica de Flutuação para plantio. Visão superior da bandeja hidropônica; b) Bandeja hidropônica com a cultura devidamente alocada.

Fonte: Autoria Própria

Como supracitado, optou-se pela utilização de bandejas hidropônicas de flutuação, sendo estas preenchidas por uma solução nutritiva composta por nitrato de cálcio, nitrato de potássio, sulfato de magnésio, ferro, MAP e outros micronutrientes diluídos em água.

4.1.7 Modelo de Plantio Vertical Resultante

Com os parâmetros delimitados foi construído um modelo de plantio vertical, composto por 7 colunas independentes com 3 níveis de produção cada, totalizando 21 níveis de produção (Figura 38). Foi realizada uma medição da corrente utilizada pela coluna de produção e constatou-se que a mesma variou entre 5.7v e 8v, na qual os valores de pico foram observados nos períodos em que a iluminação se encontrava ativa em conjunto com os motores para irrigação.



Figura 38 – Modelo de Plantio Vertical resultante.

Fonte: Autoria Própria

Foi observado que durante os períodos de pico energético houve um superaquecimento de alguns componentes, destacando-se os reguladores de tensão LM7805, presentes nas caixas de conexão dos níveis de produção, desta forma foi necessária uma atualização para mitigar este problema através do uso de dissipadores de calor, aplicados diretamente no transistor. Considerando estes fatores de pico de consumo e aquecimento excessivo, foi necessária mudança na rotina de software existente, com um espaçamento maior entre a execução de motores e iluminação.

Com base nas limitações técnicas foi elaborada uma rotina de software (Figura 39) para os módulos escravos baseada em modos de funcionamento:

- **Modo Legado:** Este modo de inicialização ocorre quando por alguma razão o módulo mestre não envia um *handshake* em tempo hábil. Desta forma não é feita nenhuma forma de comunicação (entrada/saída), entre o módulo escravo e o módulo mestre, assim sendo feito o carregamento das configurações padrões já armazenados nas torres de produção. Neste caso os dados obtidos por sensoriamento são armazenados apenas no cartão de memória presente no nível de produção em um arquivo .csv;
- **Modo Conectado:** Modo de inicialização padrão quando existe uma resposta ao *handshake* inicial, em tempo hábil, do módulo mestre. Baseado em um sistema de mensagens na topologia mestre/escravo sendo feita inicialmente a requisição e carregamento das informações da torre de produção para o mestre, de forma que durante toda a execução da rotina é feito o envio das informações lidas em tempos e

tempos. Contudo como forma de redundância os dados obtidos por sensoriamento são armazenados apenas no cartão de memória presente no nível de produção em um arquivo csv.

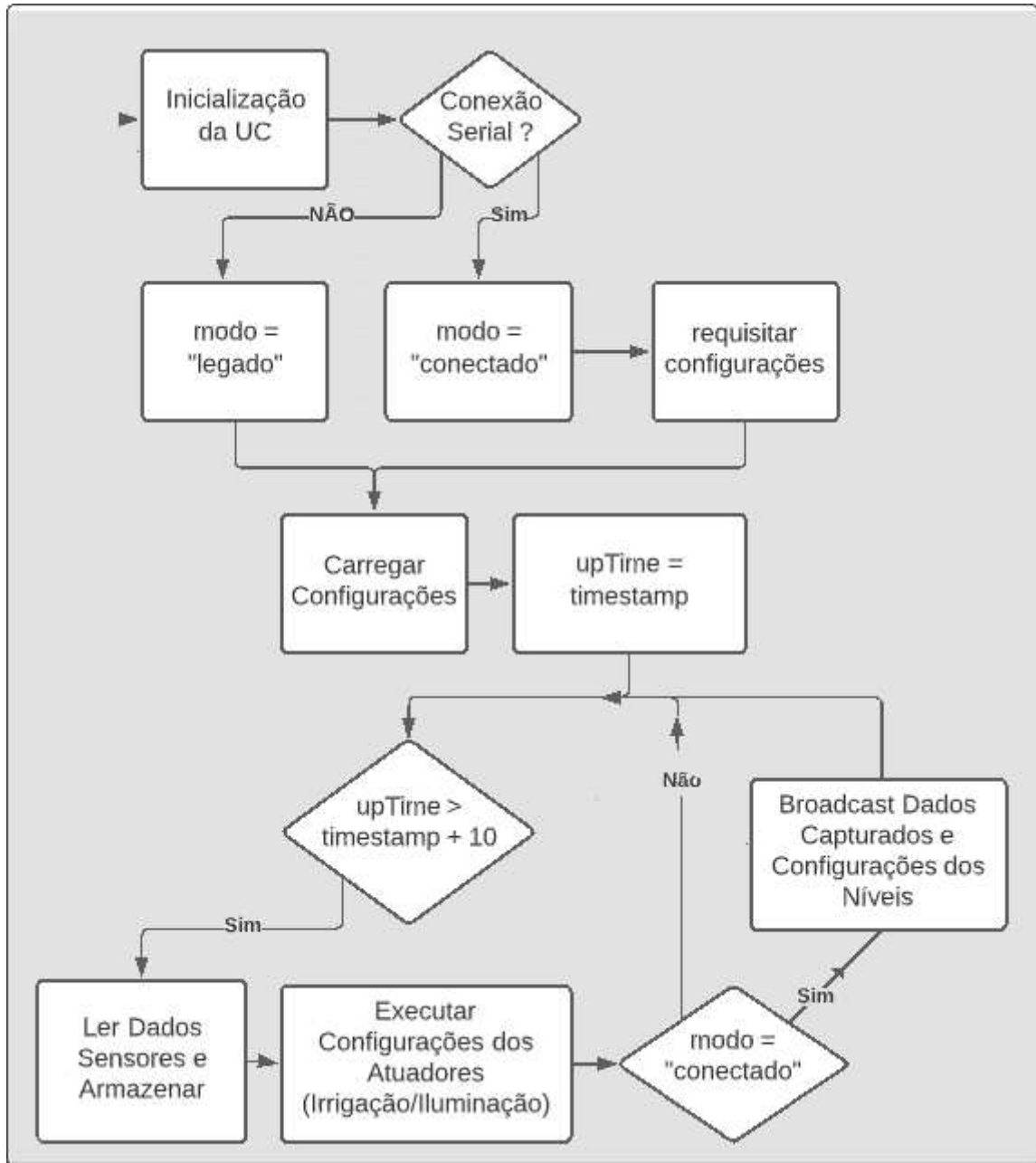


Figura 39 – Fluxograma referente a rotina de software utilizada no modelo de plantio vertical.

Fonte: Autoria Própria

Entre os sensores selecionados para utilização nos níveis de produção, a utilização do sensor de umidade de solo se mostrou desnecessária à medida que se optou pela utilização das bandejas hidropônicas. Contudo o sistema se encontra pronto para a utilização desta forma de sensoriamento caso se mostre conveniente.

Infelizmente nas condições atuais a utilização do módulo de câmera OV7670 se mostrou impraticável, a medida em que os módulos adquiridos não possuem memória de *buffer*, cabendo ao Arduíno ser responsável por fazer o total gerenciamento da informação obtida e considerando que a rotina de software projetada já consome quase que integralmente a memória dinâmica disponível no equipamento.

4.1.7.1 Teste de Rotina de Execução

Para a validação das rotinas de plantio, foi executada uma simulação referente a um ensaio experimental em um período de 20 dias, desta forma foi realizado um levantamento de defeitos, possibilitando a execução de correções quando necessárias.

Durante a execução do experimento, o módulo de hora DS3231, que funciona como um temporizador, sendo vital para definir os períodos de iluminação, informações de recolhimento de dados e irrigação apresentou instabilidades, quais sejam, os valores de hora e data não persistiam no modo bateria. Para a correção foi necessária uma alteração (Figura 40), tendo em vista que o módulo utilizado possui um circuito de carregamento rudimentar, enquanto a bateria utilizada não era recarregável, podendo ocasionar explosões.

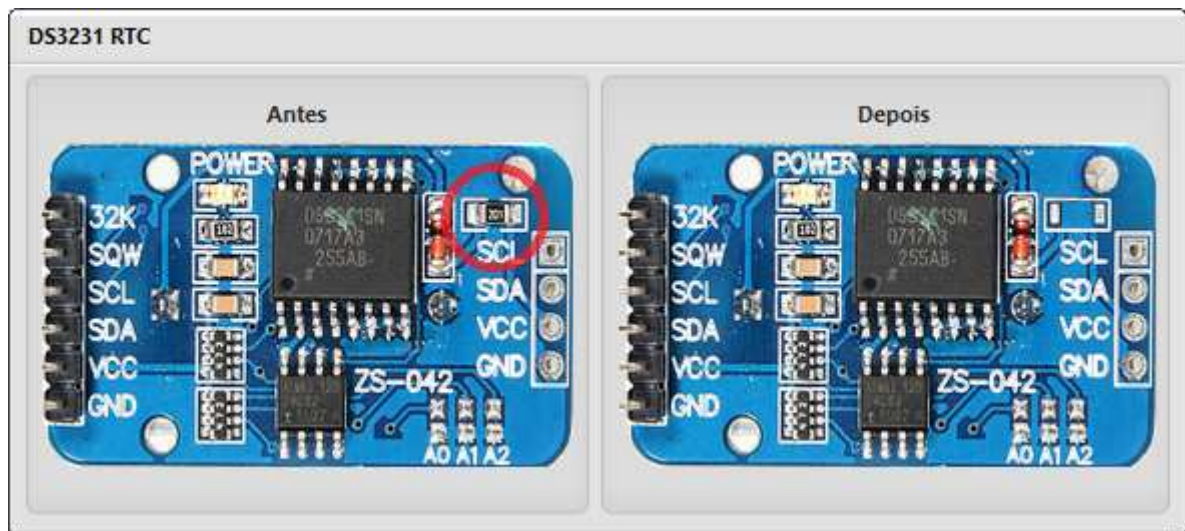


Figura 40 – Correção no módulo de hora DS3231 através da remoção do resistor na trilha de carregamento.

Fonte: Autoria Própria

Infelizmente durante os testes, devido a limitações de infraestrutura de rede, não foi possível o acesso das informações centralizadas para o módulo mestre através do acesso web via API. Desta forma durante os experimentos que se sucederam foi utilizado o modo legado,

sendo os dados de sensoriamento extraídos diretamente do arquivo .csv presente no cartão de memória. Considerando estas limitações verificou-se que, após 20 dias de experimentação, obteve-se um arquivo de saída de 22kb (Figura 41), sem perdas, com um total de 223 entradas de dados.

DATA	HORA	TEMP °C	PRESSÃO	ALTITU	UMIDADE A	CO2
25/02/2021	1	29.52	963.53	422.40	60.29	313
26/02/2021	19	29.06	960.98	444.54	36.29	357
26/02/2021	20	27.09	961.33	441.51	34.66	362
26/02/2021	21	26.73	962.25	433.52	40.58	367
26/02/2021	22	27.18	963.17	425.54	46.67	368
26/02/2021	23	27.36	963.61	421.76	45.84	369
27/02/2021	0	28.22	964.17	416.91	45.48	367
27/02/2021	1	28.97	964.47	414.27	46.35	358
27/02/2021	2	28.12	964.40	414.92	46.25	352

Figura 41 – Exemplo de arquivo de saída de dados ambientais capturados: Data; Hora de Captura; Temperatura, Pressão do Ambiente; Altitude; Umidade do Ar; Níveis de Dióxido de Carbono.

Fonte: Autoria Própria

4.2 EXPERIMENTAÇÃO PRÁTICA

Após a construção do modelo vertical, iniciou-se a etapa de experimentação, que consiste no estudo do crescimento de uma cultura, com o uso de iluminação artificial (LEDs) controlada, e seus efeitos sobre a mesma.

4.2.1 Seleção da Cultura

Considerando a sua aplicabilidade com sucesso nos modelos verticais existentes, optou-se pelo o uso de mudas de alface, especificamente a variante crespa como objeto de

estudo. Além de possuir uma grande importância no mercado nacional, sendo uma cultura de baixo porte e possuindo um ciclo de plantio curto, utilização da alface crespa satisfaz os requisitos para aplicação no modelo vertical desenvolvido.

4.2.2 Caracterização dos Ensaios Experimentais

A obtenção de resultados referentes à aplicação de iluminação LED com direcionamento de determinados espectros de iluminação e intensidades, sobre mudas de alface crespa, foi feita a partir da realização de ensaios experimentais com 30 dias de duração, que equivalem ao tempo médio de cultivo de uma cabeça de alface. Os períodos de tempo durante a execução dos ensaios serão referenciados como DAT (Dias após o transplante) da muda.

Durante a experimentação foi utilizada iluminação intermitente, isto é, a interrupção da iluminação sobre a cultura por um determinado período de tempo, sendo esta interrupção também conhecida como período de sombra, inicialmente dividido em períodos de 12 em 12 horas, podendo esta proporção ser alterada de acordo com os resultados obtidos. Objetivando uma melhor compreensão dos resultados, durante os ensaios foram realizadas capturas dos dados ambientais através da utilização dos sensores acoplados ao modelo de plantio vertical.

Desta forma, serão realizados dois ensaios experimentais de plantio, o primeiro referente à validação da utilização dos espectros de luz, através de combinações entre os LEDs RGB para observação dos seus efeitos sobre cada cultura, o segundo ensaio é focado no estudo da utilização da combinação que apresenta melhores resultados e variações de intensidade sobre a cultura. Em ambos os ensaios serão levados em consideração o número de folhas, massa fresca (MF), massa seca (MS) e área foliar (AF) referente à amostra após o período de cultivo.

O Número de folhas, contabilizado após a execução dos ensaios experimentais, foi obtido de forma não destrutiva, levando em consideração todos os brotos de forma indiscriminada, ou seja, não houve nenhum fator de descarte.

Para o cálculo da área foliar, optou-se pela solução proposta por Pereira et al. (2003), que utiliza-se do produto do comprimento da nervura principal da folha e a sua largura máxima, sendo este multiplicado pelo fator de correção de 0,75 (Equação 2). Para fator de descarte no cálculo da área foliar optou-se por contabilizar as folhas com no mínimo 4cm de comprimento da nervura principal.

$$AF_{total} = \sum[(C * L) * 0.75] \quad (2)$$

O cálculo da massa fresca foi executado através do uso de uma balança, de forma que os resultados obtidos em gramas foram documentados. Para o cálculo da massa seca, as amostras foram deixadas em descanso por um período de 120 horas, onde os resíduos obtidos foram pesados através do uso de uma balança, sendo o resultado obtido em gramas, também documentado.

4.2.2.1 Análise da aplicação de diferentes combinações de Espectros de Iluminação

Este ensaio experimental envolve o estudo de diferentes espectros de luz sobre a morfologia da cultura utilizada no modelo vertical. Estes testes foram realizados com o uso dos tratamentos vermelho, azul, roxo (vermelho e verde), branco (vermelho, azul e verde), ou seja, com 5 repetições para cada tratamento.

Utilizando-se das variáveis de crescimento pré-determinadas, este ensaio tem como objetivo descobrir o melhor tratamento de luz para aplicação no cultivo da alface crespa. Para este fim, os dados resultantes foram aplicados a uma análise de variância pelo teste F seguido pelo teste de Tukey a 5%.

4.2.2.2 Análise dos Efeitos da aplicação de diferentes intensidades de iluminação sobre a cultura

Com base no resultado do experimento anterior, quanto à combinação que apresentou os melhores resultados, este novo ensaio terá como objetivo ajustes em relação à quantidade de iluminação necessária. Como resultado espera-se obter um ponto de equilíbrio que evite o desperdício de iluminação e energético em relação ao ponto de saturação luminosa da cultura.

Aplicando-se 3 tratamentos de luz (36 LEDs, 54 LEDs e 72 LEDs) contendo 7 repetições cada, totalizando 21 unidades experimentais, de forma que as variáveis de crescimento resultantes após o período de experimentação serão submetidas a um teste de regressão, através do software PAST⁴, buscando-se obter a equação de regressão bem como o valor de correlação linear.

⁴<https://www.nhm.uio.no/english/research/infrastructure/past/>

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 VALIDAÇÃO DO AMBIENTE DE TESTES

Para a avaliação do ambiente de produção, foi feita a medição dos parâmetros de temperatura e umidade através do sensoriamento presente no sistema vertical durante 20 dias. Considerando que os níveis de produção do sistema não são isolados no que tange aos parâmetros ambientais, foram recolhidos os dados de uma amostra de uma única torre de produção para a validação dos resultados.

Durante o ensaio, que foi realizado durante o período de verão, observou-se máximas de 31°C e mínimas de 25°C, sendo que a média verificada ficou em aproximadamente 28°C. Os valores obtidos se encontram fora da curva ideal para a produção da alface, que tem como máximas de 24°C (Figura 42).

Desta forma considerando estes resultados se mostra interessante a atuação na temperatura ambiente para os ensaios experimentais subsequentes através do uso de climatização, principalmente durante os períodos de sol que apresentam maiores picos de temperatura.

Além da temperatura, foi feita a análise da umidade relativa do ar, que variou no intervalo de 41,45% e 57,53%, durante 20 dias (Figura 43), todavia o valor ideal deveria variar entre 60% a 80%. A baixa umidade de ar pode ser explicada devido ao ambiente de experimentação em laboratório. Diferentemente da temperatura ambiente, devido à ausência dos equipamentos necessários se torna inviável a atuação nesta variável para os experimentos subsequentes. Espera-se que nas condições nas quais serão realizados, a umidade relativa do ar não represente um fator preponderante no desenvolvimento da cultura dos experimentos que se sucedem.

Sustentando esta hipótese, durante o experimento realizado por Tibbitts e Bottenberg (1976), que teve como objeto de estudo a aplicação de umidade controlada para o cultivo de

alface crespa, observou-se que a principal vantagem obtida pela produção em um ambiente com alta umidade seria a produção de cabeças comercializáveis maiores e contendo um maior teor de água em um período de tempo ligeiramente reduzido.

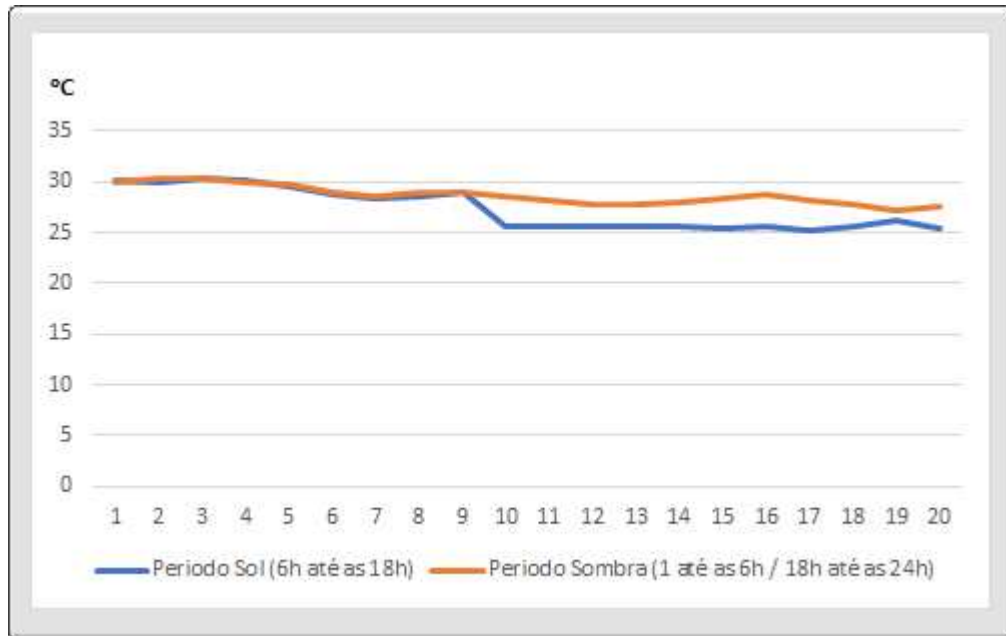


Figura 42 – Gráfico de Temperatura Média Diária durante a validação de ambiente.

Fonte: Autoria Própria

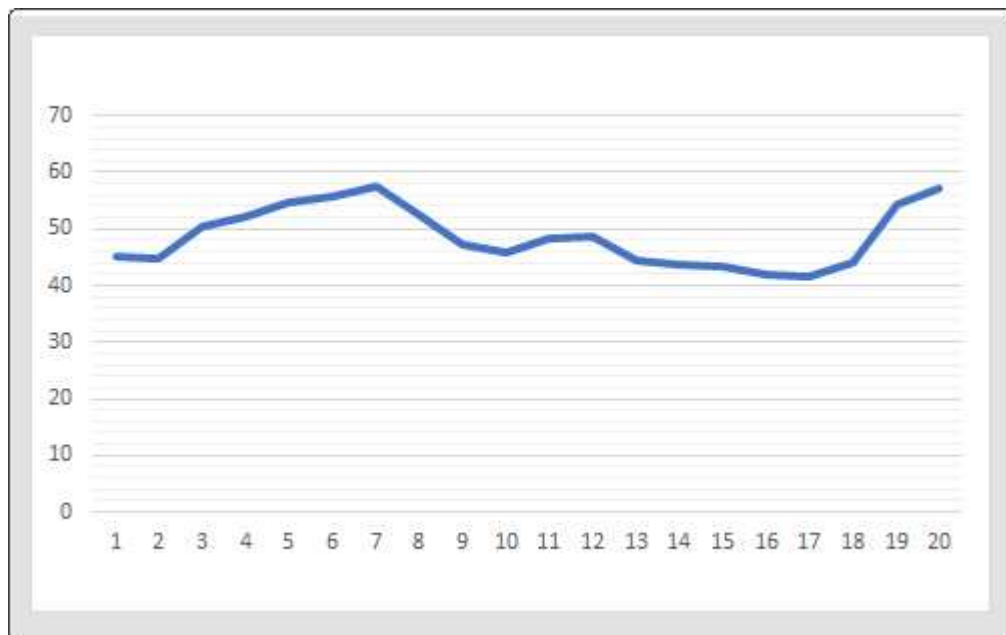


Figura 43 – Gráfico de Umidade média Diária durante o experimento de validação.

Fonte: Autoria Própria

5.2 VALIDAÇÃO DE IRRIGAÇÃO

Para a avaliação do modelo de irrigação de hidroponia por flutuação utilizado, foi realizado um experimento de plantio prévio 44), se utilizando das mesmas condições de iluminação propostas para o 1º ensaio, contudo este por sua vez foi realizado durante um período de 20 dias.



Figura 44 – Experimento de validação simulando a rotina de funcionamento (iluminação/irrigação), com o uso de diferentes espectros de luz combinados ao uso da bandeja hidropônica.

Fonte: Autoria Própria

Como resultado deste experimento observou-se que a segunda semana, este crescimento ficou estagnado e as mudas pararam de crescer ou murcharam (espectro vermelho). A hipótese mais aceita para este resultado seria uma oxigenação deficiente da solução nutritiva durante o experimento, considerando que para tal objetivo a bomba acoplada a bandeja hidropônica era submersa parcialmente permitindo o transporte de oxigênio, resultando em poucas bolhas e como consequência uma baixa diluição de oxigênio na solução.

A melhoria na oxigenação nos experimentos subsequentes se mostrou necessária, desta forma, foi feita uma atualização nas bombas submersas presentes nas bandejas hidropônicas, bem como um aumento no tempo de oxigenação, passando de 1 minuto/hora para 10 minutos/hora. Para este objetivo optou-se pela construção de um areador caseiro em formato de

T (Figura 45), que através de um vácuo criado na linha principal, é feita uma melhor oxigenação da solução a medida em que se observa a formação de bolhas de ar de forma constante similar aos resultados observados pela utilização de uma esponja porosa para areação.

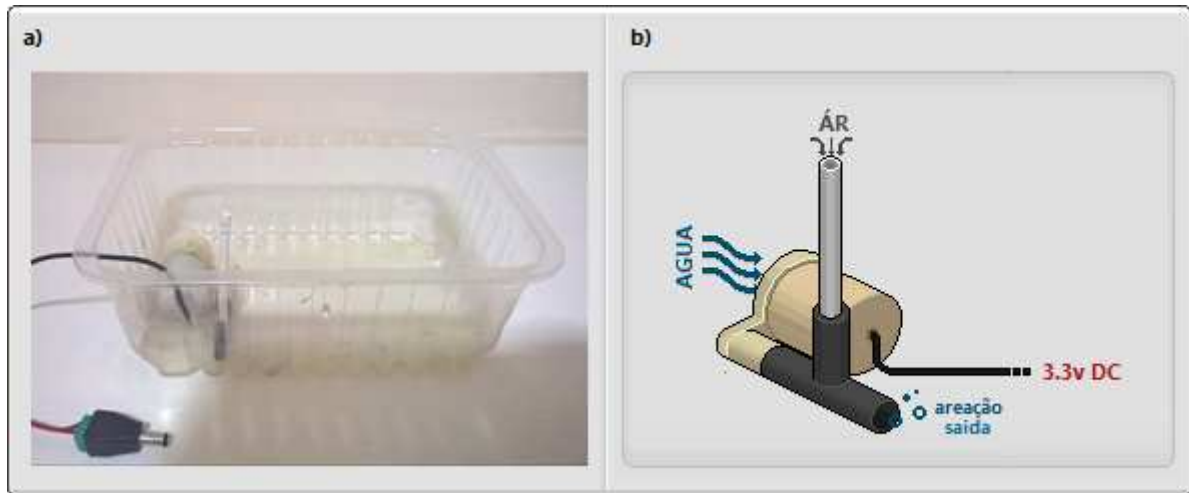


Figura 45 – Bandeja Hidropônica por flutuação dotada de um areador. a) Visão frontal da bandeja hidropônica atualizada com o areador caseiro; b) Modelo 2D da bomba acoplado ao Areador caseiro.

Fonte: Autoria Própria

Durante a execução desta validação, não houve a necessidade do isolamento lateral dos níveis de produção. Entretanto nos experimentos subsequentes este isolamento se mostrou necessário evitando-se a interferência dos espectros de luz aplicados sobre as culturas produzidas.

5.3 EXPERIMENTOS PRÁTICOS

Ambos os ensaios experimentais documentados foram realizados durante um período de 30 dias, com uso de bandeja hidropônica por flutuação. Considerando que o fator de temperatura ambiental se encontrava fora do intervalo desejado, nos experimentos de plantio optou-se pela utilização de climatização do ambiente com uso de temporizador, quando necessário.

5.3.1 Ensaio I

Neste ensaio buscou-se mensurar os efeitos da exposição de amostras de alface crespa a diferentes espectros de iluminação (Figura 46), e, em decorrência destas mensurações, foi possível extrair com maior precisão dados como a massa fresca (MF), massa seca (MS), Área Foliar Total (AFT) e Número de Folhas (NF). Para a execução deste ensaio foi realizada uma alteração referente ao melhor isolamento dos níveis de produção e cobertura da bandeja hidropônica evitando a formação de bolor.



Figura 46 – Modelo de Plantio Vertical após o primeiro Ensaio Experimental.

Fonte: Autoria Própria

Com o uso de climatização durante um intervalo de 12 horas referentes ao período de sol, foi possível a obtenção de resultados próximos ao ideal para o crescimento da alface, com uma temperatura média de 25,3°C, com máxima de 30,3°C e mínima de 22°C (Figura 47). Além da temperatura com base nos dados capturados, foi constatada a variação da umidade relativa do ar com máxima e mínima de 60% e 43,8% respectivamente (Figura 48).

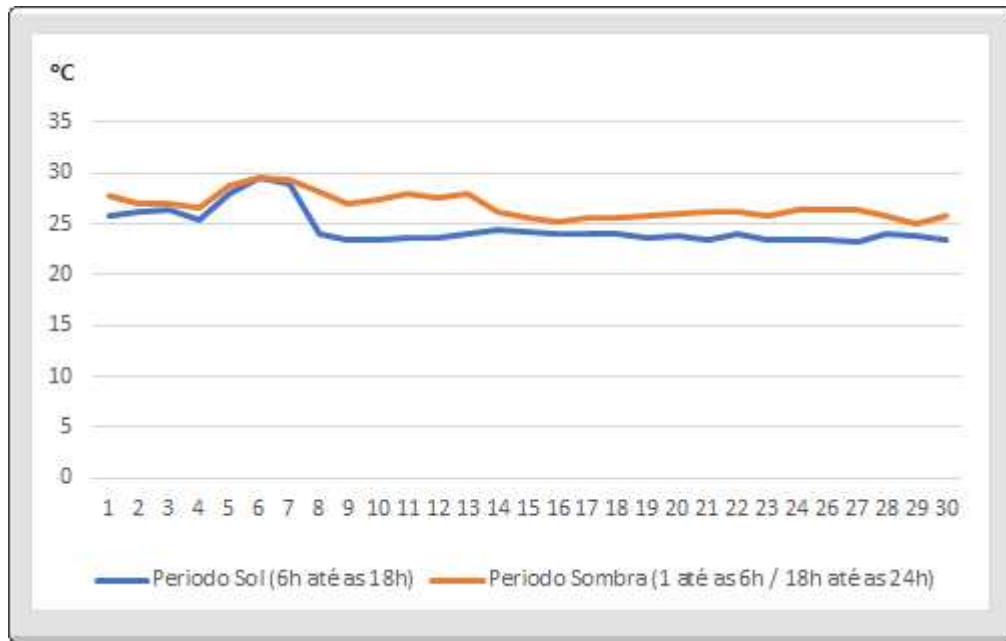


Figura 47 – Gráfico de Temperatura média Diária durante o experimento de crescimento com diferentes espectros de luz, referentes aos períodos de luz e sombra.

Fonte: Autoria Própria

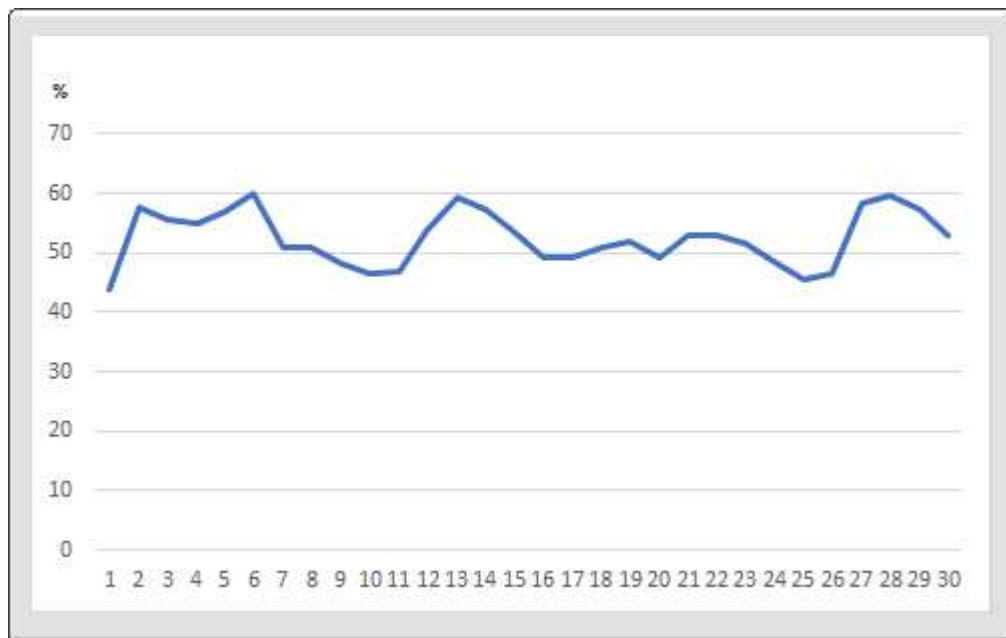


Figura 48 – Gráfico de Umidade média Diária durante o experimento de crescimento com diferentes espectros de luz.

Fonte: Autoria Própria

Para o presente estudo foi realizada a aplicação de diferentes tratamentos de luz: Vermelho, Azul, Vermelho + Azul (Roxo) e Vermelho + Azul + Verde (Branco). Durante o

período de experimentação, notou-se que após o 15º dia as amostras expostas a aplicação do espectro vermelho começaram a murchar, o que não ocorreu com os outros tratamentos de luz durante os dias subsequentes (Figura 49).

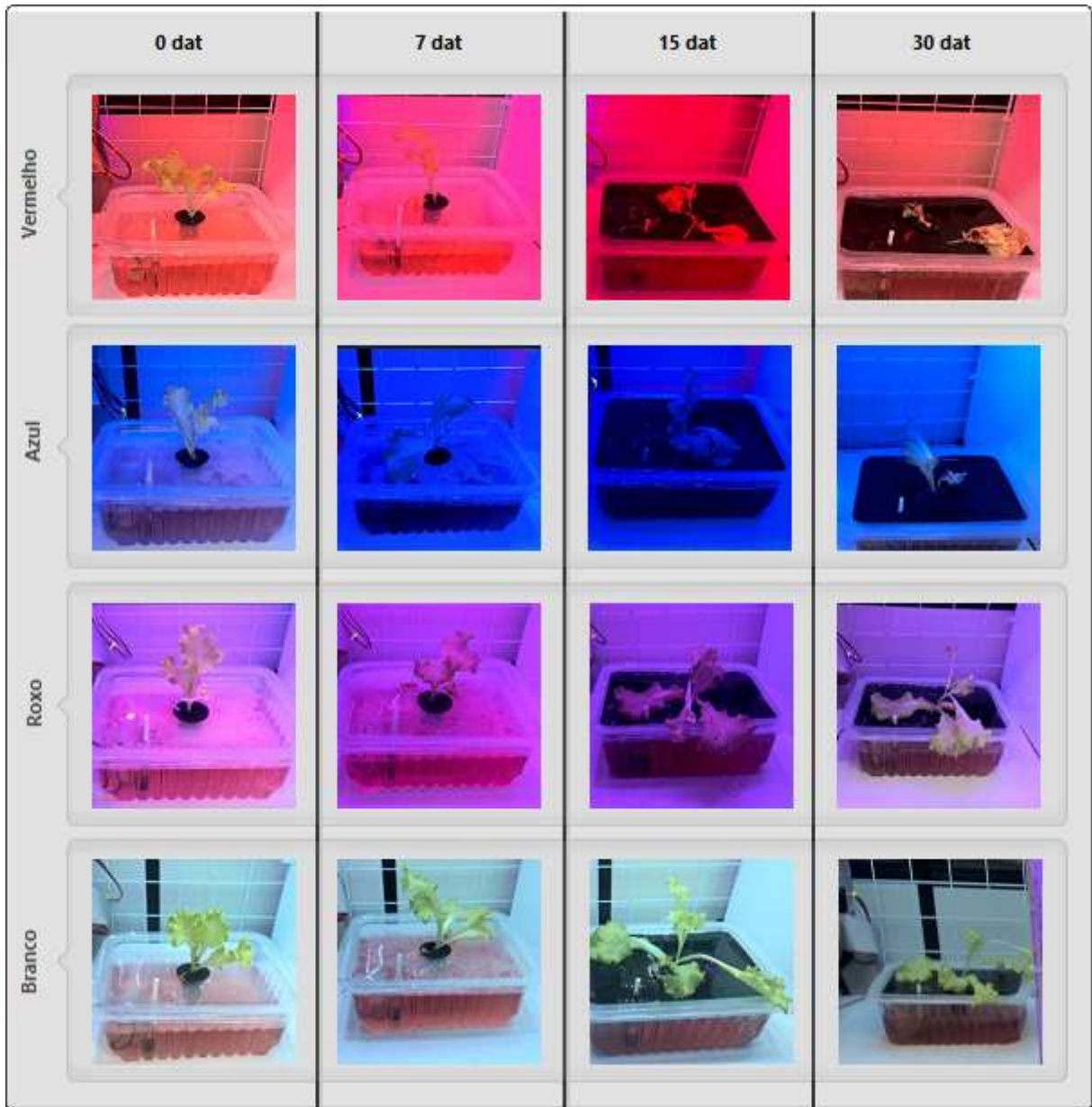


Figura 49 – Representação de Amostras expostas a diferentes espectros de luz sobre culturas de alface durante o período de 30 dias.

Fonte: Autoria Própria

Em decorrência dos dados de condição ambiental (temperatura) mais favorável ao desenvolvimento alcançados com o uso de climatização iniciou-se o plantio. A partir daí, foram realizados os registros dos seus parâmetros de crescimento. As culturas foram então expostas a variância e teste de Tukey a 5%, o que possibilitou determinar quais tratamentos

de luz apresentam melhor influência sobre os parâmetros morfológicos analisados, quando combinados a condições ambientais controladas.

Com os dados devidamente preparados, o primeiro parâmetro analisado foi o número total de folhas. Como resultado inicial (ANOVA) tem-se que ao menos um dos tratamentos de luz apresentou diferença significativa estatisticamente, considerando $p < 0,05$. Subsequentemente, após a aplicação dos resultados ao teste de Tukey em 5%, o tratamento de controle (luz branca) e o tratamento de luz roxa (vermelho + azul) apresentaram os melhores resultados diferindo dos demais (Figura 50).

Como observado apesar do tratamento branco ter apresentado a maior média de folhas, estatisticamente não apresentou diferença se comparado ao espectro roxo, o que implica que a complementação do espectro verde presente no tratamento branco não apresentou influência significativa no resultado referente ao número de brotos. Este resultado condiz com o observado por Bian et al. (2018), onde o suplemento do espectro verde ao roxo trouxe ganhos na taxa fotossintética, contudo não apresentando diferença significativa no número de brotos se comparado a ausência do mesmo.

Em contrapartida, a aplicação dos espectros individuais (vermelho e azul), que por sua vez resultaram no menor número de folhas, não apresentaram diferença significativa no número de folhas obtidos após o experimento.

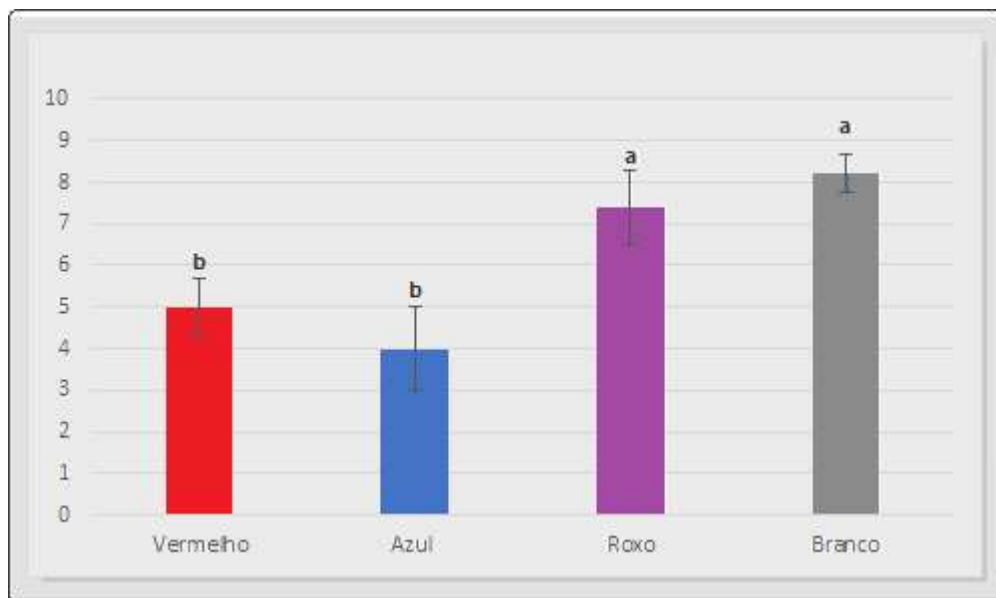


Figura 50 – Resultados do teste de Tukey referente ao total de folhas sobre diferentes tratamentos: Tratamentos Branco e Roxo apresentaram os melhores resultados se diferenciando dos demais estatisticamente.

Fonte: Autoria Própria

Após submetidos os dados de área foliar (cm²) a análise estatística (ANOVA), observou-se que ao menos um dos tratamentos apresentou diferença significativa dos demais, considerando $p < 0,05$. Todavia as amostras submetidas ao espectro vermelho não apresentaram massa fresca, murcharam, comprometendo qualquer medição referente à área foliar, apresentando o pior resultado. Nestas condições, após submeter esses dados ao teste de Tukey 5%, observou-se que o tratamento branco apresentou o melhor resultado, se diferenciando dos demais estatisticamente (Figura 51).

O resultado referente à AF pode estar relacionado com o fato de o complemento de verde utilizado representar apenas 33% da iluminação total, considerando a utilização dos diodos RGB no espectro branco. Sustentando esta hipótese, no estudo executado por Kim et al. (2004), constatou-se que a combinação do espectro verde em conjunto com o roxo, quando aplicado em proporção de 24%, apresentou os melhores resultados referentes à AF, contudo, como apontado anteriormente, excesso de iluminação verde resultou em decréscimo da AF.

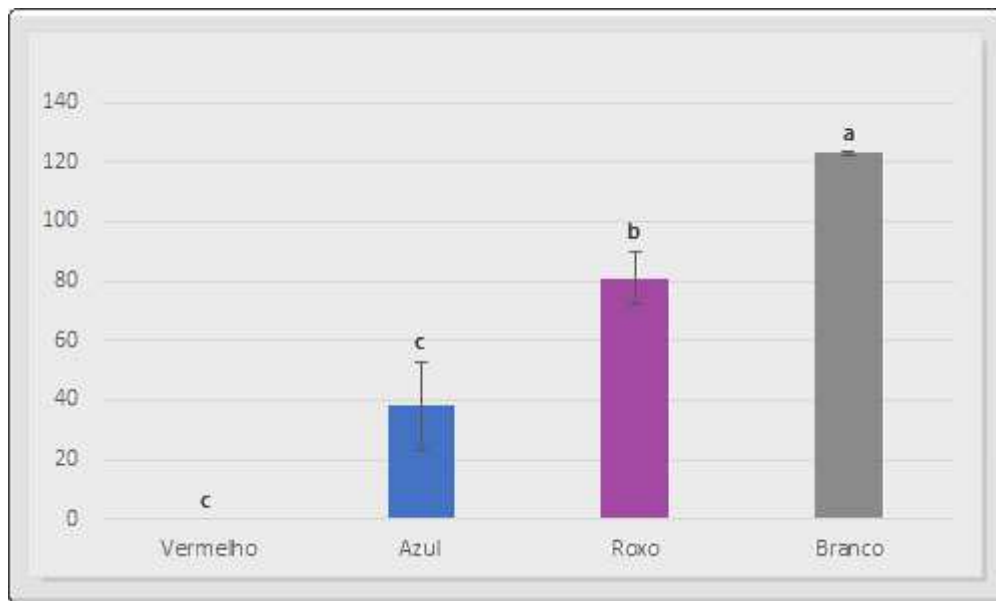


Figura 51 – Resultados do teste de Tukey referente a área foliar sobre diferentes iluminações: Tratamentos Branco e Roxo apresentaram os melhores resultados se diferenciando dos demais estatisticamente.

Fonte: Autoria Própria

Analisando os dados referentes à massa seca resultante, observou-se que ao menos um dos tratamentos apresenta diferença significativa dos demais, considerando $p < 0,05$. Após executado o teste de Tukey a 5%, concluiu-se que o tratamento branco e roxo apresentaram-se com os melhores resultados, não diferindo entre si estatisticamente (Figura 52). Destarte, fica implícito que o complemento de verde presente no tratamento branco não trouxe ganhos

significativos em comparação ao Roxo.

A aplicação avulsa dos espectros de luz, isto é, tratamento vermelho e tratamento azul resultaram nas menores massas secas, não se diferenciando entre si estatisticamente. Estudos como o executado por Cope et al. (2014) reconhecerem que a aplicação do espectro azul em excesso pode inibir a massa seca, contudo o perecimento das amostras após 15 DAT iluminadas com espectro vermelho pode explicar o fato de o espectro azul apresentar um resultado similar ao tratamento vermelho.

Nos experimentos executados por Kim et al. (2004), a suplementação do verde (lâmpada fluorescente) em conjunto com o tratamento roxo (led vermelho + led azul), aplicados à alface, trouxe ganhos de aproximadamente 48% na MF. Entretanto este resultado pode estar relacionado a outros fatores provenientes da aplicação de lâmpadas fluorescentes, que, diferentemente do LED verde, proporciona a aplicação de iluminação difusa e calor sobre as folhas.

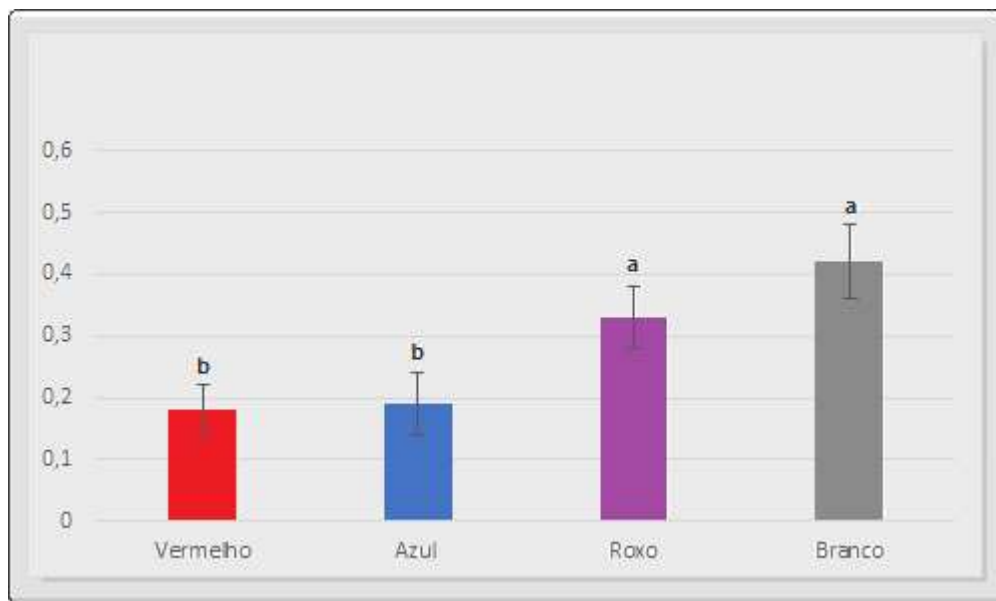


Figura 52 – Resultados do teste de Tukey referente à massa seca sobre diferentes tratamentos: Tratamento Branco apresentou o melhor resultado, se diferenciando dos demais estatisticamente.

Fonte: Autoria Própria

A análise de massa fresca foi executada entre os tratamentos azul, roxo e branco, considerando que as amostras experimentais com espectro de iluminação vermelho, durante o experimento, murcharam e não apresentaram dados sobre massa fresca, apresentando nenhum resultado. Nestas condições, executou-se a análise estatística (ANOVA), considerando $p < 0,05$, constatando-se que ao menos um dos tratamentos apresenta diferença significativa dos demais. Após executado o teste de Tukey em 5%, verificou-se que o tratamento branco, que por sua vez

apresentou o melhor resultado (Figura 53).

Como pode ser observado, a aplicação do espectro verde presente no tratamento branco trouxe benefícios para a massa fresca da alface. Estes resultados são condizentes com o estudo realizado por Kong et al. (2015), que envolveu a aplicação de diferentes espectros de luz e constatou-se que o espectro verde (525 - 575nm) trouxe ganhos significativos para a massa fresca da alface.

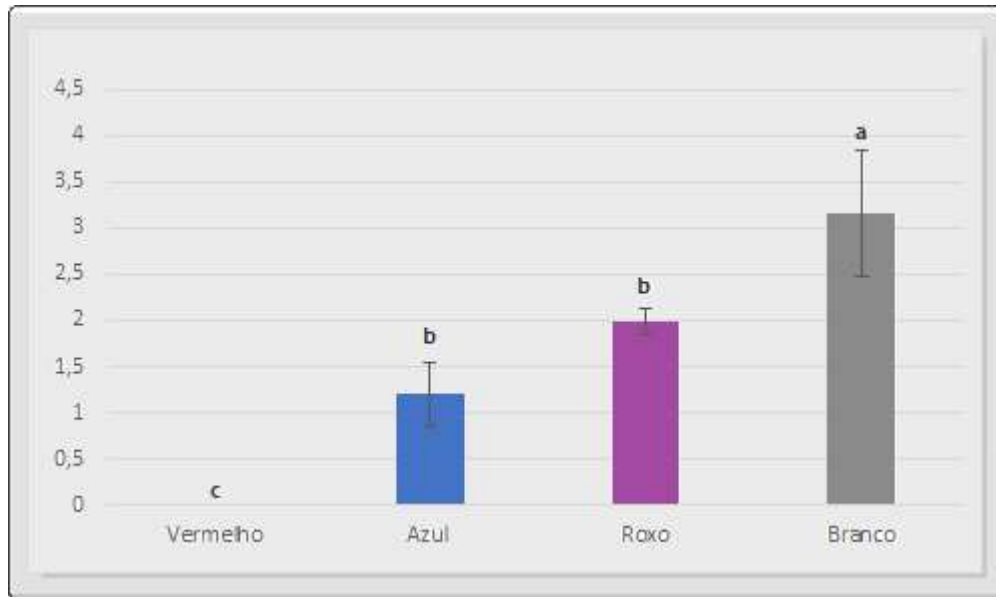


Figura 53 – Resultados do teste de Tukey referente à massa fresca sobre diferentes tratamentos de luz: Tratamento Branco apresentou o melhor resultado, se diferenciando dos demais estatisticamente.

Fonte: Autoria Própria

O resultado referente à aplicação do espectro vermelho (pericimto após 15 DAT) pode ser explicado por uma baixa taxa fotossintética das folhas de alface sobre o espectro aplicado, somada à quantidade de luz insuficiente, considerando que as amostras submetidas a outros tratamentos de luz se apresentaram estioladas ao fim do experimento. Como apontado pelos experimentos executados por Kang et al. (2016), que teve como objeto de estudo a aplicação de diferentes espectros de luz sobre amostras de alface crespa, observou-se que a aplicação exclusiva do espectro vermelho sem a adição do espectro azul apresentou as taxas fotossintéticas mais baixas, ou seja, resultando em um processo fotossintético disfuncional.

5.3.2 Ensaio II

Entre os espectros aplicados sobre as amostras de alface crespa, apenas o branco mostrou diferença significativa dos demais em todas as situações observadas, isto é, apresentando os melhores resultados, desta forma a aplicação do mesmo foi o objeto de estudo do experimento que sucede. Para este fim foi realizada a adição de um total de 24 LEDs RGB (Figura 54), em todas as 21 unidades de produção, considerando que no experimento anterior houve resultados de crescimento baixos (culturas estioladas), fenômeno esse explicado pela baixa incidência de luz.



Figura 54 – Modelo de Plantio Vertical Experimental após a adição de novos pontos de iluminação.

Fonte: Autoria Própria

Diferentemente do experimento anterior, não houve a necessidade da utilização de climatização no ambiente, pois o mesmo foi realizado próximo ao fim do outono e começo de inverno, quando as temperaturas são mais amenas. Nestas condições, durante o experimento, (Figura 55) observou-se temperatura máxima de 27,65°C e mínima de 12,83°C. Além da temperatura foi realizada a coleta dos dados referentes a umidade do ar (Figura 56), de forma que foi observado o valor mínimo de 40,42% e máxima de 71,83%.

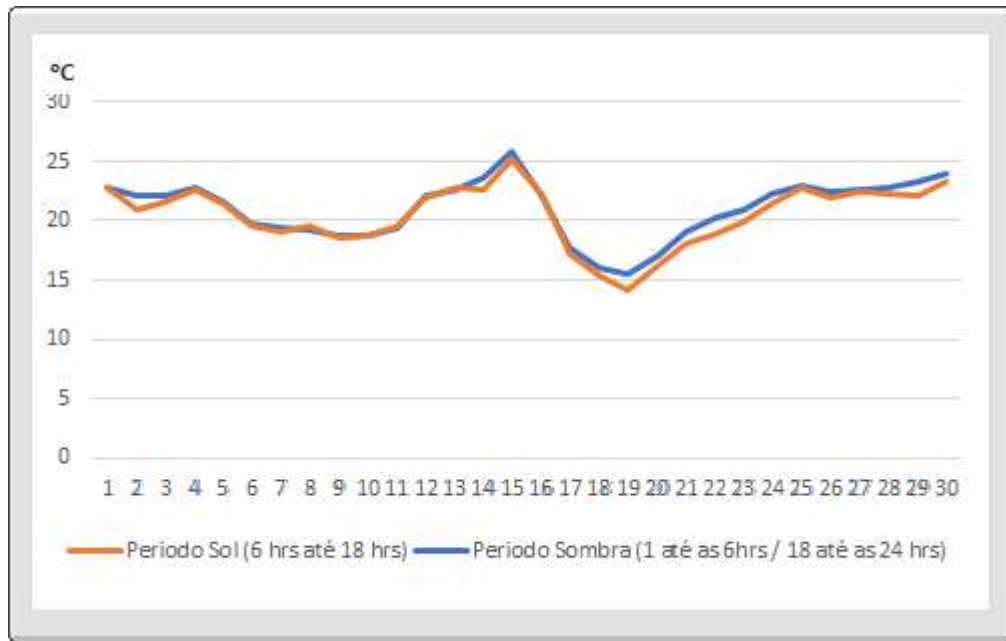


Figura 55 – Gráfico de Temperatura média Diária durante o experimento de crescimento com diferentes proporções de luz, referentes aos períodos de luz e sombra.

Fonte: Autoria Própria

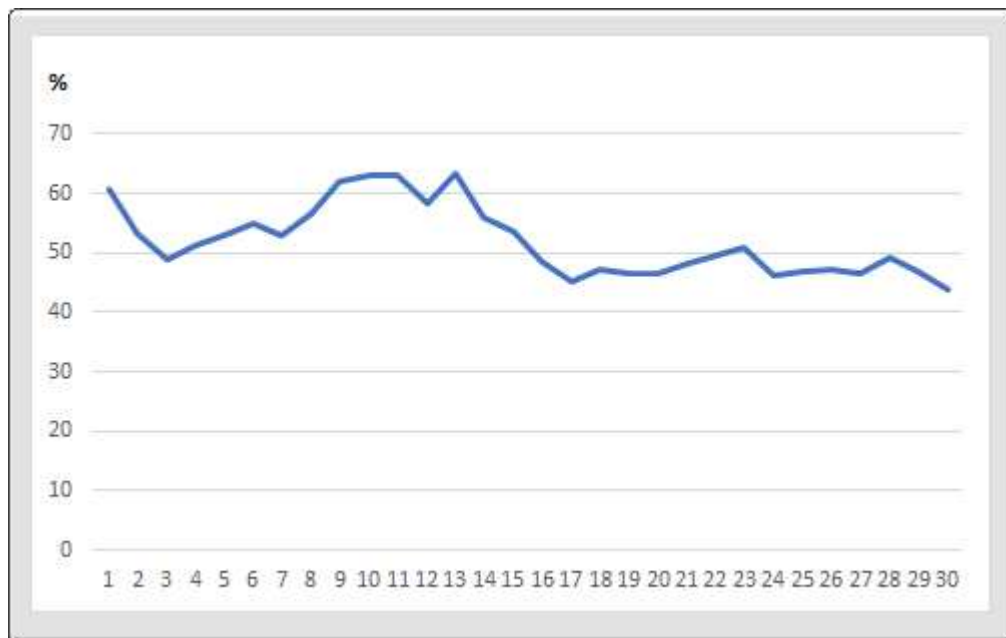


Figura 56 – Gráfico de Umidade média Diária durante o experimento de crescimento com diferentes proporções de luz branca.

Fonte: Autoria Própria

Com a delimitação do espectro de luz com o melhor resultado, foi feita a escolha dos tratamentos aplicados. Assim as amostras do modelo de produção foram divididas em 3 grupos

(Figura 57), contendo 7 repetições, que posteriormente foram submetidos a análise de regressão.

Tabela 2 – Resultados amostrais obtidos a partir da aplicação de diferentes proporções de luz led branca (RGB) sobre culturas de alface durante 30 dias.

Amostra	Tratamento	Total de Folhas (comp >4cm)	Total Folhas	Massa Fresca (g)	Massa Seca (g)	Área Foliar Total (cm2)
A12	36 LEDs	2	9	1	0,2	28,095
A22	54 LEDs	5	13	2,5	0,8	104,955
A32	72 LEDs	6	13	3,2	1,1	130,005
B12	36 LEDs	1	13	1,3	0,6	23,0625
B22	54 LEDs	2	8	1,2	0,5	35,94
B32	72 LEDs	3	10	2	1	64,568
C12	36 LEDs	0	10	1	0,5	0
C22	54 LEDs	3	11	1,9	0,9	67,785
C32	72 LEDs	5	9	2,5	0,9	109,455
D12	36 LEDs	1	9	0,6	0,2	14,175
D22	54 LEDs	2	11	1,6	0,7	34,26
D32	72 LEDs	6	11	2,9	0,8	157,283
E12	36 LEDs	1	8	0,7	0,3	18,9
E22	54 LEDs	7	12	3,1	1	171,743
E32	72 LEDs	8	10	3,7	1,2	248,408
F12	36 LEDs	2	5	0,8	0,5	45,675
F22	54 LEDs	2	7	1,4	0,7	34,8375
F32	72 LEDs	3	7	1,9	0,8	91,9875
G12	36 LEDs	3	10	1,5	0,5	49,1625
G22	54 LEDs	3	7	1,6	0,8	61,208
G32	72 LEDs	7	9	2,7	1	153,195

Fonte: Autoria Própria



Figura 57 – Representação de Amostras expostas a diferentes proporções de luz branca sobre culturas de alface durante o período de 30 dias.

Fonte: Autoria Própria

Com os dados coletados, a primeira análise de regressão executada envolveu o número de folhas (Figura 58a), em duas situações sendo a primeira o número de folhas total com comprimento mínimo de 4cm (NF c_{i4}) e o número de folhas total de forma indiscriminada (NFT). Observa-se através da reta que a quantidade de luz aplicada não trouxe influência no número total de folhas de forma indiscriminada. Em contrapartida, considerando o comprimento mínimo de 4cm a aplicação de maiores pontos de iluminação trouxeram resultados benéficos em relação ao número de folhas obtido.

Analisando-se as massas fresca (Figura 58b) e massa seca (Figura 58c), constata-se que a quantidade de luz disponível resultaram em influência direta obtido, de forma que quanto maior o número de leds (intensidade de luz), maior será massa resultante. Ambas os modelos lineares obtidos neste caso apresentam uma significância considerando $p < 0,05$.

Os resultados da área foliar (Figura 58d), por sua vez, apresentam-se em uma crescente, assim como as massas, em relação a adição de pontos de iluminação, contudo o

modelo linear obtido não é significativo, este resultado pode ser explicado devido ao fato de ter se levado em consideração para a obtenção da área folhas com comprimento mínimo de 4cm.

A análise da Área Foliar (Figura 58d), assim como os resultados referentes as massas, apresenta uma trajetória crescente com o acréscimo de número de LEDs aplicado. Este resultado, é consistente se levado em consideração os resultados obtidos, na análise realizada com os dados de número de folhas obtidos, quando considerado o fator de descarte de comprimento mínimo de 4cm. Como pode ser verificado na amostra B32, que foi submetida a maior quantidade de LEDs (72 LEDs), entretanto apenas 3 das 10 folhas resultantes foram contabilizadas, e como consequência apresentou a menor área foliar entre as amostras do mesmo tratamento.

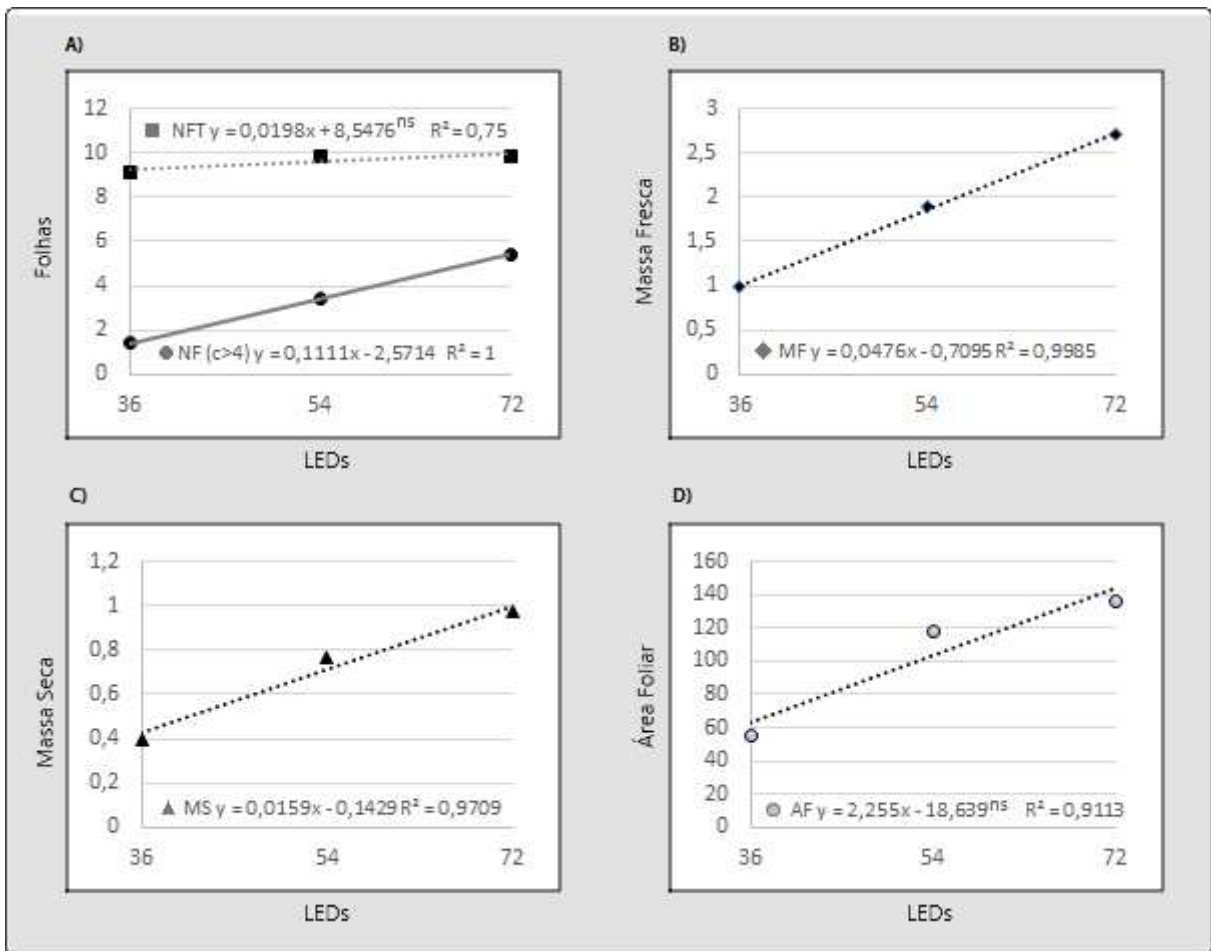


Figura 58 – Gráfico de Dispersão referente aos parâmetros morfológicos de culturas de alface submetidas a diferentes proporções de LEDs Branco. a) Total de Folhas; b) Folhas com comprimento superior a 4cm c) Massa Fresca; d) Massa Seca; e) Área Foliar.

Fonte: Autoria Própria

Em retrospecto as análises, observa-se que a intensidade de luz, através da adição do número de LEDs apresentou influência direta em todos os parâmetros morfológicos analisados.

De acordo com Fukuda et al. (2008), a intensidade de luz, é um dos principais fatores a ser levado em consideração para o crescimento das plantas, de forma que em decorrência da aplicação de altas intensidades luminosas obtém-se como resultado um aumento no processo fotossintético, assim influenciando de forma positiva a biomassa obtida. Em contrapartida a produção em ambientes de iluminação deficiente, acarreta no processo de foto inibição assim prejudicando a fotomorfogese.

6 CONCLUSÕES

A aplicação de iluminação LED, tal qual utilizadas nos experimentos realizados, concluiu que o tratamento branco, isto é, a combinação entre o vermelho, azul e verde, trouxe os melhores resultados em todos os parâmetros morfológicos analisados das amostras de alface. Em contrapartida a aplicação do espectro vermelho resultou nos piores resultados, considerando o pericínio das amostras durante o experimento. Com a aplicação de diferentes intensidades de LED branco, foi possível estabelecer uma relação mais significativa entre o número de LEDs aplicados e as massas obtidas (fresca e seca).

Considerando todos os pontos observados, desde a construção do modelo protótipo até a execução dos ensaios experimentais, conclui-se que a aplicação de modelos de plantio vertical é bastante promissora, entretanto, como pode ser observado no protótipo construído, existem fatores dificultantes na sua concepção, em especial no que tange à aplicação de LEDs como fonte de iluminação artificial, pois cada cultura apresenta diferentes necessidades, seja em relação à intensidade de iluminação ou ao tipo de espectro aplicado.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Apesar de ter apresentado resultados de crescimento da cultura abaixo do esperado, o modelo vertical construído mostra-se bastante promissor. Por óbvio que ainda há a necessidade de melhorias, principalmente no que tange à entrega de luz, e há, também, a necessidade da troca da fonte de alimentação contida em cada unidade de controle presente nas torres de produção, o que possibilitaria maior segurança para a adição de novos componentes; porém, apesar das deficiências aqui listadas, há de se reiterar que o sistema em si é muito promissor.

As bandejas hidropônicas construídas se mostraram bastante eficientes, contudo, por estarem mergulhadas 24 horas em solução nutritiva, após um determinado período os eixos das bombas embutidas acabavam travando e conseqüentemente gerando a necessidade de

manutenção ou, em casos mais graves, a substituição. Com a situação energética estabilizada, mostra-se interessante a substituição das bombas submersas por um produto de maior qualidade, bem como se torna necessária a aplicação de uma maior tensão para alimentação, que atualmente é de 3,3v, o que conseqüentemente resultará em uma melhor oxigenação, à medida em que existiria um aumento na rotação.

Com as condições físicas para plantio já corrigidas, seria interessante a adição de um módulo de maior poder de processamento para as unidades de controle, que como consequência possibilitaria a captura de dados visuais através dos módulos OV7670 já instalados em cada nível de produção. Entre os módulos disponíveis no mercado, o ESP32 se apresenta como uma alternativa interessante, e, sendo um módulo compacto, a sua utilização em conjunto com os módulos MEGA 2560, a princípio, não apresentaria problema.

Através de um retrabalho do sensoriamento, será necessária a construção de uma *dashboard* para controle e extração de dados, considerando que a API construída possibilita apenas a leitura de dados transmitidos através da serial. Com uma *dashboard* intuitiva, será possível um acompanhamento remoto pelo pesquisador, bem como a utilização de novas tecnologias envolvendo a aplicação de processamento de imagem e IA. Com uma *dashboard* para controle, seria possível o isolamento total dos níveis de produção, o que facilitaria bastante a extração de dados de forma individual.

REFERÊNCIAS

- ADAFRUIT. **WS2811 - Signal line 256 Gray level 3 channel Constant current LED drive IC**. 2020. Acesso em: 01 mai 2020. Disponível em: <<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/WS2811.pdf>>.
- ADENAEUER, L. Up, up and away! the economics of vertical farming. **Journal of Agricultural Studies**, v. 2, p. 40–60, 11 2014.
- AEROFARMS. **Our Vertical Farming Technology**. 2020.
- AGC Lighthing. **How led grow light changes the grow cycle of plants ?** 2020. Acesso em: 05 mai 2020. Disponível em: <<https://www.agcled.com/blog/how-led-grow-light-changes-the-grow-cycle-of-plants.html>>.
- AGUIAR, A. d. C. P. Atualizações em informática 2011. In: SOUZA, A. F. de; JR, W. M. (Ed.). [S.l.]: PUC-Rio, 2011. p. 408.
- ALVES, M. d. O. Produção de morangos ecológicos: Estudos preliminares da semi-hidroponia. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/130440>>.
- ALVES, M. S. et al. Estratégias de uso de Água salobra na produção de alface em hidroponia nft. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, sciELO, v. 15, p. 491 – 498, 05 2011. ISSN 1415-4366. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662011000500009&nrm=iso>.
- ANDERSON, J. Photoregulation of the composition, function, and structure of thylakoid membranes. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 37, p. 93–136, 11 1986.
- ANDERSON, J. M.; ANDERSSON, B. The dynamic photosynthetic membrane and regulation of solar energy conversion. **Trends in Biochemical Sciences**, v. 13, n. 9, p. 351 – 355, 1988. ISSN 0968-0004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0968000488901065>>.
- ANVISA. **Programa de Análise de Resíduos de Agrotóxicos em Alimentos (PARA). Relatório de Atividades de 2011 e 2012**. Brasília: [s.n.], 2008.
- ARDUINO. **What is Arduino ?** 2020. Acesso em: 01 mai 2020. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>.
- ASHTON, K. **That 'Internet of Things' Thing**. Jun 2009. Disponível em: <<http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986>>.
- Baldia Farms. **Our Farm - Baldia Farms**. 2020. Acesso em: 10 mai 2020. Disponível em: <<https://www.badiafarms.com/our-farm/>>.

BARBOSA, W. W. d. P. Aproveitamento do efluente da produção de tilápia do nilo (*Oreochromis niloticus*) para produção de manjerona (*Origanum majorana*) e manjeriço (*Ocimum basilicum*) em sistemas de aquaponia. Brasília, 2011. Disponível em: <<https://bdtd.ucb.br:8443/jspui/handle/123456789/1617>>.

BEACHAM, A.; VICKERS, L.; MONAGHAN, J. Vertical farming: a summary of approaches to growing skywards. **The Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, v. 94, p. 1–7, 02 2019.

BESTEN, J. den. Chapter 8.2 - vertical farming development; the dutch approach. In: ANPO, M.; FUKUDA, H.; WADA, T. (Ed.). **Plant Factory Using Artificial Light**. Elsevier, 2019. p. 307 – 317. ISBN 978-0-12-813973-8. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128139738000270>>.

BIAN, Z. et al. Study of the beneficial effects of green light on lettuce grown under short-term continuous red and blue light-emitting diodes. **Physiologia Plantarum**, v. 164, 03 2018.

BIRKBY, J. Vertical farming. National Center for Appropriate Technology, 2016. Disponível em: <<https://attra.ncat.org/attra-pub/download.php?id=512>>.

BLACKMORE, S. Precision farming: An introduction. **Outlook on Agriculture**, v. 23, n. 4, p. 275–280, 1994. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/003072709402300407>>.

BOONRAWD, P.; NUCHITPRASITICHAI, S.; NILSIAM, Y. Aquaponics systems using internet of things. In: _____. [S.l.: s.n.], 2020. p. 40–48. ISBN 978-3-030-44043-5.

BOSH. **Humidity Sensor BME280**. 2020. Acesso em: 01 mai 2020. Disponível em: <<https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/humidity-sensors-bme280/>>.

BOYLE, G. **Renewable energy: power for a sustainable future**. 2nd. ed. UK: Oxford University Press, 2004.

CARRASCO, G. et al. Development of nutrient film technique nft in chile: The use of intermittent recirculation regimes. **Acta Horticulturae**, v. 481, p. 305–310, 01 1999.

CERMENO, Z. S. **Cultivo de plantas hortícolas em estufa**. Lisboa: Litexa, 1977. 368 p.

CERMENO, Z. S. **Estufas - instalações e manejo**. Lisboa: Litexa, 1990. 355 p.

COPE, K. R.; SNOWDEN, M. C.; BUGBEE, B. Photobiological interactions of blue light and photosynthetic photon flux: Effects of monochromatic and broad-spectrum light sources. **Photochemistry and Photobiology**, v. 90, n. 3, p. 574–584, 2014. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/php.12233>>.

CORNILLON, P. Influence de la température des racines sur le comportement du chrysanthème et du gerbera. **Revue Horticole**, 1980.

DESPOMMIER, D. **The vertical farm: feeding the world in the 21st century**. New York: Thomas Dunne Books/St. Martin's Press, 2010.

DESPOMMIER, D. The vertical farm: Controlled environment agriculture carried out in tall buildings would create greater food safety and security for large urban populations. **Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit**, v. 6, p. 233–236, 06 2011.

DESPOMMIER, D. Farming up the city: The rise of urban vertical farms. **Trends in biotechnology**, v. 31, p. 388–9, 07 2013.

DESPOMMIER, D. Vertical farms in horticulture. In: _____. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1791–1799. ISBN 978-94-007-0928-7.

DIVER, S. Aquaponics-integration of hydroponics with aquaculture. ATTRA, 2006. Disponível em: <<https://backyardaquaponics.com/Travis/aquaponic.pdf>>.

EINSTEIN, A. Rio de Janeiro: Editora da UFRJ, 2001.

EMBARCADOS. **Explorando o módulo OV7670-FIFO: Interface SCCB**. 2020. Acesso em: 01 mai 2020. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/modulo-ov7670-fifo-interface-sccb/>>.

EMBRAPA. **Internet das Coisas pode ajudar a melhorar produtividade agrícola**. 2018. Acesso em: Nov 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/31786119/internet-das-coisas-pode-ajudar-a-melhorar-produtividade-agricola>>.

EMBRAPA. **Novas cultivares de alface crespa suportam até dez dias mais o calor**. 2020. Acesso em: 07 mai 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/45214606/novas-cultivares-de-alface-crespa-suportam-ate-dez-dias-mais-o-calor>>.

ERCAN, N.; BAYYURT, R. The effects of applications which increase the o₂ of the water on yield and quality of lettuce grown in a floating system. **Acta Horticulturae**, p. 77–84, 05 2014.

FAO. 2017. Acesso em: 23 out 2018. Disponível em: <<http://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/en/c/1070557/>>.

FERREIRA, P.; MARTINHO, R.; DOMINGOS, D. Iot-aware business processes for logistics: limitations of current approaches. 05 2020.

FILGUEIRA, F. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. UFV, 2003. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=-6kAfAEACAAJ>>.

FLEXAS, J.; LORETO, F.; MEDRANO, H. Terrestrial photosynthesis in a changing environment a molecular, physiological and ecological approach. **Terrestrial Photosynthesis in a Changing Environment a Molecular, Physiological and Ecological Approach**, p. 1–728, 01 2011.

Freight Farms. **The Greenery - Smart Container Farm**. 2020. Acesso em: 10 mai 2020. Disponível em: <<https://www.freightfarms.com/greenery>>.

FUKUDA, N. et al. Directional blue light irradiation triggers epidermal cell elongation of abaxial side resulting in inhibition of leaf epinasty in geranium under red light condition. **Scientia Horticulturae**, v. 115, n. 2, p. 176–182, 2008. ISSN 0304-4238. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030442380700297X>>.

GARDENBOT. **A cheap Soil Moisture Sensor**. 2020. Acesso em: 01 mai 2020. Disponível em: <<https://gardenbot.org/howTo/soilMoisture/>>.

GOMEZ, C.; IZZO, L. Increasing efficiency of crop production with leds. **AIMS Agriculture and Food**, v. 3, p. 135–153, 06 2018.

GONZÁLEZ, F. H. D. **Fotossíntese**. 2019. Acesso em: 14 nov 2019. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/lacvet/restrito/pdf/fotossintese.pdf>>.

GUPTA, S. D.; AGARWAL, A. Artificial lighting system for plant growth and development: Chronological advancement, working principles, and comparative assessment. In: _____. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–25. ISBN 978-981-10-5806-6.

HIGGINS, C. Current status of commercial vertical farms with led lighting market in north america. In: _____. [S.l.: s.n.], 2016. p. 309–315. ISBN 978-981-10-1846-6.

HÖLLER, J. et al. **From Machine-to-Machine to the Internet of Things: Introduction to a New Age of Intelligence**. Oxford: Academic Press, 2014. ISBN 978-0-12-407684-6. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124076846000267>>.

Illumitex. **FarmVisionAI - Illumitex**. 2020. Acesso em: 10 mai 2020. Disponível em: <<https://illumitex.com/farmvisionai-2/>>.

JACOBS, I.; BEAN, C. **Fine Particles, Thin Films, and Exchange Anisotropy: (effects of Finite Dimensions and Interfaces on the Basic Properties of Ferromagnets)**. Research Information Section, The knolls, 1963. (General Electric. Research Laboratory. Technical Information Series). Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=YDY3nQEACAAJ>>.

JHURIA, M.; KUMAR, A.; BORSE, R. Image processing for smart farming: Detection of disease and fruit grading. In: . [S.l.: s.n.], 2013. p. 521–526. ISBN 978-1-4673-6099-9.

KALANTARI, F. et al. Opportunities and challenges in sustainability of vertical farming: A review. **Journal of Landscape Ecology**, v. 11, 01 2017.

KAMIENSKI, C.; VISOLI, M. C. Swamp: uma plataforma para irrigação de precisão baseada na internet das coisas. **Fonte**, Belo Horizonte, v. 15, 12 2018.

KANG, W. et al. Leaf photosynthetic rate, growth, and morphology of lettuce under different fractions of red, blue, and green light from light-emitting diodes (leds). **Horticulture, Environment, and Biotechnology**, v. 57, p. 573–579, 12 2016.

KEYSER, E. D. et al. Led light quality intensifies leaf pigmentation in ornamental pot plants. **Scientia Horticulturae**, v. 253, p. 270 – 275, 2019. ISSN 0304-4238. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423819302547>>.

KIM, H.-H. et al. Stomatal conductance of lettuce grown under or exposed to different light qualities. **Annals of botany**, v. 94, p. 691–7, 12 2004.

KITSINELIS, S. Light sources technologies and applications. **Lighting Research & Technology**, v. 43, n. 4, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1477153511406658>>.

KOERT, W. **De toekomst volgens PlantLab**. 2018. Acesso em: 23 out. 2018. Disponível em: <<https://www.willemkoert.nl/plaatjes/pdf/plantlab.pdf>>.

KONG, S.-W. et al. The contribution of different spectral sections to increase fresh weight of boston lettuce. **HortScience horts**, American Society for Horticultural Science, Washington, DC, v. 50, n. 7, p. 1006 – 1010, 2015. Disponível em: <<https://journals.ashs.org/hortsci/view/journals/hortsci/50/7/article-p1006.xml>>.

KRAUS, J. E. O que é fotossíntese?. In: **Programa de Educação Continuada. Aperfeiçoamento de professores – Professor da educação básica II**. [S.l.: s.n.], 2005. p. 28–39.

KRISNA, B. et al. Pengaruh pengayaan oksigen dan kalsium terhadap pertumbuhan akar dan hasil selada keriting (*lactuca sativa* L.) pada hidroponik rakit apung. **Vegetalika**, v. 6, p. 14, 11 2017.

LI, Y. et al. Towards a theoretical framework of strategic decision, supporting capability and information sharing under the context of internet of things. **Information Technology and Management**, v. 13, p. 205–216, 2012.

LOTZE-CAMPEN, H. et al. Global food demand, productivity growth, and the scarcity of land and water resources: A spatially explicit mathematical programming approach. **Agricultural Economics**, v. 39, p. 325 – 338, 11 2008.

MADAKAM, S.; RAMASWAMY, R.; TRIPATHI, S. Internet of things (iot): A literature review. **Journal of Computer and Communications**, v. 3, p. 164–173, 04 2015.

MANSANI, A. F.; SANTOS, L. R.; BERTEQUINI, A. B. T. Paredes verdes em edifícios. 2018. Disponível em: <[https://servicos.unitoledo.br/repositorio/bitstream/7574/2172/1/PAREDES VERDES EM EDIFÍCIOS.pdf](https://servicos.unitoledo.br/repositorio/bitstream/7574/2172/1/PAREDES_VERDES_EM_EDIFÍCIOS.pdf)>.

MARGULIS, L.; SCHWARTZ, K. V. **Cinco reinos: um guia ilustrado dos filós da vida na terra**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 2001. 49 p.

MAUCIERI, C. et al. Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. **Italian Journal of Agronomy**, v. 13, 03 2018.

MCCREE, K. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. **Agricultural Meteorology**, v. 9, p. 191 – 216, 1971. ISSN 0002-1571. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0002157171900227>>.

MICKENS, M. et al. Growth of red pak choi under red and blue, supplemented white, and artificial sunlight provided by leds. **Scientia Horticulturae**, v. 245, p. 200–209, 12 2018.

MIRAZ, D. et al. A review on internet of things (iot), internet of everything (ioe) and internet of nano things (iont). In: . [S.l.: s.n.], 2015. p. 219–224.

MUANGPRATHUB, J. et al. Iot and agriculture data analysis for smart farm. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 156, p. 467 – 474, 2019. ISSN 0168-1699. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169918308913>>.

NAWANDAR, N. K.; SATPUTE, V. R. Iot based low cost and intelligent module for smart irrigation system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 162, p. 979 – 990, 2019. ISSN 0168-1699. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169918318076>>.

NELSON, J.; BUGBEE, B. Economic analysis of greenhouse lighting: Light emitting diodes vs. high intensity discharge fixtures. **PloS one**, v. 9, p. e99010, 06 2014.

PATIL, D.; JADHAV, M. Smart agriculture monitoring system using iot. **IJARCCCE**, v. 8, p. 116–120, 04 2019.

PENNISI, S. V. Growing indoor plants with success. In: . [S.l.: s.n.], 2009.

PEREIRA, O. et al. Produção de alface em função de água e de nitrogênio. **Acta Scientiarum-agronomy - ACTA SCI-AGRON**, v. 25, 04 2003.

PEREZ, V. M. Study of the sustainability issue of food production using vertical farm methods in an urban environment within the state of indiana. 2014. Disponível em: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1242&context=open_access_theses>.

PHILIPS. **How to build a successful vertical farm**. 2020. Acesso em: 06 mai 2020. Disponível em: <<https://www.lighting.philips.com/main/products/horticulture/hortiblog/vertical-farming/how-to-build-a-successful-vertical-farm>>.

Pink Farms. **Pink Farms**. 2020. Acesso em: 10 mai 2020. Disponível em: <<https://www.pinkfarms.com.br/>>.

PLANTEI. **Tudo o que você precisa saber sobre cultivo indoor**. 2017. Acesso em: 07 dez 2019. Disponível em: <<https://blog.plantei.com.br/cultivo-indoor/>>.

POORTER, H. et al. The art of growing plants for experimental purposes: A practical guide for the plant biologist. **Functional Plant Biology**, v. 39, p. 821–838, 01 2012.

RABARA, R. et al. Effect of spectral quality of monochromatic led lights on the growth of artichoke seedlings. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 01 2017.

RASPBERRY. **What is a Raspberry Pi?** 2020. Acesso em: 01 mai 2020. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/help/what-is-a-raspberry-pi/>>.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. **Biologia Vegetal**. 7a. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2013.

SALA, F. C.; COSTA, C. P. d. Retrospectiva e tendência da alfacicultura brasileira. **Horticultura Brasileira**, scielo, v. 30, p. 187 – 194, 06 2012. ISSN 0102-0536. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-05362012000200002&nrm=iso>.

SANTOS, O. S. **Hidroponia**. Santa Maria: UFSM / Colégio Politécnico, 2009. 392 p.

SEIBERT, R. et al. Estudo de viabilidade econômico–financeira para implantação de uma estufa hidropônica em uma propriedade rural no interior de santo Ângelo -rs. **Revista Técnica do Conselho Regional de Contabilidade do RS**, p. 06, 04 2014.

SGANZELA, E. **Nova agricultura, a fascinante arte de cultivar com os plásticos**. Porta Alegre: Plasticultura Gaúcha, 1977.

SHROUF, A. Hydroponics, aeroponic and aquaponic as compared with conventional farming. 01 2017.

SIEFERMANN-HARMS, D. Carotenoids in photosynthesis. i. location in photosynthetic membranes and light-harvesting function. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Reviews on Bioenergetics**, v. 811, n. 4, p. 325 – 355, 1985. ISSN 0304-4173. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304417385900060>>.

SILÍCIO, V. de. **Sensor de Gás MQ-135 e a família MQ de detectores de Gás**. 2020. Acesso em: 01 mai 2020. Disponível em: <<https://portal.vidadesilicio.com.br/sensor-de-gas-mq-135/>>.

SNOWDEN, M.; COPE, K.; BUGBEE, B. Sensitivity of seven diverse species to blue and green light: Interactions with photon flux. **PLOS ONE**, v. 11, 10 2016.

Southern Nurserymen's Association. **Best Management Practices: Guide for Producing Container-grown Plants**. Southern Nursery Association, 2000. (Best Management Practices: Guide for Producing Container-grown Plants). Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=iZi4bwAACA AJ>>.

SPINOFF, N. A. S. A. Progressive plant growing has business blooming. NASA, p. 68–72, 2006. Disponível em: <https://www.nasa.gov/pdf/164449main_spinoff_06.pdf>.

SPREAD. **Spread: Company**. 2007. Acesso em: 23 out 2018. Disponível em: <<http://spread.co.jp/en/company/>>.

STAFF, H. **Hidroponia**. 2. ed. Cuiabá, MT: SEBRAE-MT, 1998. 101 p.

STREIT, N. M.; CANTERLE, M. W. d. C. L. P.; HECKTHEUER, L. H. H. As clorofilas. **Ciência Rural**, sciELO, v. 35, p. 748 – 755, 06 2005. ISSN 0103-8478. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782005000300043&nrm=iso>.

SUMA, N.; SISUPALAN SAMSON; SARANYA, S.; SUBHASHRI, G. G. S. R. Iot based smart agriculture monitoring system. **International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication**, v. 5, 2017.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 6. ed. [S.l.]: artmed, 2006. 143 p.

TEXEIRA, N. T. **Hidroponia: Uma Alternativa Para Pequenas Áreas**. [S.l.]: Guaíba: Agropecuária, 1996. 86 p.

TIBBITTS, T.; BOTTENBERG, G. Growth of lettuce (*lactuca sativa*) under controlled humidity levels. **Journal American Society of Horticultural Science**, v. 101, p. 70–73, 01 1976.

TIBIRIÇA, A. C. G.; BRITO, A. A. A. d.; BAÊTA, F. C. Produção de alface no verão: estufas como ambiente de cultivo. 2004. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2004_enegep0103_1578.pdf>.

Vrugt, J. W.; Verwimp, J. K. P. High pressure mercury vapour lamps. **IEE Proceedings A - Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education - Reviews**, v. 127, n. 3, p. 173–180, April 1980. ISSN 0143-702X.

WENT, F. W. F. W. **The experimental control of plant growth. With special reference to the Earhart Plant Research Laboratory at the California Institute of Technology**. Waltham, Mass., Chronica Botanica Co.: [s.n.], 1957. (Chronica botanica, v. 17).

XU, L.; HE, W.; LI, S. Internet of things in industries: A survey. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 10, p. 2233–2243, 11 2014.

ZEIDLER, C.; SCHUBERT, D.; VRAKKING, V. Vertical farm 2.0: Designing an economically feasible vertical farm - a combined european endeavor for sustainable urban agriculture. 01 2017.

ZHANG, H.; ASUTOSH, A.; HU, W. Implementing vertical farming at university scale to promote sustainable communities: A feasibility analysis. **Sustainability**, v. 10, p. 4429, 11 2018.

ZHU, D.; HUMPHREYS, C. J. Solid-state lighting based on light emitting diode technology. In: _____. **Optics in Our Time**. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 87–118. ISBN 978-3-319-31903-2. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-31903-2_5>.