



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE
DEPARTAMENTO DE ENERGIA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA

Jonathan Possenti Damasceno

Desenvolvimento de Sistema de Iluminação Artificial para Suplementação de Luz
Visível em Casas de Vegetação Inteligentes Suplementadas por Sistemas
Agrovoltaicos

Araranguá

2024

Jonathan Possenti Damasceno

Desenvolvimento de Sistema de Iluminação Artificial para Suplementação de Luz
Visível em Casas de Vegetação Inteligentes Suplementadas por Sistemas
Agrovoltaicos

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Energia do Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli

Araranguá

2024

Possenti Damasceno, Jonathan

Desenvolvimento de sistema de iluminação artificial para suplementação de luz visível em casas de vegetação inteligentes suplementadas por sistemas agrovoltaicos: Análise documental /Jonathan Possenti Damasceno ; orientador, Giuliano Arns Rampinelli, 2024.

92 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Graduação em Engenharia de Energia, Araranguá, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Energia. 2. Casa de Vegetação Inteligente. 3. Sistema de Iluminação Artificial. I. Arns Rampinelli, Giuliano . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Energia. III. Título.

Jonathan Possenti Damasceno

Desenvolvimento de Sistema de Iluminação Artificial para Suplementação de Luz
Visível em Casas de Vegetação Inteligentes Suplementadas por Sistemas
Agrovoltáticos

O presente Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia de Energia,
foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes
membros:

Giuliano Arns Rampinelli (Orientador), Prof. Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Leonardo Elizeire Bremermann, Prof. Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

André Possamai Rosso, Prof. Dr.
SENAI

Araranguá, 06 de dezembro de 2024.

Certificamos que essa é a versão original e final do trabalho que foi julgado
adequado para obtenção do título de Engenheiro de Energia.

Prof^a. Carla De Abreu D'aquino Dr^a
Coordenadora do Curso

Prof. Giuliano Arns Rampinelli, Dr.
Orientador

Jonathan Possenti Damasceno
Autor

Araranguá, 06 de dezembro de 2024.

Não desanimeis nunca embora venham ventos contrários.

Madre Paulina

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, a minha família e a todos que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, especialmente às organizações e instituições da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC Araranguá), representadas pelo LabTel (Laboratório de Telecomunicações), LPA (Laboratório de Pesquisa Aplicada), e laboratórios NTEEL (Núcleo Tecnológico de Energia Elétrica); o Instituto Federal Catarinense (IFC Santa Rosa do Sul); Foz do Chapecó Energia SA; CSC Energia; Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL); e Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária (FAPEU), todos membros do projeto de pesquisa (P&D – ANEEL) intitulado “Desenvolvimento de estufas inteligentes e eficientes energeticamente para cultivo de plantas de alto valor agregado aplicado a comunidades lindeiras ou assentadas de usinas hidrelétricas .”

RESUMO

O desenvolvimento de sistemas de iluminação artificial para suplementação de luz visível em casas de vegetação é uma tendência na agricultura de precisão. De maneira similar, os sistemas fotovoltaicos, que apresentam confiabilidade, maturidade tecnológica e competitividade econômica, são aplicados em casas de vegetação para compensação de energia elétrica. Este trabalho apresenta uma análise documental de um projeto de pesquisa que desenvolveu duas casas de vegetação inteligentes para cultivo protegido de mudas de banana e orquídea. As casas de vegetação apresentam sistemas de controle e automação, arquitetura e estratégias bioclimáticas e sistemas de energia (sistema de iluminação artificial, sistema de aquecimento artificial, sistema de resfriamento evaporativo e sistema fotovoltaico). Uma rede de sensores monitora variáveis ambientais internas e uma estação meteorológica automática monitora variáveis ambientais externas. Um sistema computacional baseado em inteligência artificial é responsável pelo controle autônomo das casas de vegetação. Neste trabalho apresenta-se a descrição do desenvolvimento de um sistema de iluminação artificial para suplementação de luz visível em casas de vegetação inteligentes. O sistema de iluminação artificial foi definido a partir de modelagem e simulação em uma ferramenta computacional. O sistema proposto foi instalado em duas casas de vegetação inteligentes localizadas em Alpestre/RS e Santa Rosa do Sul/SC, no Sul do Brasil. A análise incluiu métodos de estimativa de consumo energético e medições experimentais de iluminância, realizadas conforme normas técnicas da ABNT (NBR15215-4). Além disso, avaliou-se o desempenho energético do sistema agroltaico e seu impacto na eficiência das casas de vegetação. Os resultados destacam a eficácia do sistema em atender às demandas fotossintéticas das plantas, reduzindo o consumo de energia elétrica por meio da integração com iluminação natural. As análises qualitativas mostraram que as mudas aclimatadas sob as condições controladas apresentaram maior crescimento e desenvolvimento em comparação aos métodos convencionais. Este estudo contribui para o avanço da agricultura de precisão e cultivo protegido, promovendo práticas sustentáveis e eficientes.

Palavras-chave: Casa de Vegetação Inteligente. Sistema Agroltaico. Sistema de Iluminação Artificial

ABSTRACT

The development of artificial lighting systems for providing or supplementing visible light in greenhouses is a growing trend in precision agriculture. Similarly, photovoltaic systems, which offer reliability, technological maturity, economic competitiveness, and sustainability, are applied in greenhouses to offset electricity consumption. This study presents a documental analysis of a research project that developed two intelligent greenhouses for the protected cultivation of banana and orchid seedlings. The greenhouses feature control and automation systems, bioclimatic strategies, and energy systems, including artificial lighting, artificial heating, evaporative cooling, and photovoltaic systems. An internal network of sensors monitors environmental variables, while an automatic weather station tracks external environmental conditions. A computer system based on artificial intelligence autonomously manages the greenhouse operations. This work describes the development of an artificial lighting system for visible light supplementation in intelligent greenhouses. The lighting system was designed through modeling and simulation in a computational tool and was implemented in two greenhouses located in Alpestre/RS and Santa Rosa do Sul/SC, in southern Brazil. The analysis included energy consumption estimation methods and experimental illuminance measurements conducted in accordance with Brazilian technical standards (ABNT NBR15215-4). Additionally, the study evaluated the energy performance of the agrovoltaic system and its impact on the efficiency of the greenhouses. The results highlight the system's effectiveness in meeting the photosynthetic demands of the plants while reducing electricity consumption through integration with natural lighting. Qualitative analyses demonstrated that seedlings acclimated under controlled conditions showed superior growth and development compared to conventional methods. This study contributes to advancing precision agriculture and protected cultivation, promoting sustainable and efficient practices.

Keywords: Intelligent Greenhouse. Agrovoltaic System. Artificial Lighting System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista em perspectiva da casa de vegetação inteligente.....	22
Figura 2 - Tipos de geometria de estufas.....	24
Figura 3 - Modelagem da casa de vegetação e trajetória solar.....	26
Figura 4– Correlação linear entre a luminosidade e a radiação solar.....	30
Figura 5 – Correlação linear entre a luminosidade e a irradiação solar.....	31
Figura 6 – Correlação polinomial de grau 2 entre a luminosidade e a radiação solar...	31
Figura 7 – Declinação solar.....	32
Figura 8 – Equação do tempo.....	33
Figura 9 – Ângulo de nascimento do Sol.....	33
Figura 10 – Correlações Sol-Terra.....	34
Figura 11 – Número de horas de operação do sistema.....	34
Figura 12 - Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica de Santa Rosa do Sul/SC.	37
Figura 13 - Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica de Alpestre/RS.....	37
Figura 14 – Distribuição de luminárias e distâncias de cada ponto com seu devido valor de luminosidade (lux).....	39
Figura 15 - Modelagem da casa de vegetação no software DIALux	43
Figura 16 - Resultados 4 linhas e 3 colunas de luminárias com 100 W cada.....	44
Figura 17 - Resultados 4 linhas e 4 colunas de luminárias com 100 W cada	45
Figura 18 - Resultados 5 linhas e 3 colunas de luminárias com 100 W cada	45
Figura 19 - Resultados 4 linhas e 3 colunas de luminárias com 150 W cada	46
Figura 20 - Resultados 4 linhas e 4 colunas de luminárias com 150 W cada	46
Figura 21 - Resultados 5 linhas e 3 colunas de luminárias com 150 W cada	47
Figura 22 - Resultados 4 linhas e 3 colunas de luminárias com 200 W cada	47
Figura 23 - Resultados 4 linhas e 4 colunas de luminárias com 200 W cada	48
Figura 24 - Resultados 5 linhas e 3 colunas de luminárias com 200 W cada	48
Figura 25 - Resultados 7 linhas e 4 colunas de luminárias com 200 W cada	49
Figura 26 - Resultados 5 linhas e 4 colunas de luminárias com 200 W cada	49
Figura 27 - Resultados 4 linhas e 4 colunas de luminárias com 200 W cada	50
Figura 28 - Simulação do cenário mais próximo ao cenário real	51
Figura 29 - Esquema elétrico do sistema de iluminação	51
Figura 30 – Sistema de iluminação artificial (sistema desligado).....	53
Figura 31 – Sistema de iluminação artificial (sistema ligado).....	53

Figura 32 – Sistema de iluminação artificial (vista externa).....	54
Figura 33 – Mapa da distribuição de intensidade luminosa da casa de vegetação usando o método Minimum Curvature com os pontos de medição demarcados.....	55
Figura 34 – Método de interpolação Radial Base Function.....	55
Figura 35 – Método de Interpolação Inverse distance to a power.....	56
Figura 36 – Relação entre o período de acionamento do sistema de iluminação artificial e o fotoperíodo em Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS.....	57
Figura 37 – Perfil de consumo de energia elétrica do sistema de iluminação artificial em Santa Rosa do Sul/SC.....	59
Figura 38 – Perfil de consumo de energia elétrica do sistema de iluminação artificial em Alpestre/RS.....	59
Figura 39 - Temperatura média, mínima e máxima em cada semana da SGH e CGH.....	62
Figura 40 - Umidade relativa média, mínima e máxima por semana na SGH e CGH.....	62
Figura 41 - Média do número de folhas avaliadas a cada 15 dias nas mudas de bananeira cv Nanicão Corupá aclimatadas na SGH e CGH.....	64
Figura 42 - Média do número do diâmetro do pseudocaule (mm) avaliado a cada 15 dias nas mudas de bananeira cv Nanicão Corupá aclimatadas na SGH e CGH.....	65
Figura 43 - Média da altura do pseudocaule (mm) avaliada a cada 15 dias nas mudas de bananeira cv Nanicão Corupá aclimatadas na SGH e CGH.....	65
Figura 44 - Médias da altura do caule (mm) das orquídeas Phalaenopsis aclimatadas na SGH e CGH.....	71
Figura 45 - Diâmetro do caule das mudas de orquídeas Phalaenopsis aclimatadas na SGH e CGH.....	72
Figura 46 - Média do número de folhas das mudas de orquídeas Phalaenopsis aclimatadas na SGH e CGH.....	73
Figura 47 - Comparação visual das mudas de orquídeas nos dois tratamentos.....	74
Figura 48 - Florescimento das primeiras mudas aclimatadas na Smart Greenhouse em Santa Rosa do Sul.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados técnicos dos sistemas fotovoltaicos.....	36
Tabela 2 – Características técnicas das luminárias do sistema de iluminação artificial.....	52
Tabela 3 – Perfil do consumo anual de energia elétrica do sistema de iluminação artificial – método 1.....	57
Tabela 4 – Perfil do consumo anual de energia elétrica do sistema de iluminação artificial – método 2.....	58
Tabela 5 – Estimativa e geração real de energia elétrica dos sistemas fotovoltaicos de Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS.....	60
Tabela 6 - Médias do diâmetro do pseudocaule (mm), altura do pseudocaule (mm), número de folhas e área foliar (cm ²), nas mudas de bananeira cv Nanicão Corupá aclimatadas na SGH e CGH.....	61
Tabela 7 - Médias de massa seca e fresca de parte aérea (g), massa seca de raiz (g) e teor de água nas plantas (%), nas mudas de bananeira cv Nanicão Corupá aclimatadas na SGH e CGH.....	66
Tabela 8 - Médias do conteúdo de Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg), expressos em gramas do nutriente na matéria seca total da amostra nas mudas de bananeira cv Nanicão Corupá aclimatadas na SGH e CGH.....	67
Tabela 9 – Médias do conteúdo de açúcares redutores (g), açúcares não redutores (g) e açúcares totais (g) nas mudas de bananeira cv Nanicão Corupá aclimatadas na SGH e CGH.....	68
Tabela 10 - Médias dos índices falker de clorofila a, clorofila b e clorofila total nas mudas de bananeira cv Nanicão Corupá aclimatadas na SGH e CGH.....	69
Tabela 11 - Médias dos teores de clorofila a (ug.cm ⁻²), clorofila b (ug.cm ⁻²) e clorofila total (ug.cm ⁻²) e carotenóides (ug.cm ⁻²), extraídos em acetona nas mudas de bananeira cv Nanicão Corupá aclimatadas na SGH e CGH.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC Corrente Alternada (Alternating Current)

AF Área Foliar

ANR Açúcares Não Redutores

AR Açúcares Redutores

AT Açúcares Totais

AT Altura Total de Planta

CGH Casa de Vegetação Convencional

CLT Clorofila Total

CLa Clorofila a

CLb Clorofila b

CTP Comprimento Total do Pseudocaule

CV Coeficiente de Variação

DC Corrente Contínua (Direct Current)

DC Diâmetro do Caule

DMS Diferença Mínima Significativa

DPC Diâmetro do Pseudocaule

INMET Instituto Nacional de Meteorologia

IP65 Índice de Proteção 65 (Proteção contra poeira e jatos de água)

IP67 Índice de Proteção 67 (Proteção contra poeira e imersão temporária em água)

IR Infravermelho (Infrared)

LED Diodo Emissor de Luz (Light Emitting Diode)

LEDs Diodos Emissores de Luz (Light Emitting Diodes)

MFA Massa Fresca da Parte Aérea

MSA Massa Seca da Parte Aérea

MSR Massa Seca das Raízes

MPPTs Seguidores do Ponto de Máxima Potência (Maximum Power Point Trackers)

Nº Número

NBR Norma Brasileira

NF Número de Folhas

NREL Laboratório Nacional de Energias Renováveis (National Renewable Energy Laboratory)

P&D Pesquisa e Desenvolvimento

PAR Radiação Fotossinteticamente Ativa (Photosynthetically Active Radiation)

PR Razão de Desempenho (Performance Ratio)

RFA Radiação Fotossinteticamente Ativa

RGB Vermelho, Verde e Azul (Red, Green, Blue)

RS Rio Grande do Sul

SAM Sistema de Modelagem de Energia (System Advisor Model)

SC Santa Catarina

SGH Casa de Vegetação Inteligente (Smart Greenhouse)

TMY Ano Meteorológico Típico (Typical Meteorological Year)

YF Fator de Rendimento (Yield Factor)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
2.	OBJETIVOS.....	17
2.1.	OBJETIVOS GERAIS.....	17
2.2.	OBJETIVOS ESPECIFICOS	18
3.	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	18
3.1.	ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL	18
3.2.	ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS	19
3.3.	ILUMINAÇÃO NATURAL.....	20
3.4.	CONSUMO DE ENERGIA	20
4.	DESENVOLVIMENTO	21
4.1.	ARQUITETURA E ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS	21
4.1.1.	Iluminação natural	23
4.1.2.	Sistema de iluminação artificial.....	26
4.2.	MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL 28	
4.3.	MODELAGEM E PERFIL DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	29
4.4.	SISTEMA FOTOVOLTAICO	35
4.5.	VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL	38
4.6.	ANÁLISE QUALITATIVA DAS MUDAS.	40
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1.	SISTEMA DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL.....	42
5.2.	PERFIL DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA	56
5.3.	SISTEMA FOTOVOLTAICO	60
5.4.	ANÁLISE QUALITATIVA DAS MUDAS	61
5.4.1.	Bananeiras.....	61
5.4.2.	Orquídeas	70
6.	CONCLUSÃO	76
	REFERÊNCIAS	78

1. INTRODUÇÃO

A iluminação natural é um dos fatores mais importantes para a fotossíntese e o desenvolvimento das plantas. A baixa densidade ou excesso desta variável afeta diretamente o crescimento, sendo que a quantidade ótima varia para cada espécie, porém esta dependência é menor em plantas desenvolvidas em condições de sombreamento e cultivo protegido (SILVA, 2018). Segundo Teixeira *et al*, (2022) a iluminação artificial aplicada na agricultura de precisão visa fornecer ou suplementar a radiação fotossinteticamente ativa a fim de otimizar a produção de cultivares, com o intuito de obtenção de um nível de produtividade máxima, boa qualidade do produto e a capacidade de produção independente de sazonalidades (JENSEN, 2002).

As lâmpadas de tecnologia LED têm importância decisiva na criação de um ambiente favorável para as mudas e plantas, devido a capacidade destas em sintetizar luz em comprimentos de onda específicos aliada a uma alta eficiência luminosa. Os comprimentos de onda de maior importância para o crescimento e desenvolvimento de plantas estão na faixa espectral de 650nm (vermelho) e 450nm (azul). Essa faixa de espectro não é possível em outras tecnologias de lâmpadas, por isso a utilização de lâmpadas de tecnologia LED é uma tendência.

A produção de mudas e plantas em ambiente controlado não é um conceito novo, estando presente na sociedade desde a Idade Antiga (KERSLAKE E SHUANG, 2016). Neste contexto, alguns estudos que envolvem a variável de iluminação artificial são desenvolvidos, porém como pequenas hortas em ambiente externo com a suplementação com luz artificial. O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito de um projeto de pesquisa que desenvolveu casas de vegetação inteligentes. Estas são definidas como estruturas destinadas a controlar os parâmetros mais importantes que afetam o crescimento da cultura, como a radiação solar, temperatura, umidade relativa, intensidade luminosa e nível de dióxido de carbono. Este controle de variáveis visa aumentar o rendimento e a produtividade das culturas em todas as estações do ano (ACHOUR; OUAMMI; ZEJLI, 2021).

Desta forma, casas de vegetação, normalmente, contam com estratégias passivas e ativas de controle de iluminação. Estratégias passivas contemplam forma e materiais da envoltória da casa de vegetação, sendo que sua orientação espacial também contribui para o aproveitamento de iluminação natural. Os materiais de cobertura de casas de vegetação devem ter alta transmitância à radiação solar global,

especialmente dentro da faixa de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) e devem ser opacos à radiação infravermelha de onda longa (IR). Um bom material de cobertura também deve ter bom isolamento térmico e propriedades anti-condensação (AHAMED; GUO; TANINO, 2019).

As estratégias de iluminação ativa contemplam a utilização de luminárias LED, especialmente. A luminária de tecnologia LED de três cores (RGB) é comumente utilizada em casas de vegetação, pois afetam positivamente o crescimento das mudas e plantas e têm uma vida útil notavelmente longa. Em comparação com as luminárias de vapor de sódio, as luminárias LEDs podem fornecer economia de energia elétrica relacionada à iluminação de até 75% ao ano (CUCE; HARJUNOWIBOWO, 2016). Em relação aos efeitos no desenvolvimento das mudas e plantas, Fanwoua *et al*, (2019) investigaram o efeito da iluminação com luminárias LEDs no desenvolvimento e na qualidade de uma horticultura de tomates. Os resultados apontaram que a partir do uso de LED vermelho-azul houve um aumento na massa fresca da fruta e sem gerar quaisquer alterações na qualidade da fruta. Além da economia de energia elétrica, estudos referentes às luminárias LED de espectro controlado demonstraram que o crescimento e o desenvolvimento da planta e o valor da produção da cultura são diretamente afetados pela iluminação. Esta particularidade de luminária é considerada capaz de fornecer luz em cada uma das faixas de espectro verde, vermelho e azul, em que cada ponto de interesse pode ter um ponto de ajuste desejado diferente com base nos requisitos da muda ou planta (MOHAGHEGHI; MOALLEM, 2021).

Outro parâmetro importante para estas luminárias LED com espectro vermelho e azul seria o controle da proporção da cor de luz, de acordo com valores padrão e distância de instalação da fonte de luz. O estudo realizado por Parnklang *et al*. (2021), em que as luminárias LED foram instaladas a 1,5 m da superfície de plantas cannabis medicinal, verificou que a utilização de suplementação de luz aumentou a taxa de crescimento em 12% em relação ao cultivo tradicional.

Este trabalho apresenta uma análise documental de um projeto de pesquisa que desenvolveu duas casas de vegetação inteligentes para cultivo protegido de mudas de banana e de orquídea. As casas de vegetação apresentam sistemas de controle e automação, arquitetura e estratégias bioclimáticas e sistemas de energia (sistema de iluminação artificial, sistema de aquecimento artificial, sistema de resfriamento evaporativo e sistema fotovoltaico). Uma rede de sensores monitora variáveis ambientais internas e uma estação meteorológica automática monitora

variáveis ambientais externas. Um sistema computacional baseado em inteligência artificial é responsável pelo controle autônomo das casas de vegetação, acionando ou desligando atuadores.

Apresenta-se então o desenvolvimento de um sistema de iluminação artificial para suplementação de luz visível em casas de vegetação inteligentes. O sistema de iluminação artificial foi definido a partir de modelagem e simulação em uma ferramenta computacional. O sistema proposto foi instalado em duas casas de vegetação inteligentes localizadas em Alpestre/RS e Santa Rosa do Sul/SC, Sul do Brasil. O trabalho também apresenta o desenvolvimento de métodos de estimativa de consumo de energia elétrica baseado em premissas e perfis operacionais do sistema, a medição experimental do sistema de iluminação artificial que foi realizada de acordo com o procedimento descrito na NBR15215-4, esta norma prescreve métodos para verificação experimental das condições de luminância de ambientes internos. Também é apresentado o desempenho energético do sistema agrovoltáico aplicado às casas de vegetação inteligentes, além de trazer os resultados nas culturas de banana e orquídea.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

Descrever o desenvolvimento e a avaliação de um sistema de iluminação artificial para suplementação de luz visível, assim como descrever a análise do consumo e a geração de energia elétrica a partir de um sistema agrovoltáico, em casas de vegetação inteligente e energeticamente eficientes, além de descrever os impactos da suplementação de luz na produção de cultivo controlado de banana e orquídea a partir de análise documental.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Interligado com o objetivo geral anterior, a seguir é exposto os objetivos específicos:

- a) Avaliar as estratégias bioclimáticas existentes à serem implementadas nas casas de vegetação.
- b) Desenvolver o sistema de iluminação artificial, realizando simulações para diferentes arranjos, alturas e potencias diferentes, a fim de encontrar o melhor arranjo para ser implementado.
- c) Desenvolver estimativas e medições de consumo de energia elétrica do sistema de iluminação artificial.
- d) Desenvolver estimativa e medição no período de um ano dos sistemas fotovoltaicos, instalados, a fim de validar os índices de desempenho dos sistemas.
- e) Desenvolver e demonstrar medições experimentais do sistema de iluminação artificial implementado, e comparar com o sistema simulado em software afim de validar o sistema de iluminação artificial.
- f) Avaliar o impacto no desenvolvimento das mudas de banana e orquídea comparando mudas aclimatadas entre SGH e CGH.

3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Esta revisão bibliográfica é desenvolvida a partir de documentos e relatórios produzidos durante as fases do projeto denominado *Smart and eficiente Green House*, em que foi produzido relatórios mensais a fim de documentar os resultados de pesquisa, análise e desenvolvimento das casas de vegetação.

3.1. ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL

Segundo Monteiro Neto *et al.* (2016), a radiação fotossinteticamente ativa (RFA), é uma fração da radiação global localizada na faixa de comprimento de onda de 400 e 700 nm, similar ao espectro visível, a qual possui ligação direta com atividades fotoquímicas nas plantas. A utilização de luminarias LED em ambientes de cultivo tem se mostrado uma tecnologia promissora devido à sua eficiência energética

e capacidade de oferecer espectros de luz específicos para diferentes estágios de desenvolvimento das plantas.

Segundo Andrade *et al.* (2023) em mudas de *Eucalyptus benthamii*, a luz vermelha proporcionou melhor crescimento morfológico, enquanto a luz azul resultou em uma resposta mais eficiente ao estresse hídrico, retardando a redução da taxa fotossintética e outras variáveis, reforçando a importância da escolha do espectro adequado para cada condição de cultivo. Esse ajuste espectral permite atender às demandas fotossintéticas das plantas sem comprometer seu desenvolvimento, tornando o LED uma solução assertiva e adaptável às necessidades das culturas em ambientes controlados.

Pesquisas com tecnologias de iluminação em estufas e casas de vegetação demonstram que a suplementação com LED influencia diretamente a qualidade e produtividade dos cultivos. A suplementação luminosa com lâmpadas LED em estufas demonstrou melhora da taxa fotossintética das plantas que apresentaram uma maior área foliar em relação às plantas que cresceram em condições de luz natural a também promoveu a quebra de dormência das plantas e melhorou a qualidade da produção (PALHA, 2020).

Portanto, destacasse a relevância do LED como iluminação suplementar para o controle do fotoperíodo e das condições ideais para o cultivo em ambientes fechados. A implementação tecnologia de suplementação de RFA como sistemas de iluminação natural e artificial complementares pode potencializar o desenvolvimento das plantas e contribuir para um sistema de produção de mais qualidade, sustentável e eficiente em casas de vegetação. (MELLO, 2020)

3.2. ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS

A arquitetura bioclimática é uma abordagem que visa integrar fatores ambientais e climáticos no design de edificações para promover conforto térmico, eficiência energética, portanto o formato e geometria da estufa influenciam a quantidade de radiação solar recebida pela estufa, bem como a quantidade de transferência de calor para o exterior (AHAMED; GUO; TANINO, 2019).

Outro aspecto importante na arquitetura bioclimática aplicada a estufas é a orientação geográfica. A disponibilidade total de radiação solar e a demanda de energia de uma estufa dependem de sua, estrutura e orientação, o uso de estruturas

orientadas no sentido leste-oeste maximiza a captação de luz durante todo o dia, enquanto formas com inclinações específicas do telhado ajudam a evitar o superaquecimento em estufas no Irã. (MOBTAKER *et al.*, 2016). Para o clima subtropical, por exemplo, clima do sul do Brasil, as principais estratégias são: aquecimento solar passivo no inverno, baixa massa térmica, redução dos ganhos solares diretos por meio da orientação e sombreamento do edifício, aumento do movimento do ar, circulação e ventilação natural e proteção contra chuva/precipitação (BODACH; LANG; HAMHABER, 2014).

3.3. ILUMINAÇÃO NATURAL

Diversas pesquisas foram realizadas testando diferentes gradientes e combinações destes fatores em casas de vegetação. Em um experimento relativamente simples e realizado a mais de uma década, a luminosidade ou intensidade luminosa foi estudada por Pereira *et al.* (2005). Utilizaram o túnel baixo e sombrites para compor a redução da luminosidade através do sombreamento para avaliar a influência no crescimento de mudas de bananeira 'Prata'.

O fator horas de luz, fotoperíodo, foi estudado por Chen e Lin (2012) que identificaram uma maior atividade fotossintética de *Phalaenopsis* em dias longos com alta intensidade luminosa que em dias mais curtos. Destaca-se que a noite é importante para espécies desse gênero pois é quando ocorre a absorção de CO₂, estando evidente a interação entre fotoperíodo e luminosidade.

Ainda estudando a luz, especificamente a sua qualidade, Massaro *et al.* (2018) testaram diferentes comprimentos de onda em mudas de duas cultivares de uma espécie do gênero *Phalaenopsis*. Encontraram que a influência da qualidade da luz é específica, ou seja, dependente da cultivar analisada.

3.4. CONSUMO DE ENERGIA

A iluminação artificial e os sistemas de controle de temperatura representam uma parte significativa do consumo de energia em estufas e casas de vegetação. O uso de estratégias bioclimáticas e a integração de iluminação natural ajudam a reduzir esse consumo, permitindo que a iluminação artificial seja utilizada apenas quando necessário. Além disso, o uso dessa técnica vem sendo mais explorada devido,

principalmente, à eficiência característica das lâmpadas de LED, uma vez que elas podem promover uma economia de até 75% de energia quando comparadas às lâmpadas comuns (CUCE; HARJUNOWIBOWO, 2016)

Em ambientes de casa de vegetação, o uso de tecnologias sustentáveis e o monitoramento contínuo do consumo de energia elétrica possibilitam identificar oportunidades de economia, como a implementação de sistemas agrovoltáticos é aplicada para suplementar energeticamente sistemas de aquecimento e iluminação das casas de vegetação (CUCE; HARJUNOWIBOWO, 2016).

Esses trabalhos dão base para uma abordagem entre iluminação natural, estratégias bioclimáticas e gestão do consumo de energia para criar um ambiente de aclimação eficiente em casas de vegetação, que serão abordados neste trabalho.

4. DESENVOLVIMENTO

No desenvolvimento são descritos os elementos e conceitos de arquitetura e estratégias bioclimáticas das casas de vegetação inteligentes, o sistema de iluminação artificial proposto, a modelagem e simulação em software, os modelos de estimativa de consumo de energia elétrica, as medições de luminosidade conforme NBR15215-4, e o método para mensurar os impactos da suplementação de luz nas culturas. Estas análises foram desenvolvidas a partir dos relatórios de etapa do projeto SmartGreenHouse.

4.1. ARQUITETURA E ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS

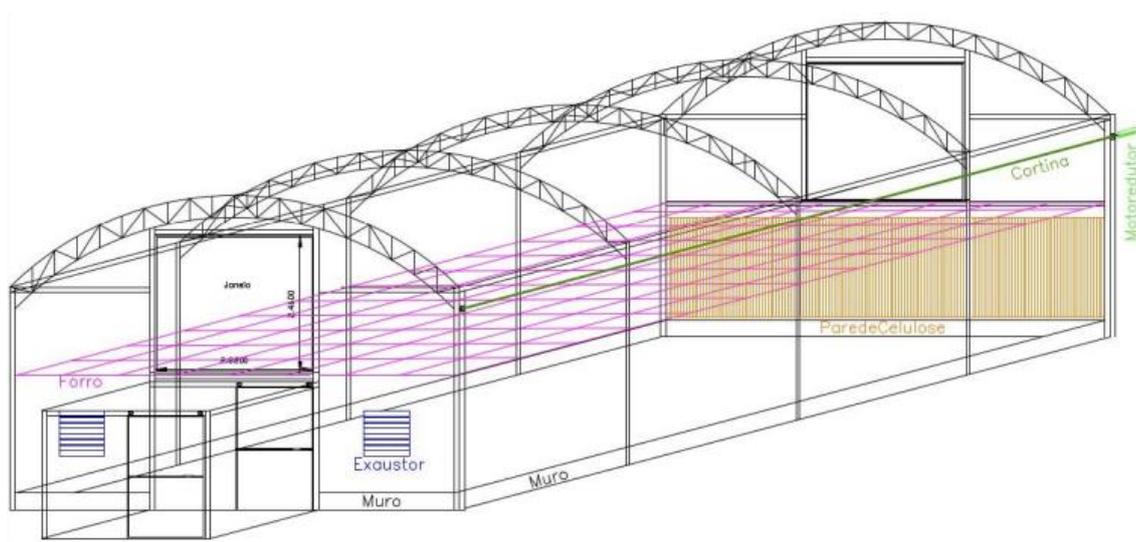
A arquitetura e as estratégias bioclimáticas são uma das formas de garantir, manter e equilibrar parâmetros de umidade relativa, luminosidade, temperatura ambiente e o conforto térmico em casas de vegetação, garantindo um ambiente adequado para o cultivo e desenvolvimento de mudas e plantas. Os elementos de arquitetura e as estratégias bioclimáticas são responsáveis por ventilar, umidificar, aquecer, resfriar e iluminar o ambiente, utilizando meios e dispositivos passivos e ativos. Para definição das estratégias integradas nas casas de vegetação inteligentes foi utilizada a carta bioclimática considerando as regiões bioclimáticas de Alpestre/RS e Santa Rosa do Sul/SC.

Os elementos de arquitetura podem ser definidos como estratégias passivas em que auxiliam na iluminação, ventilação, umidificação e no aquecimento e arrefecimento da edificação. Os aquecedores, os exaustores, as cortinas, as luminárias e os aspersores são considerados como estratégias ativas para controle ambiental.

As duas casas de vegetação inteligente de Santa Rosa do Sul e Alpestre são iguais em todas as proporções, estratégias e sistemas, em seguida esta apresentada em perspectiva na Figura 1 o projeto técnico das casas de vegetação, em que pode ser visto diversos elementos instalados na casa de vegetação, como exaustores, forro, janelas, ante-sala, cortinas e parede úmida.

Durante a fase de projeto e desenvolvimento da casa de vegetação inteligente foram implementadas diversas estratégias bioclimáticas como: Sistema de ventilação natural e cruzada; Materiais e elementos de sombreamento; Materiais e elementos para aproveitamento da iluminação natural; Sistema de resfriamento evaporativo para resfriamento e umidificação internas; Sistema de abertura de cortinas conforme parâmetros ambientes interno e externo; Sistema de forro móvel para redução do volume a ser resfriado/aquecido; Sistema de cortina de aluminet para sombreamento.

Figura 1 – Vista em perspectiva da casa de vegetação inteligente.



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse.

As casas de vegetação inteligentes, especialmente, apresentam 12 m de comprimento, 8 m de largura, 4 m de altura e têm uma estação meteorológica automática integrada à envoltória. As variáveis medidas a partir da estação

meteorológica automática são: radiação solar, temperatura ambiente, umidade relativa, velocidade e direção do vento, pressão atmosférica e precipitação. Estas variáveis têm impacto no perfil e comportamento das variáveis em ambiente *indoor* da casa de vegetação.

As casas de vegetação são monitoradas a partir de um sistema computacional de inteligência composto, entre outros, por sensores de temperatura ambiente da estufa, de luminosidade da estufa e de umidade relativa da estufa. O ambiente interno das casas de vegetação é monitorado por nove sensores de temperatura ambiente e de umidade relativa e por quatro sensores de luminosidade. Estas variáveis são monitoradas continuamente na dimensão do tempo. Além disso, as casas de vegetação inteligentes têm um sistema de aquecimento artificial composto por 4 aquecedores de potência nominal de 3 kW para controle de temperatura ambiente interna para os períodos de inverno.

Em geral, ambientes projetados e desenvolvidos artificialmente necessitam de algumas características que venham a suprir a demanda necessária ou complementar à existente. Um exemplo disto é a iluminação artificial, que pode ser integralmente deste modo ou desfrutar de alguns ajustes na estrutura a fim de aproveitar a natural, tornando-a acessível financeiramente ou complementando-a.

4.1.1. Iluminação natural

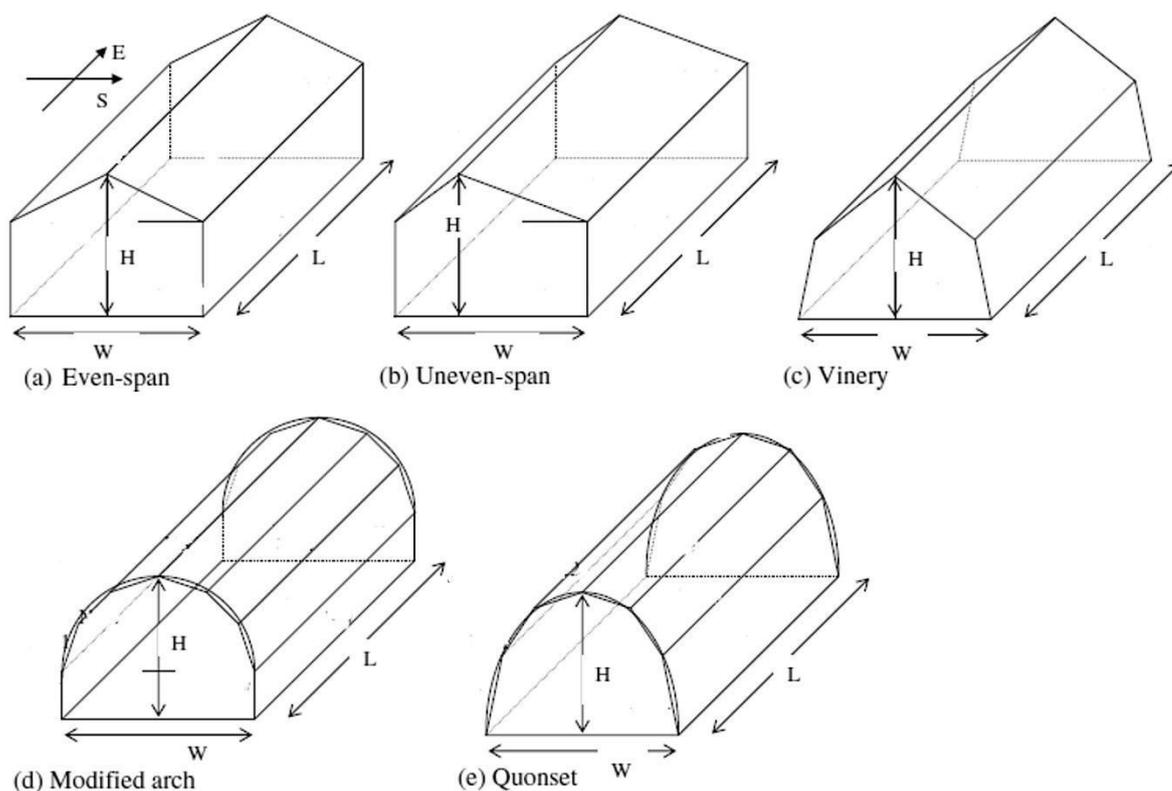
A iluminação natural é uma das variáveis mais críticas para o desenvolvimento de plantas em ambientes controlados, como as casas de vegetação. A quantidade e qualidade da luz natural que entra na estufa impactam diretamente na fotossíntese e no microclima interno. Por isso, aspectos como geometria da estrutura, materiais de cobertura e orientação geográfica precisam ser cuidadosamente planejados para maximizar o aproveitamento da radiação solar e reduzir a necessidade de suplementação com iluminação artificial.

A geometria da estufa e o formato do telhado influenciam diretamente na quantidade de radiação solar recebida pela estrutura, bem como na transferência de calor para o exterior (AHAMED; GUO; TANINO, 2019). Diferentes tipos de telhado, como o de duas águas com vãos iguais, duas águas com vãos desiguais, formato de arco gótico, forma de vinha e forma *Quonset* (ou cabana Nissen), são amplamente considerados para a produção agrícola em diversas regiões e condições climáticas.

Cada tipo apresenta características específicas em termos de ganho de radiação solar e retenção de calor, tornando-se mais ou menos adequados conforme as condições locais. Çakir e Sahin (2015) analisaram cinco tipos de estufas para verificar a disponibilidade de radiação solar: vãos iguais, vãos desiguais, vinhedos, semicirculares e elípticos. Os autores concluíram que a forma elíptica se mostrou ideal para as condições da cidade de Bayburt, Turquia, por concentrar melhor a luz solar.

Na figura 2 apresenta-se tipos de geometria de estufas ou casas de vegetação, em que no geral, são mais eficientes em termos de energia, pois expõem menos área externa, reduzindo a perda de calor por unidade de área (AHAMED; GUO; TANINO, 2019).

Figura 2 - Tipos de geometria de estufas.



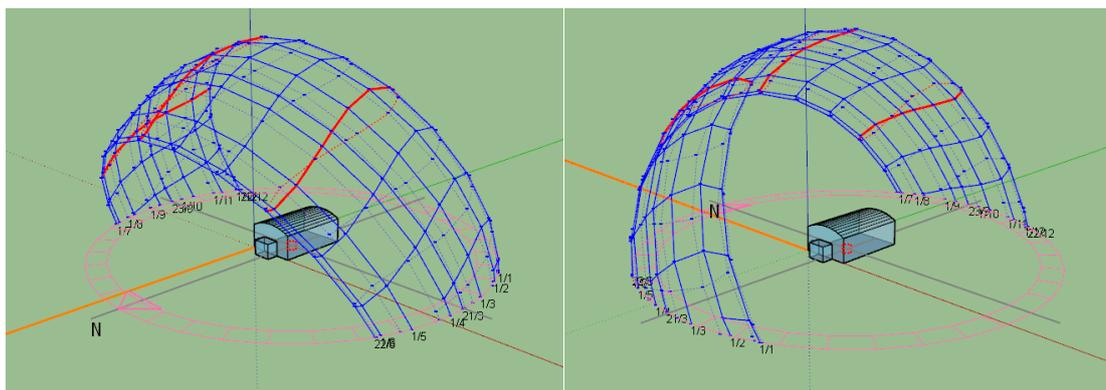
Fonte: AHAMED; GUO; TANINO (2019).

Além da geometria, o material da envoltória da casa de vegetação é uma das principais estratégias bioclimáticas para garantir uma boa iluminação natural. A transmitância dos materiais de cobertura é um fator crucial, permitindo que a luz chegue até as plantas de forma eficaz. Materiais ideais para estufas devem ter alta

transparência à radiação solar global, especialmente na faixa de radiação fotossinteticamente ativa (PAR), e ser o mais opacos possível à radiação infravermelha de onda longa (IR) para manter o calor. Também é desejável que esses materiais possuam alta radiação difusiva, bom isolamento e propriedades anti-condensação (AHAMED; GUO; TANINO, 2019). Os materiais comumente utilizados incluem vidro, plásticos rígidos (como policarbonato e acrílico) e plásticos finos (como polietileno de baixa densidade e copolímero de etileno acetato de vinila) (ACHOUR; OUAMMI; ZEJLI, 2021). No presente estudo, foi utilizado um plástico fino, denominado filme plástico, e outros tipos de cobertura para sombreamento, como aluminet, sombrite, chromatinet e clarite. Esses materiais foram aplicados à envoltória da casa de vegetação para promover sombreamento em dias de alta insolação, prevenindo o superaquecimento e garantindo um ambiente mais estável para as plantas.

Outro parâmetro importante na análise de iluminação natural é a orientação geográfica da estufa, que influencia a trajetória da luz solar ao longo do dia. Para definir a melhor orientação, utilizou-se o software SketchUp com a ferramenta CuricSun e a geolocalização da cidade de Santa Rosa do Sul/SC, local de instalação da casa de vegetação. A modelagem da trajetória solar realizada pelo software permite observar o caminho do sol durante o ano e verificar a trajetória das sombras, auxiliando na definição da orientação ideal da estufa. Esse caminho aparente é consequência do movimento de translação da Terra em torno do Sol e é caracterizado pelos ângulos de azimute solar e de altura solar. Em fase de projeto das casas de vegetação, foram realizadas modelagens, a fim de verificar os benefícios para cada orientação em relação a distribuição solar, assim foram consideradas duas orientações para a análise da casa de vegetação: norte-sul e leste-oeste, sendo que a referência é a ante-sala e a parede úmida posicionadas em lados opostos nas faces de menor comprimento (8 m). Na orientação norte-sul, a parede úmida está voltada para o lado sul, enquanto na orientação leste-oeste, ela está voltada para o lado leste.

Figura 3 - Modelagem da casa de vegetação e trajetória solar



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Após a fase de projeto, na fase de construção, a casa de vegetação de Santa Rosa do Sul/SC foi orientada no eixo Leste-Oeste, enquanto a de Alpestre/RS foi posicionada no eixo norte-sul. O impacto dessas diferentes orientações foi monitorado e avaliado em função do desempenho e da eficiência energética das estruturas. Dado que a diferença entre os eixos da estufa é de 50% (12 m x 8 m), espera-se que o impacto da orientação seja mínimo, uma hipótese que foi confirmada com dados empíricos coletados ao longo da operação da casa de vegetação.

Portanto, a forma, material e orientação da estufa foram ajustadas para maximizar a eficiência energética e o conforto das plantas em ambas as localizações estudadas.

4.1.2. Sistema de iluminação artificial

A implementação de um sistema de iluminação artificial na casa de vegetação é essencial para garantir o crescimento adequado das mudas, especialmente em condições em que a iluminação natural é insuficiente. Esse sistema complementa a luz solar, assegurando um fotoperíodo constante e otimizado para o desenvolvimento das plantas, o que é especialmente importante durante períodos de baixa irradiância ou em horários noturnos. Dessa forma, o uso de lâmpadas de LED com emissão de radiação fotossinteticamente ativa em ambiente climatizado com baixa irradiância é uma alternativa para melhoria do crescimento e, conseqüentemente, na produção de mudas (Agarwal et al., 2016).

Para atender às necessidades fotossintéticas das plantas, foi escolhido o espectro lilás, que consiste na combinação das faixas de luz azul (cerca de 450 nm) e vermelha (aproximadamente 650 nm). Esse espectro é ideal para o desenvolvimento vegetal, pois cada comprimento de onda desempenha uma função crucial no ciclo de crescimento. “Os comprimentos de onda mais utilizados no processo de amadurecimento de frutos após a colheita situam-se nas faixas do azul (450 nm) e do vermelho (650 nm)” (D’Souza et al., 2015). A luz azul favorece o crescimento vegetativo e a formação estrutural das plantas, enquanto a luz vermelha estimula o desenvolvimento reprodutivo, incluindo a floração e frutificação. A combinação desses comprimentos de onda no espectro lilás proporciona uma iluminação balanceada, atendendo tanto ao crescimento vegetativo quanto às necessidades de desenvolvimento reprodutivo das mudas, já que “a resposta das plantas cultivadas não depende apenas da presença, mas também da qualidade espectral da luz” (Pawlowska et al., 2018).

A distribuição luminosa também é um fator determinante na eficácia do sistema. Para garantir que todas as mudas recebam uma quantidade uniforme de luz, a iluminação foi projetada e simulada para minimizar sombras e variações de intensidade dentro da casa de vegetação. Diferentes configurações de altura e disposição das luminárias foram testadas com o objetivo de alcançar uma distribuição homogênea de iluminância. Esse cuidado assegura que todas as plantas se desenvolvam de maneira equilibrada, evitando desigualdades no crescimento que poderiam prejudicar a uniformidade da produção.

O sistema foi projetado para operar em complementaridade com a iluminação natural. As luminárias artificiais são acionadas em períodos de baixa irradiância natural, de modo a manter o fotoperíodo necessário para as mudas. Essa integração permite que o sistema seja acionado apenas quando a luz natural é insuficiente, economizando energia e otimizando o uso do recurso artificial. Atualmente, utilizam-se luzes artificiais para simular a luz solar e promover a fotossíntese nas plantas com espectro eletromagnético apropriado, gerando maiores produtividades e qualidade de plantas (Guimarães, 2017). Sensores de luz e temporizadores podem ser usados para automatizar esse processo, mantendo o ambiente de cultivo em condições ideais sem intervenção manual contínua.

A definição do fotoperíodo foi realizada com base nas necessidades específicas das plantas tropicais, como aquelas cultivadas neste projeto. Para atender

a essas exigências, estabeleceu-se um fotoperíodo de 12 horas, que é adequado para promover o desenvolvimento saudável das mudas. Esse período foi definido de acordo com as exigências naturais das plantas e considerando o objetivo de maximizar o crescimento em um ambiente controlado.

Para modelar e validar o sistema de iluminação, foi utilizado o software DiaLux, que permitiu simular e ajustar diversos cenários de iluminação na casa de vegetação. O sistema de iluminação artificial foi modelado no software DiaLux visando a otimização e complementaridade com a iluminação natural para garantir os parâmetros definidos para o fotoperíodo. Foram simulados doze cenários diferentes no modo noturno, ou seja, sem iluminação natural, para garantir que o sistema de iluminação artificial sozinho poderia atender ao fotoperíodo necessário. Inicialmente, fitas de LED com controle RGB e proteção IP65 foram testadas, pois elas oferecem uma solução resistente à água e configurável em termos de cor. No entanto, essas fitas não forneceram a iluminância mínima necessária para a fotossíntese. Após testes, a escolha final recaiu sobre uma luminária de 50 W, que mostrou atender aos requisitos de iluminância, além de ser possível agrupar unidades para simular potências maiores, como 100 W, 150 W e 200 W, dependendo da configuração necessária.

Com a simulação e a escolha das luminárias adequadas, o sistema de iluminação artificial foi ajustado para fornecer a quantidade necessária de radiação fotossinteticamente ativa (RFA), contribuindo para um ambiente de crescimento eficiente e sustentável para as mudas.

4.2. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL

Para modelar e validar o sistema de iluminação, foi utilizado o software DiaLux, que permitiu simular e ajustar diversos cenários de iluminação na casa de vegetação. Foram simulados doze cenários diferentes no modo noturno, ou seja, sem iluminação natural, para garantir que o sistema de iluminação artificial sozinho poderia atender ao fotoperíodo necessário. Inicialmente, fitas de LED com controle RGB e proteção IP65 foram testadas, pois elas oferecem uma solução resistente à água e configurável em termos de cor. No entanto, essas fitas não forneceram a iluminância mínima necessária para a fotossíntese. Após testes, a escolha final recaiu sobre uma luminária de 50 W, que mostrou atender aos requisitos de iluminância, além de ser

possível agrupar unidades para simular potências maiores, como 100 W, 150 W e 200 W, dependendo da configuração necessária.

Com a simulação e a escolha das luminárias adequadas, o sistema de iluminação artificial foi ajustado para fornecer a quantidade necessária de radiação fotossinteticamente ativa (RFA), a simulação e seus resultados serão tratados nas seções posteriores.

4.3. MODELAGEM E PERFIL DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

O perfil de consumo de energia elétrica do sistema de iluminação artificial da casa de vegetação inteligente é dependente do perfil de acionamento do sistema. Em fase de projeto foi definido que o acionamento do sistema de iluminação artificial seria durante os períodos em que a iluminação natural fosse inferior à luminosidade considerada adequada, neste caso, luminosidade de 3500 lux. Em fase de projeto ficou definido que as plantas necessitam de 12 horas de luz natural ou artificial, e com isso foi definido que o sistema de iluminação artificial seria acionado apenas entre 6h da manhã e 18h da noite, aproveitando assim o máximo de períodos de iluminação natural.

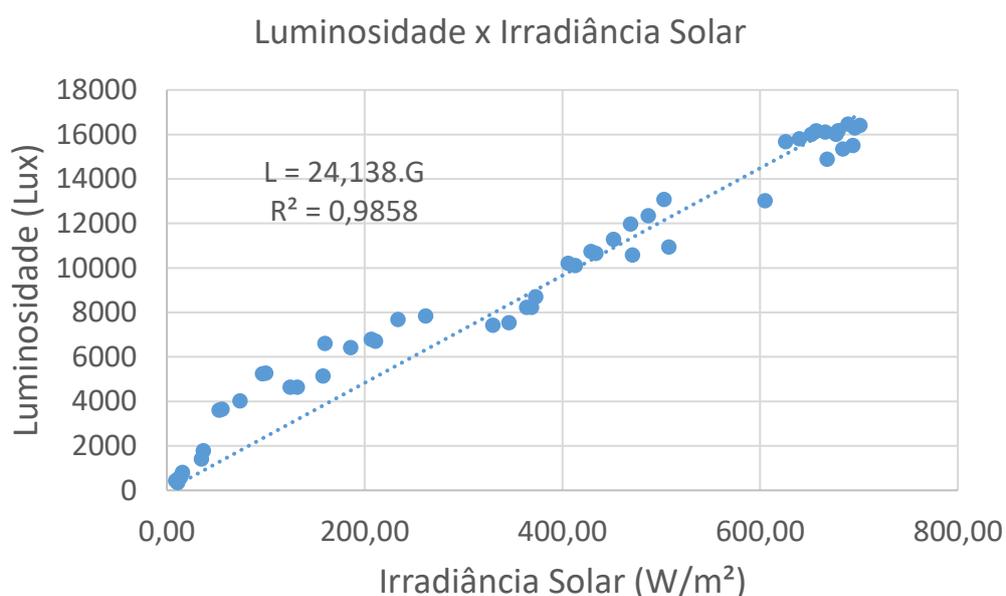
Para a estimativa do consumo de energia elétrica do sistema de iluminação artificial foram desenvolvidos dois métodos. O primeiro método para estimativa de consumo de energia elétrica do sistema de iluminação artificial utiliza série histórica de dados meteorológicos e correlações entre a irradiância solar e a iluminância natural no ambiente interno da casa de vegetação.

Durante o período de inverno foram realizados e repetidos ensaios específicos para avaliar a correlação entre a luminosidade da casa de vegetação e a radiação solar, ressalta-se que se trata de um ensaio específico para um dia específico, assim essa correlação é verdadeira apenas para a data do ensaio. Para este ensaio, foram consideradas as variáveis de luminosidade da casa de vegetação, medidas a partir dos sensores instalados no ambiente interno, e a radiação solar medida a partir do piranômetro da estação meteorológica. Neste caso, destaca-se que é a medida da irradiância solar global no plano horizontal.

Neste ensaio, janelas e cortinas estavam fechadas, bem como a cobertura de aluminet e o filme plástico do forro. A Figura 4 apresenta a correlação entre a luminosidade da casa de vegetação e a radiação solar. Neste ensaio, foi considerada

uma correlação linear. O coeficiente de determinação R^2 foi de 0,98. O modelo matemático também é apresentado na Figura 4. Entretanto, verifica-se que o modelo matemático subestima os valores de luminosidade na faixa de irradiância solar entre 0 e 300 W/m^2 . Para esta faixa de irradiância solar, a altura do Sol é menor, alterando a distribuição de iluminação natural no ambiente interno da casa de vegetação.

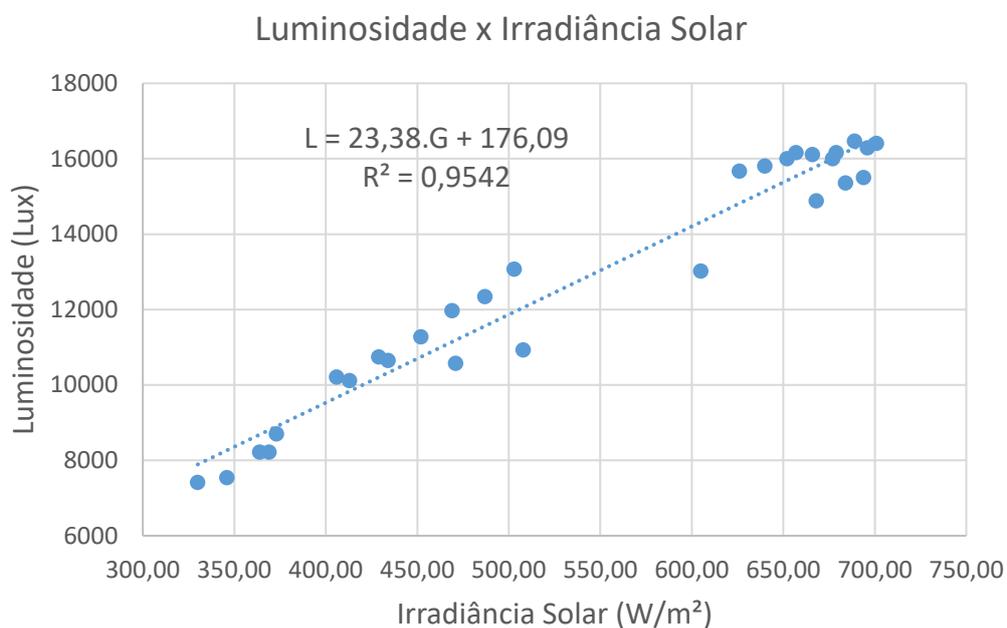
Figura 4– Correlação linear entre a luminosidade e a radiação solar.



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse.

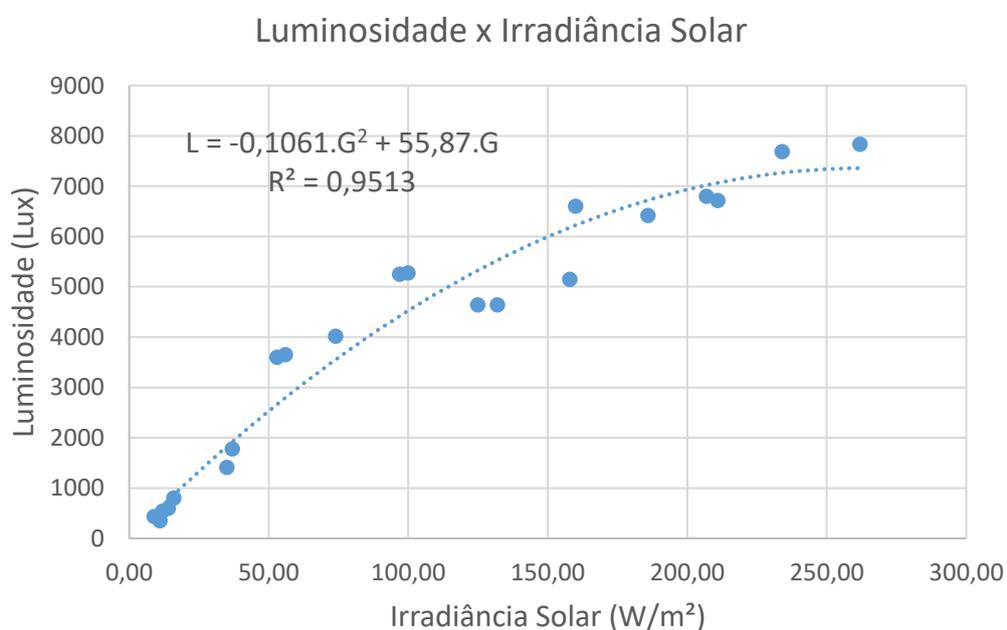
Pode-se considerar, portanto, uma correlação linear entre a luminosidade e a radiação solar para valores de irradiância maiores que $300W/m^2$ (Figura 5) e uma correlação polinomial de grau dois para valores de irradiância menores que $300W/m^2$ (Figura 6). Os modelos matemáticos para estas duas correlações também são apresentadas nas Figuras 5 e 6. Para estas correlações, o coeficiente de determinação R^2 é da ordem de 0,95. Destaca-se que as correlações são válidas para a condição de janelas e cortinas fechadas, bem como cobertura de aluminet e filme plástico do forro também fechados, a fim de obter a radiação no caso de maior resistência luminosa.

Figura 5 – Correlação linear entre a luminosidade e a irradiação solar.



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse.

Figura 6 – Correlação polinomial de grau 2 entre a luminosidade e a radiação solar.



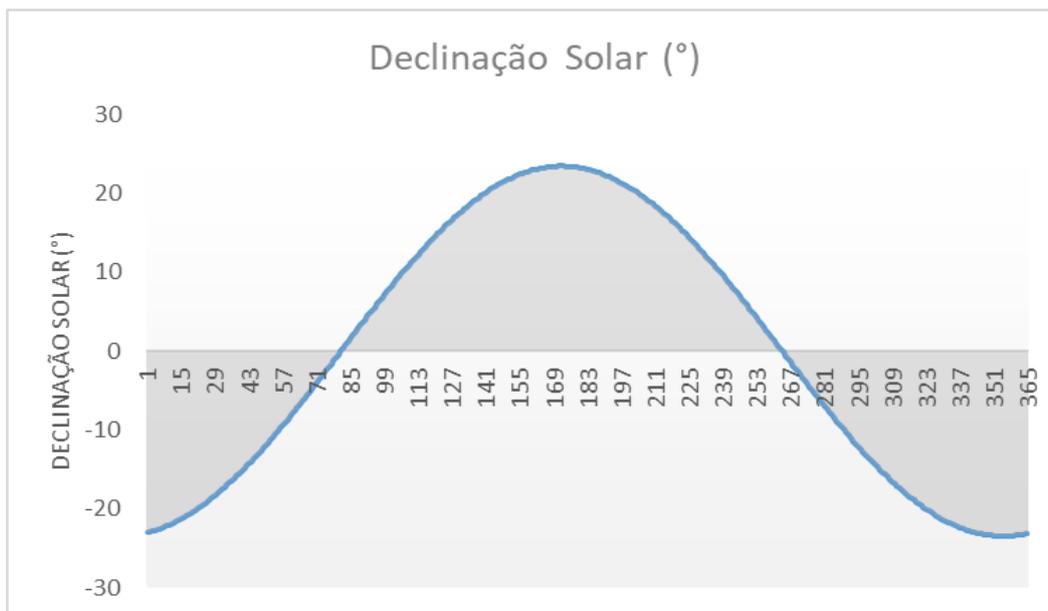
Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse.

Para o estudo de perfil de consumo de energia elétrica do sistema de iluminação artificial da casa de vegetação inteligente, portanto, foram utilizadas as correlações entre a luminosidade interna e a radiação solar e arquivos meteorológicos

das latitudes e longitudes de Alpestre/RS e Santa Rosa do Sul/SC. Foram considerados dois tipos de arquivos meteorológicos, um arquivo meteorológico do tipo TMY e outro arquivo meteorológico compilando dados de 5 anos de estações da rede INMET.

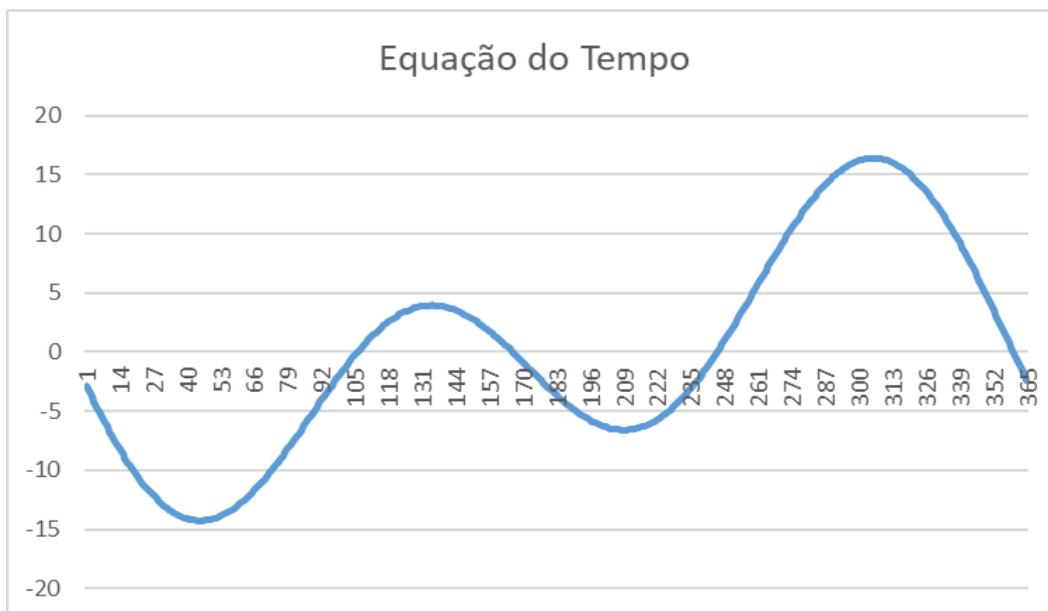
Os métodos para estimativa de consumo de energia elétrica do sistema de iluminação artificial utilizam propriedades e correlações da radiação solar e sua disponibilidade na Terra, determinando o fotoperíodo. A Figura 7 apresenta a declinação solar em 365 dias do ano, enquanto a Figura 8 apresenta a equação do tempo durante 365 dias do ano. A Figura 9 apresenta o ângulo de nascimento do Sol para a latitude de $-28,94^\circ$ durante 365 dias do ano.

Figura 7 – Declinação solar.



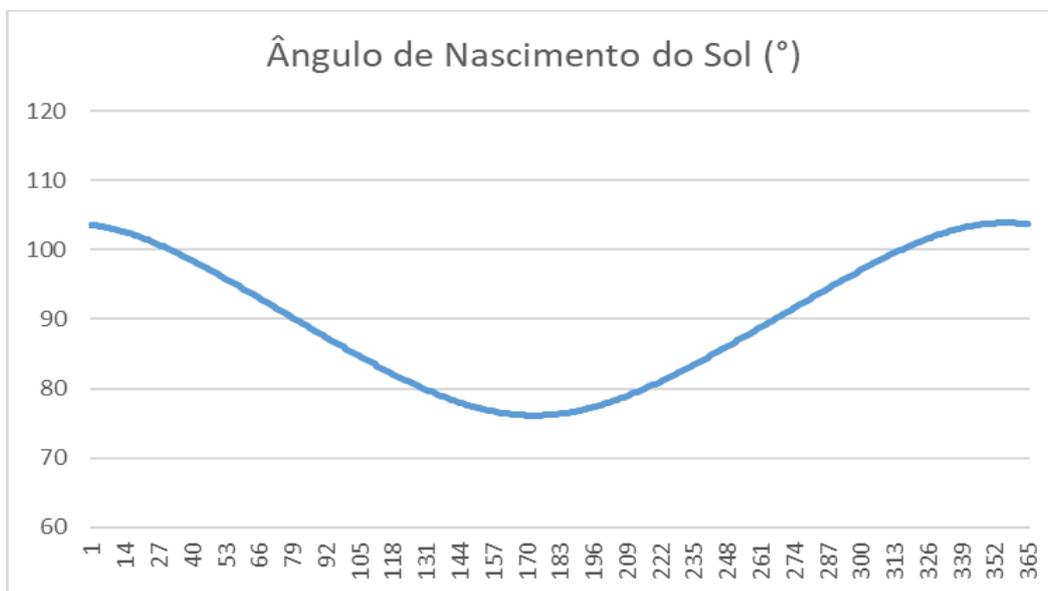
Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse.

Figura 8 – Equação do tempo.



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse.

Figura 9 – Ângulo de nascimento do Sol.

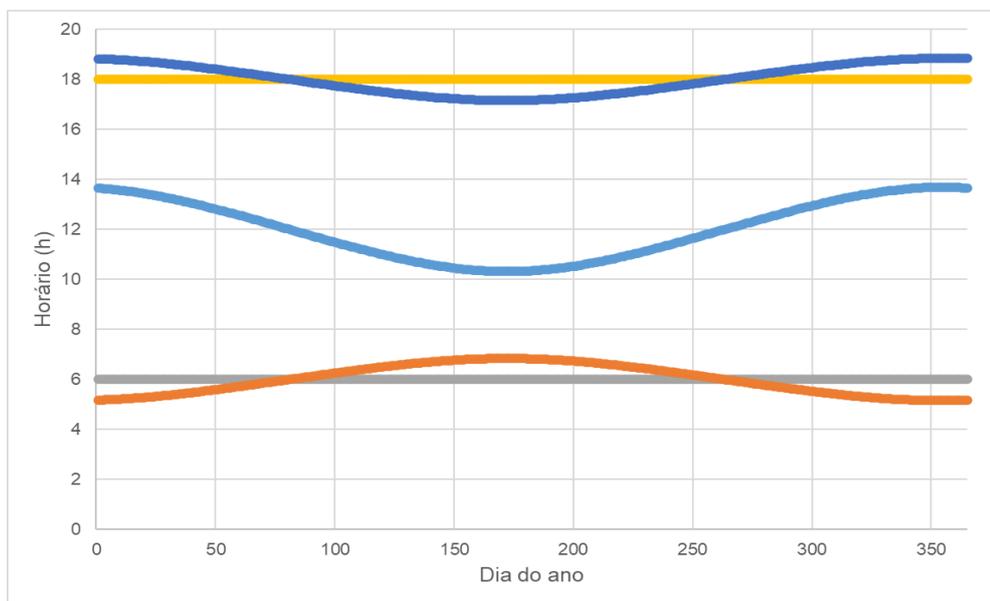


Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse.

A partir das propriedades da radiação solar e das correlações Sol-Terra, pode-se determinar o fotoperíodo, horário do nascer do Sol e horário do pôr do Sol para uma determinada latitude e longitude (Figura 10). Considera-se 12h de fotoperíodo no ambiente da casa de vegetação, entre 6h e 18h. A Figura 11 apresenta a estimativa

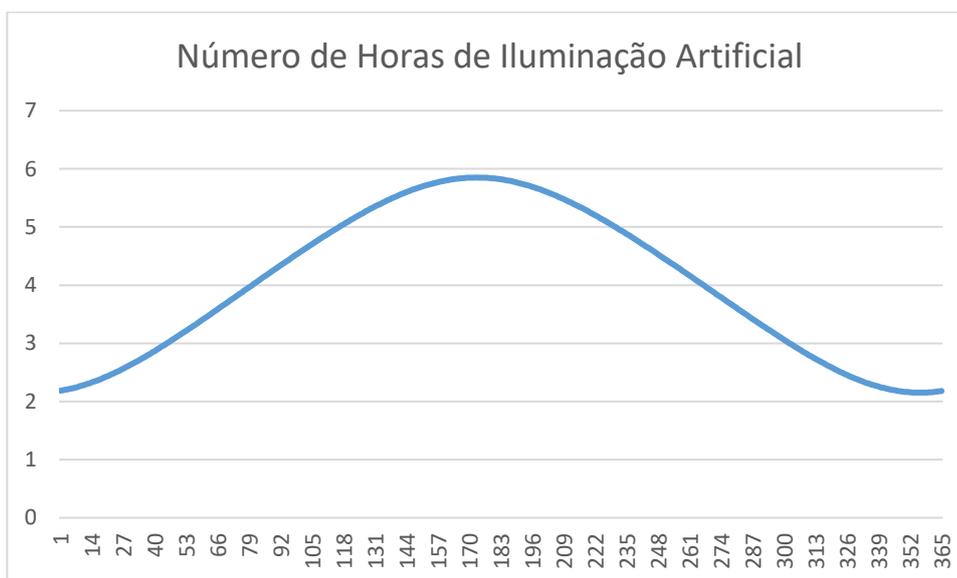
do número de horas, ao longo do ano, de acionamento/utilização do sistema de iluminação artificial.

Figura 10 – Correlações Sol-Terra.



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse.

Figura 11 – Número de horas de operação do sistema.



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse.

O segundo método para estimativa do consumo de energia elétrica do sistema de iluminação artificial considera a medida experimental da luminosidade e diferentes

valores de set point para acionamento do sistema. No ambiente interno, distribuído de maneira uniforme, as casas de vegetação inteligentes têm módulos de sensores que medem variáveis ambientais. Cada casa de vegetação é monitorada a partir do sistema computacional de inteligência composto, entre outros, por sensores de temperatura ambiente da estufa, de luminosidade da estufa e de umidade relativa da estufa. O ambiente interno da casa de vegetação é monitorado por nove sensores de temperatura ambiente e de umidade relativa e por quatro sensores de luminosidade. Estas variáveis são monitoradas continuamente na dimensão do tempo.

Neste estudo, considera-se o período de operação entre 6h e 18h e diferentes valores de luminosidade da estufa de set point. Para a estimativa do consumo de energia elétrica do sistema de iluminação artificial considera-se os perfis mensais da luminosidade da casa de vegetação, estes serão descritos nos resultados.

4.4. SISTEMA FOTOVOLTAICO

Um sistema fotovoltaico de referência foi modelado e simulado no software SAM - System Advisor Model, uma ferramenta de simulação que permite a análise dos parâmetros climatológicos, econômicos e financeiros que norteiam a produção de eletricidade. Desta forma, foi possível dimensionar cada sistema utilizando dados de sua localização (exata ou mais próxima) e climáticos, adquiridos via NREL - *National Renewable Energy Laboratory*, simulando o sistema estabelecido para análise do perfil de geração.

Para as cidades de Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS, as modelagens foram realizadas tendo como referência a cidade de Torres/SC e Chapecó/SC respectivamente, simulando o sistema dividido: 14 módulos ligados a um inversor e em alpestre o sistema conta com mais um arranjo de outros 14 módulos com outro inversor, sendo que cada inversor tem 2 MPPTs (*Maximum Power Point Tracking*). A inclinação utilizada para os módulos, a fim de obter maiores valores de geração, foi estabelecida a partir de simulações no próprio sistema como 20°, ressaltando que é indicado este valor estar entre 20° e 30°. Outras informações técnicas referente aos sistemas fotovoltaicos, estão dispostas na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Dados técnicos dos sistemas fotovoltaicos

Inversor	MIN5000TL-X
Marca	Growatt
Máxima potência fotovoltaica rec.	7000W
Máxima tensão CC	550V
Faixa de tensão de MPPT / tensão nominal de MPPT	60V-550V /360V
Corrente máxima de entrada	13.5A/13.5A
Potência nominal de saída CA	5000W
Corrente máxima de saída	22.7A
Tensão nominal de saída (Faixa)	230V(160V-300V)
Máxima eficiência	98.4%
Modulo	CS3W-455MS
Marca	Canadian Solar
Tipo de Célula	Mono-cristalino
Max Potencia Nominal (Pmax)	455W
Opt. Tensão de Operação (Vmp)	41,3V
Opt. Corrente de Operação (Imp)	11,02A
Tensão de Circuito Aberto (Voc)	49,3V
Corrente de Curto-Circuito (Isc)	11,66A
Eficiência do Modulo	20,60%
Temperatura de Operação	-40°C ~ 85°C

Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse.

Outro dado de extrema importância é o azimute do sistema, como os melhores valores são obtidos quando este está direcionado ao Norte, e era possível direcioná-los também, este foi considerado 0, ou seja, orientado para o Norte Geográfico. Algumas perdas também são pré-definidas no *software* com a intenção de tornar os dados ainda mais assertivos, como perdas de irradiância com perda média anual de sujidade 5% por subarranjo, incompatibilidade de módulo e fiação DC de 2%, diodos e conexões de 0,5% e fiação AC de 1%. Com o design do sistema finalizado, foi possível obter uma razão DC para AC de 0.91, destacando que o valor ideal para este é o mais próximo de 1. A partir da modelagem do sistema fotovoltaico, foi possível realizar a simulação, sendo que foi obtida a estimativa de geração de energia elétrica.

A Figura 12 e a figura 13 apresentam os sistemas fotovoltaicos das casas de vegetação de Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre /SC respectivamente. Destaca-se que os sistemas fotovoltaicos foram instalados em telhados de edificações próximas às casas de vegetação. A energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico será compensada na casa de vegetação, onde foi instalado um medidor de energia elétrica exclusivo para esta finalidade.

Figura 12 - Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica de Santa Rosa do Sul/SC



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Figura 13 - Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica de Alpestre/RS



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

A partir dos resultados da simulação, em base mensal, foram determinados indicadores de desempenho típicos. Entre os indicadores, um perfil mensal da taxa ou razão de desempenho ou Performance Ratio (PR) foi determinado. A estimativa de energia elétrica a partir do método analítico foi realizada considerando uma gama de potência nominal de sistema fotovoltaico variando entre 3 kWp e 8 kWp, os valores

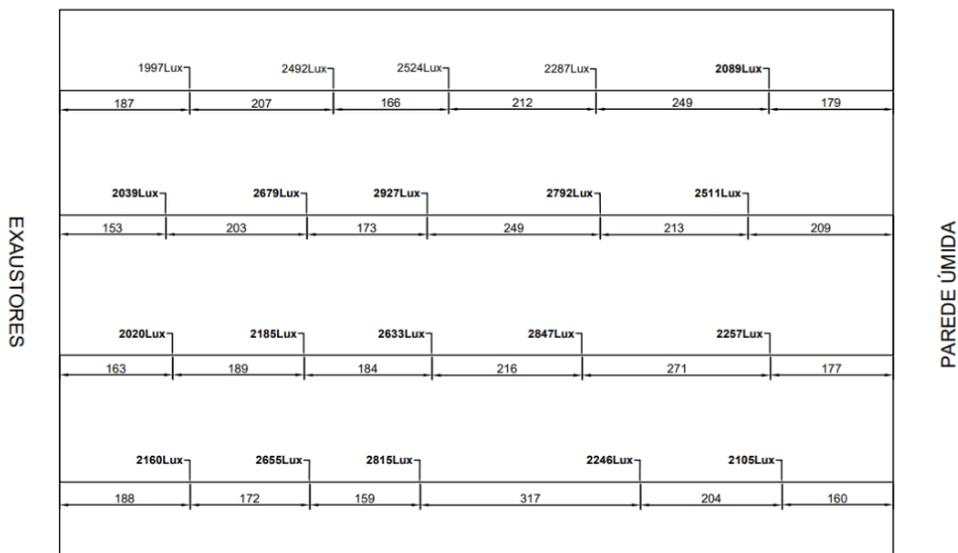
médios mensais de PR e a produtividade de referência média diária mensal, que será abordado na fase de resultados.

4.5. VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL

A partir da modelagem e simulação do sistema de iluminação artificial no software Dialux e posterior aplicação do sistema de iluminação na casa de vegetação inteligente, foram realizadas medições a fim de atestar a intensidade luminosa no local e comparar os resultados experimentais da simulação com os resultados empíricos medidos. Para isso, foi utilizado um luxímetro, instrumento utilizado para medir a densidade da intensidade de luz em certo local, cuja unidade de medida é lux, onde um lux corresponde aproximadamente a 1 Watt por metro quadrado ($1 \text{ lux} = 1 \text{ W/m}^2$) (COSTA, 2006).

As medições foram realizadas com cuidado para evitar sombreamento e conseqüentemente interferência do resultado. No total foram medidos 20 pontos com o luxímetro, na altura das bancadas onde ficam as mudas e plantas. O número de pontos e a distribuição dos mesmos foram seguidos de acordo com as orientações e diretrizes da NBR15215-4, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). A partir das instruções da normativa, determinou-se a medição de 20 pontos (Figura 14). A área total da casa de vegetação foi seccionada em 20 áreas de dimensões diferentes a fim de manter as luminárias no centro de cada área já que as distribuições delas não é uniforme. No centro de cada pequena área, foi realizada uma medição com o luxímetro.

Figura 14 – Distribuição de luminárias e distâncias de cada ponto com seu devido valor de luminosidade (lux).



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

O software utilizado para tratamento dos dados, *Surfer*, é muito utilizado para interpolação de dados espaciais. A ferramenta foi utilizada para desenvolver mapas de curvas de nível que pudessem ser comparados com os resultados de distribuição de intensidade luminosa obtidos no software DIALux. O método de interpolação escolhido foi *Minimum Curvature*. Também foram plotados gráficos com outros métodos de interpolação, *Radial Base Function* e *Inverse distance to a power*, a fim de experimentar e determinar o melhor modelo de acordo com a quantidade de pontos vizinhos utilizados na interpolação de cada método e de acordo com a percepção visual durante as medições *in loco*.

Os métodos apresentam diferenças de intensidade luminosa interpolados entre os métodos, e justamente por utilizar um maior número de vizinhos, e entrelaçá-los para interpolar novos pontos no espaço.

4.6. ANÁLISE QUALITATIVA DAS MUDAS.

A partir da demanda da validação da aplicabilidade de produção de mudas micropropagadas de bananeira na *Smart and Efficient Greenhouse*, implantou-se o Experimento 1 com dois lotes de plantas. Tendo por objetivo, comparar o crescimento e o desenvolvimento das mudas micropropagadas de bananeiras e de orquídeas no período de aclimação em ambiente de cultivo protegido convencional (CGH) com a *Smart and Efficient Greenhouse* (SGH).

O experimento foi conduzido na área de fitotecnia do Instituto Federal Catarinense, Campus Santa Rosa do Sul – SC, em Santa Rosa do Sul-SC (29° 05' 44.1" S e 49° 48' 46.4" W) durante o ano de 2023. O cultivo de bananeira utilizada foi a Nanicão Corupá (SCS452, variedade EPAGRI) e de orquídea foi Phalaenopsis. Obtidas por meio do cultivo in vitro, produzidas pela Biofábrica Foz do Chapecó - Alpestre/RS. As bananeiras foram padronizadas para o transplante com, em média, 4 folhas, 68,09 mm de altura e 5,09 mm de diâmetro do pseudocaule. Para as orquídeas em média, 5 folhas, 14 mm de altura e 6 mm de diâmetro do pseudocaule.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com dois tratamentos, constituídos por ambientes de cultivo protegido distintos, sendo eles: *Smart and Efficient Greenhouse* (SGH) e Convencional Greenhouse (CGH). A unidade experimental para bananeiras constituiu 10 parcelas de 15 plantas e 55 mudas de orquídeas, em cada casa de vegetação.

O tratamento SGH, conta com suplementação luminosa, suplementação de CO₂ via água carbonatada, fornecimento de fertirrigação diária, irrigação por microaspersão e controle de umidade e temperatura, tais sistemas operando de forma automática por meio de inteligência artificial de lógica Fuzzy.

O sistema embarcado da SGH, divide a ambientação das mudas em período de pré-aclimação, que consiste nos 15 primeiros dias após o transplante das plântulas *ex vitro* e aclimação que se estende até o fim do experimento. Com objetivo de adaptar, de forma gradativa, às condições climáticas existentes a campo a partir das definições em setpoints do sistema operacional.

O tratamento Convencional *Greenhouse* (CGH), consiste em uma casa de vegetação convencional coberta com lona agrícola e revestida com tela sombrite. As mudas foram acondicionadas em bancadas cobertas com sombrite de 50% de sombreamento. A irrigação foi por microaspersão visando manter a capacidade de

campo do substrato e programada em timer digital. Realizou-se a fertirrigação manual, garantindo a mesma lâmina de irrigação e mesma solução nutritiva da *Smart and Efficient Greenhouse*.

Para as bananeiras foram realizadas leituras a partir do datalogger digital Akso® AK172 acondicionados na CGH e pelos registros das leituras dos sensores armazenadas em banco de dados na SGH, foi obtida a temperatura máxima, a temperatura média e temperatura mínima, umidade máxima, média e mínima do interior de ambas as casas de vegetação, expressos em forma de gráficos e posterior comparação entre os tratamentos. Os valores médios de temperatura e umidade foram calculados através da média aritmética dos valores máximos e mínimos das variáveis.

As análises morfológicas foram realizadas conforme descrito por Koffi e Declerck (2015) e Gamez *et al.* (2019), a cada 15 dias, mensurou-se comprimento total do pseudocaule (CTP), medido do colo logo acima do substrato até a interseção da última folha completamente expandida, diâmetro do pseudocaule (DPC), aferido na altura do colo da planta e número de folhas (NF). No último dia experimental, determinou-se área foliar (AF), massa fresca da parte aérea (MFA), massa seca da parte aérea (MSA) e das raízes (MSR), após secagem em estufa (Koffi e Declerck, 2015; Gamez *et al.* 2019).

No mesmo período, realizou-se análises metabólicas, que compreendem açúcares totais (AT), açúcares redutores (AR) e açúcares não redutores (ANR) pelo método DNS de acordo com Maldonade *et al.*, (2013).

Nas variáveis mineralógicas, foram analisados os macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e enxofre (S) seguindo a metodologia de Malavolta *et al.*, (1997).

E ainda, referente à avaliação fisiológica, foram determinados os teores de clorofila total (CLT), clorofila *a* (CLa), clorofila *b* (CLb) e carotenóides pelo método destrutivo com extração em acetona 80% seguindo a metodologia de Lichtenthaler (1987).

De forma, não destrutiva, a cada 15 dias quantificou-se os teores de clorofila utilizando o medidor de clorofila portátil Falker® modelo CFL1030. Sendo amostrado o primeiro par de folhas mais expandido na região média do limbo foliar. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), utilizando o software Sisvar.

Para as orquídeas foram realizadas análises morfológicas no dia do transplante, após 15 dias (fim da pré-aclimatação), em períodos mais espaçados, aos 45 e aos 60 dias de aclimatação, sendo avaliado, o número de folhas (NF), diâmetro do caule (DC), medido no colo das plantas e altura total de planta (AT), mensurando da base do caule até a inserção da última folha expandida, além da quantificação do índice de mortalidade de plantas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

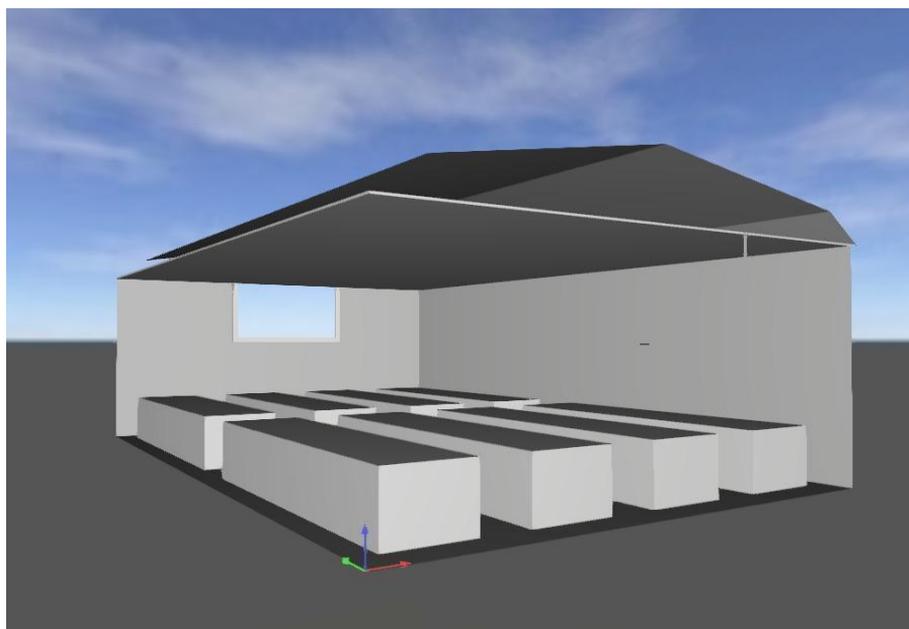
Os resultados foram desenvolvidos e analisados a partir de documentos e relatórios produzidos durante as fases do projeto denominado *Smart and Efficient Green House*, em que foi produzido relatórios tiveram fim de documentar os resultados de pesquisa, análise e desenvolvimento das casas de vegetação de Santa Rosa do Sul em SC e Alpestre no RS.

5.1. SISTEMA DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL

O sistema de iluminação artificial foi modelado no software *DiaLux* visando a otimização e complementaridade com a iluminação natural para garantir os parâmetros definidos para o fotoperíodo.

Inicialmente, a casa de vegetação foi modelada como uma edificação tradicional de alvenaria com duas aberturas correspondentes às janelas da casa de vegetação, conforme Figura 15. Essa simulação permitiu observar a distribuição da iluminância proveniente do sistema de iluminação artificial no interior da casa de vegetação.

Figura 15 - Modelagem da casa de vegetação no software DIALux



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Os estudos para definição do sistema de iluminação para fotoperíodo das mudas também englobam a escolha das luminárias. Entre os fatores considerados estão: tipo de luminária, temperatura da cor, espectro, potência, eficiência, impermeabilidade etc. Em um primeiro momento foram estudadas soluções com fitas de led que possuem proteção IP65 (à prova d'água) e controle de RGB, uma vez que a solução ideal consiste em luminárias com leds vermelhos e azuis. Entretanto, não foi possível encontrar uma fita de led comercial com potência suficiente para garantir a quantidade mínima de iluminância necessária para que as mudas realizassem a fotossíntese.

Doze cenários para o fotoperíodo foram simulados, com base em um orçamento prévio que possibilitou estimar o tipo, a potência e a quantidade de luminárias que poderiam ser colocadas em cada casa de vegetação. Diferentes alturas, potências e distribuição de luminárias foram testadas na simulação. Todos os cenários foram simulados no modo noturno, ou seja, sem iluminação natural.

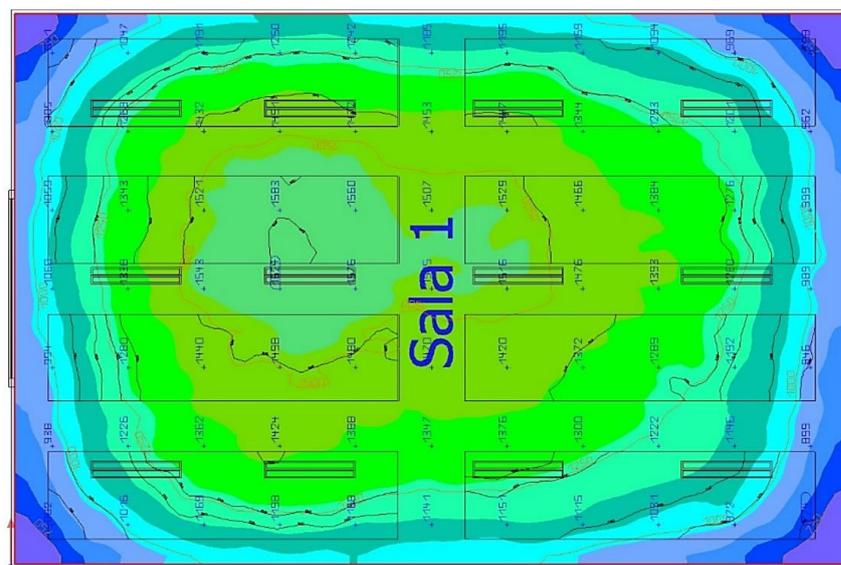
Uma luminária com 50 W de potência foi escolhida. A fim de simular luminárias com 100 W, 150 W e 200 W de potência, um agrupamento da luminária de 50 W foi feito, até atingir a potência de interesse. A Figura 16 apresenta o resultado para 4 linhas de luminárias de 100 W cada uma, distribuídas em 3 colunas ao longo da casa de vegetação. Os valores apresentados referem-se ao plano das mesas que irão

acomodar as mudas, ou seja, a um metro de altura em relação ao chão. Nota-se que no centro da casa de vegetação os valores de iluminância ficam em torno de 1.500 lux, enquanto próximo às paredes o valor médio reduz para 1.100 lux. Isso ocorre porque não há contribuição da iluminação natural.

O resultado para 4 linhas de luminárias de 100 W cada uma, distribuídas em 4 colunas ao longo da casa de vegetação é apresentado na Figura 17. Nesta configuração, os valores no centro ficam em torno de 1.900 lux. Ao se afastar para as laterais da casa de vegetação, os valores reduzem para 1.500 lux, em média. O aumento da iluminância é justificado pelo aumento da quantidade de luminárias.

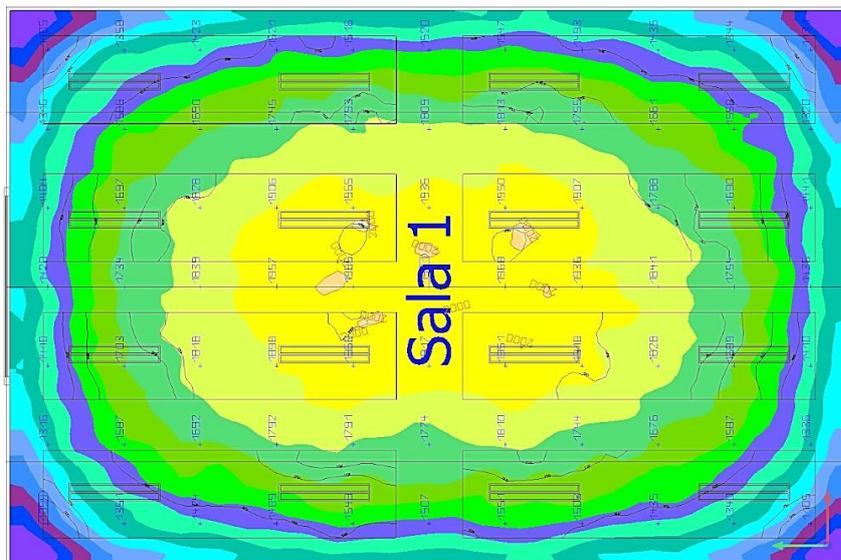
O resultado para 5 linhas de luminárias de 100 W cada uma, distribuídas em 3 colunas ao longo da casa de vegetação é apresentado na Figura 18. Entre os 3 cenários simulados com luminárias de 100 W, o que apresentou melhor distribuição de iluminância foi o de 4 linhas e 4 colunas.

Figura 16 - Resultados 4 linhas e 3 colunas de luminárias com 100 W cada



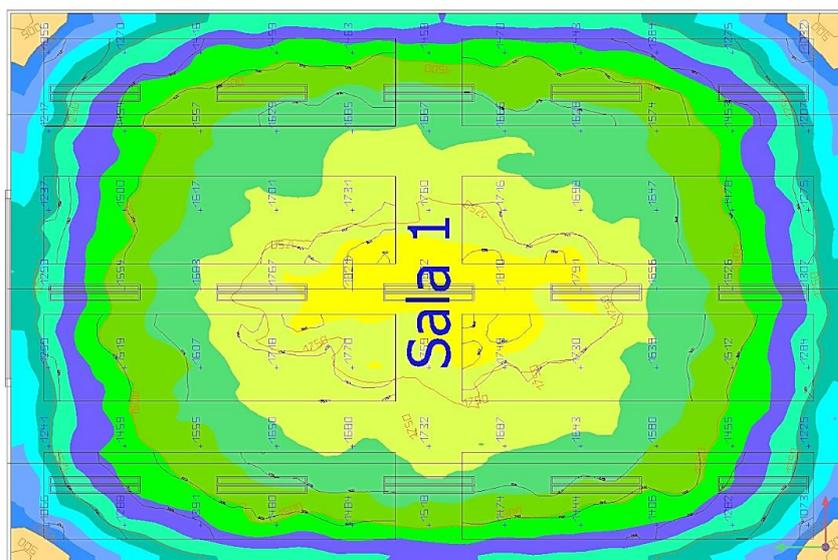
Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Figura 17 - Resultados 4 linhas e 4 colunas de luminárias com 100 W cada



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

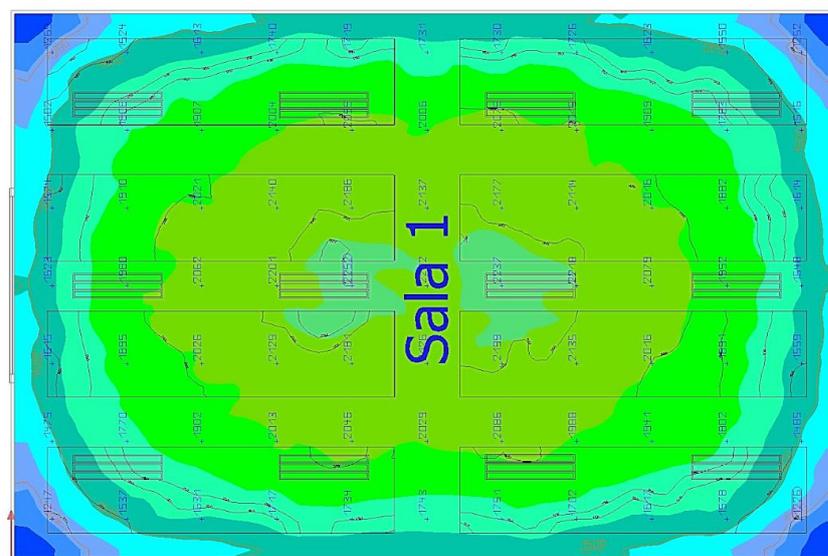
Figura 18 - Resultados 5 linhas e 3 colunas de luminárias com 100 W cada



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

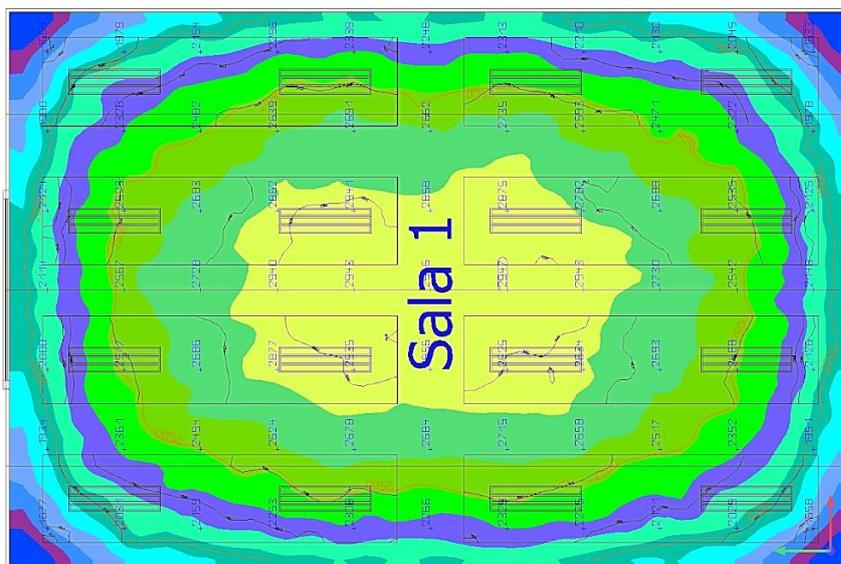
As Figuras 19, 20 e 21 apresentam os resultados para luminárias de 150 W cada, distribuídas em 4 linhas com 3 e 4 colunas e um cenário com 5 linhas e 3 colunas. Para o primeiro cenário de 150 W, com 4 linhas e 3 colunas, os valores no centro da casa de vegetação ficaram em torno de 2.000 lux, enquanto os níveis próximos às laterais ficaram em torno de 1.600 lux. Para o segundo cenário, 4 linhas e 4 colunas, os valores no centro chegaram ao pico de 2.956 lux. Nas laterais, a mínima observada foi de 1.658 lux. No cenário com 5 linhas e 3 colunas de luminárias, os valores ficaram próximos a 2.700 lux no centro e 2.100 lux nas extremidades.

Figura 19 - Resultados 4 linhas e 3 colunas de luminárias com 150 W cada



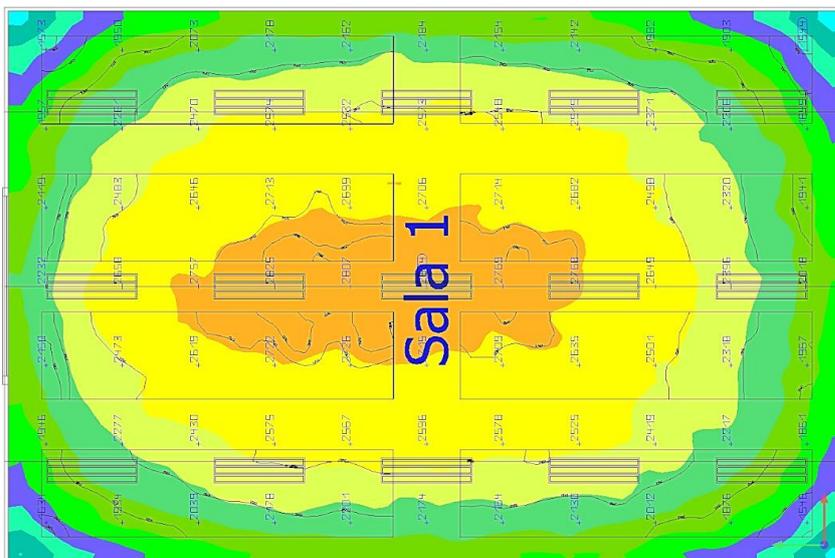
Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Figura 20 - Resultados 4 linhas e 4 colunas de luminárias com 150 W cada



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

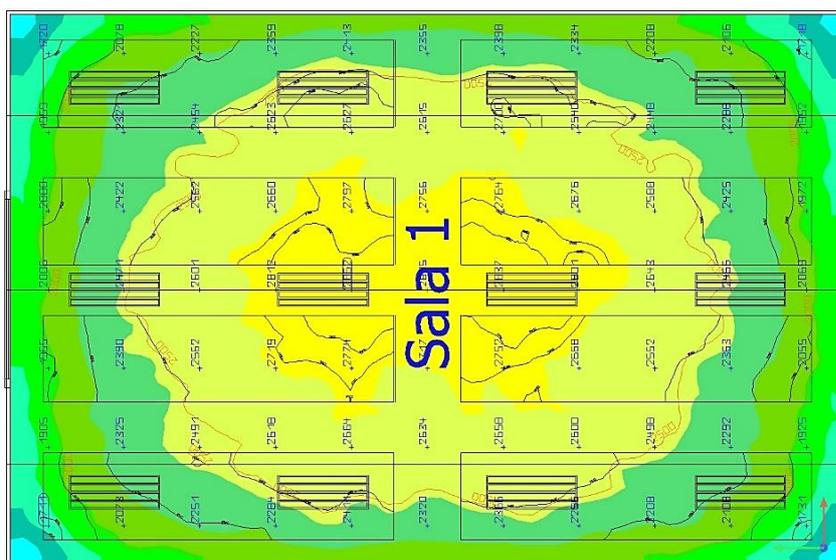
Figura 21 - Resultados 5 linhas e 3 colunas de luminárias com 150 W cada



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

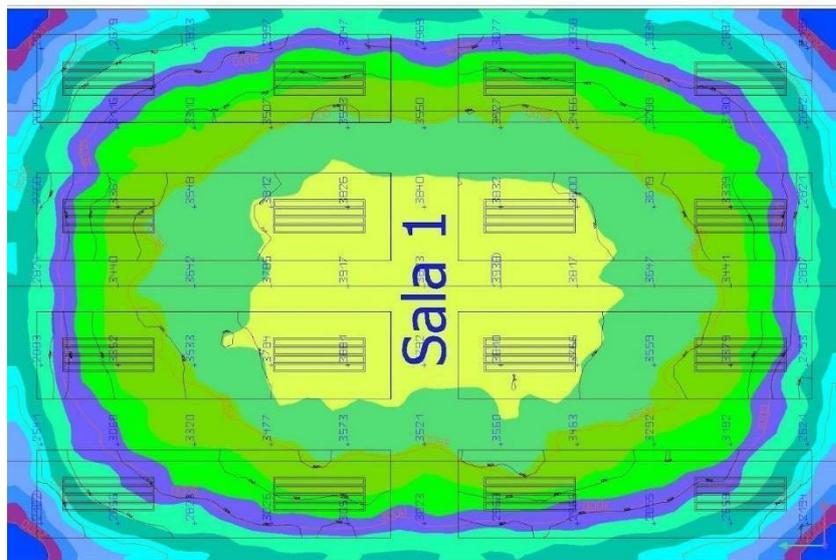
Seis cenários para as luminárias de 200 W foram simulados. O primeiro, o segundo e o terceiro seguem o padrão anterior: 4 linhas com 3 e 4 colunas e 5 linhas com 3 colunas. Além destes, foram testados cenários com 7 linhas e 4 colunas e 5 linhas com 4 colunas em diferentes alturas: 2,5 m e 3,0 m em relação ao chão. Os resultados são observados nas Figuras 22, 23, 24, 25, 26 e 27.

Figura 22 - Resultados 4 linhas e 3 colunas de luminárias com 200 W cada



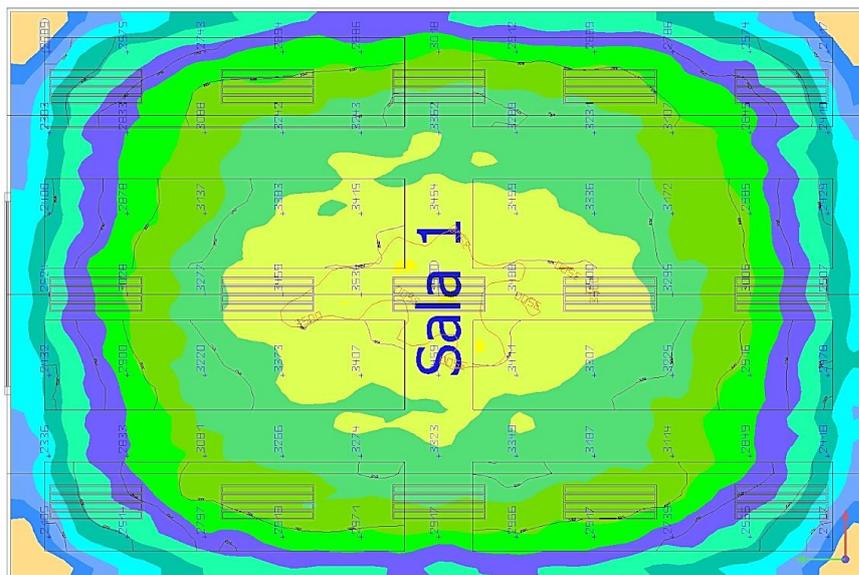
Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Figura 23 - Resultados 4 linhas e 4 colunas de luminárias com 200 W cada



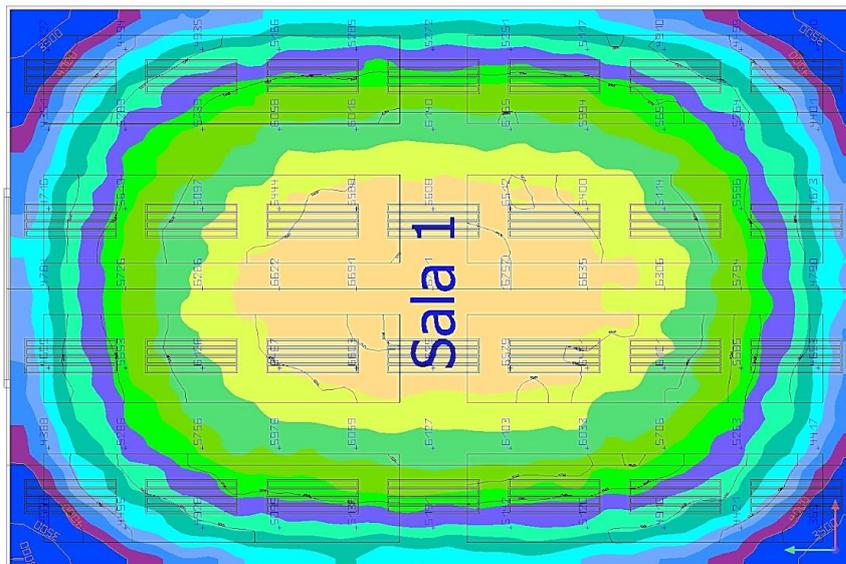
Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Figura 24 - Resultados 5 linhas e 3 colunas de luminárias com 200 W cada



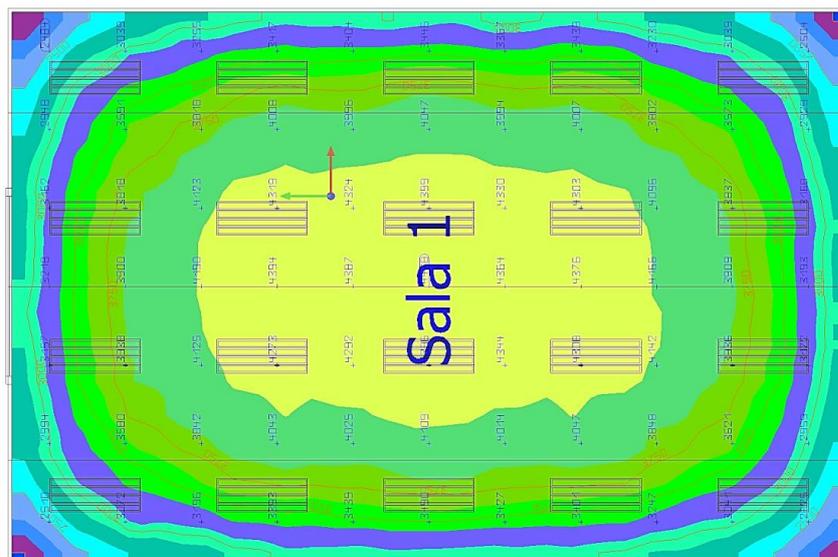
Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Figura 25 - Resultados 7 linhas e 4 colunas de luminárias com 200 W cada



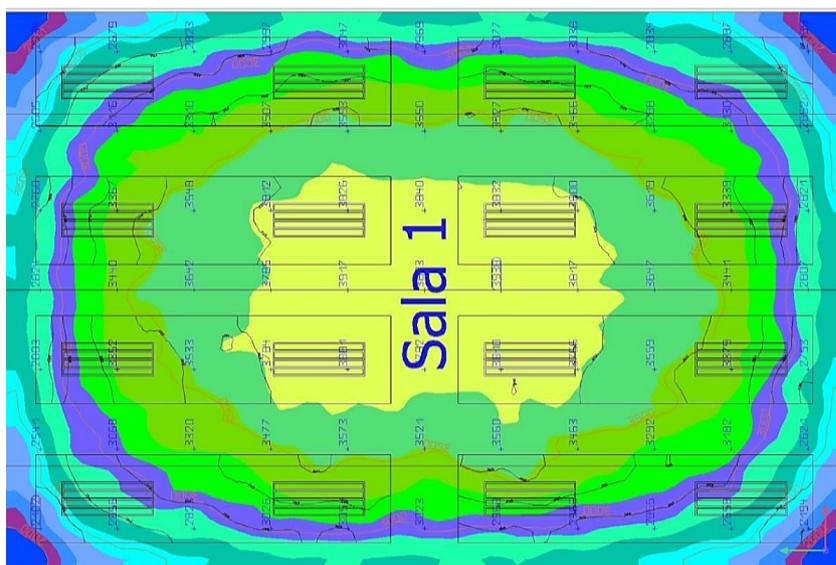
Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Figura 26 - Resultados 5 linhas e 4 colunas de luminárias com 200 W cada



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Figura 27 – Resultados 4 linhas e 4 colunas de luminárias com 200 W cada

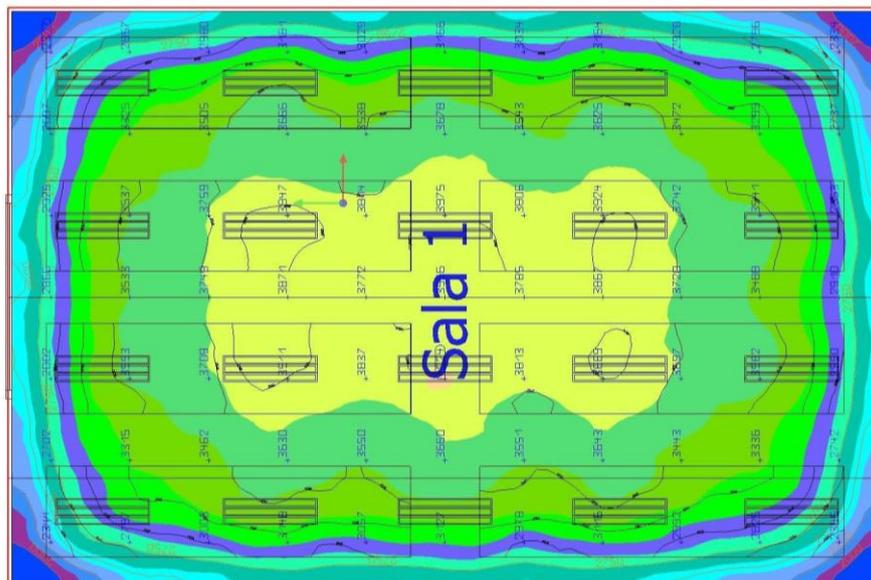


Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Os maiores valores foram observados no cenário com 7 linhas e 4 colunas, onde os valores chegaram a 6.757 lux no centro da casa de vegetação e a 3.740 lux nas extremidades próximas às paredes.

Por fim, em consenso com o fornecedor de luminárias e com o orçamento disponível, um último cenário foi simulado para validação da disposição das luminárias ao longo da casa de vegetação. Este cenário é apresentado na Figura 28. Os resultados demonstrados referem-se a luminárias de 150 W e 15.500 lumens. Entretanto, as que serão instaladas nas casas de vegetação possuirão 130 W, 1,20 m de comprimento e 0,1 m de largura e 18.850 lumens.

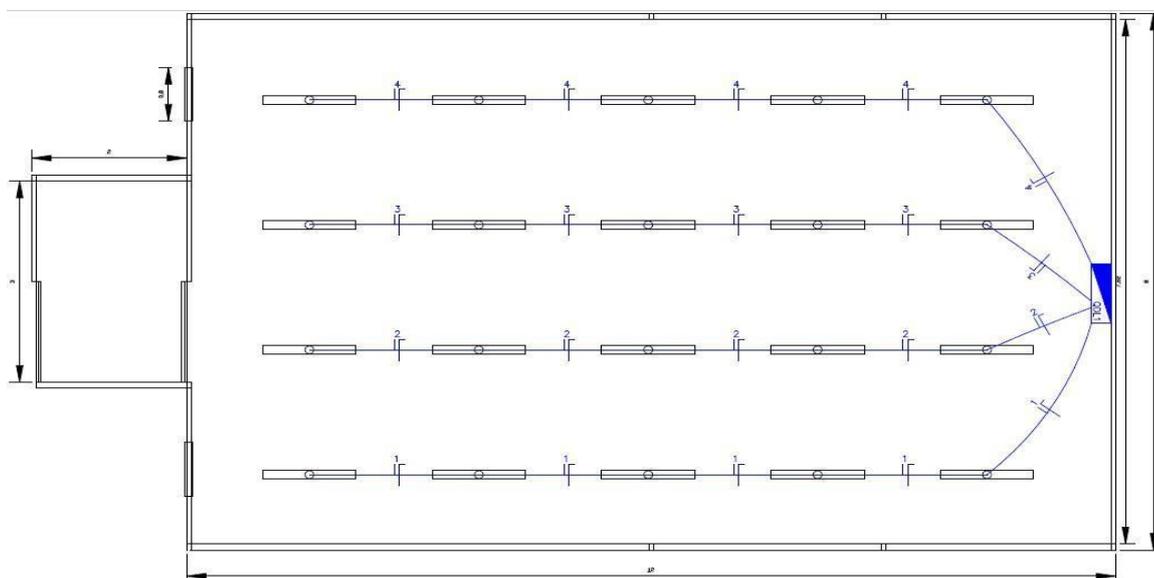
Figura 28 - Simulação do cenário mais próximo ao cenário real



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Como observado na Figura 28, serão instaladas 5 linhas e 4 colunas de luminárias para que elas fiquem centralizadas ao longo das bancadas de apoio das mudas. Também, um esquema elétrico de iluminação foi elaborado. Para cada coluna de luminária foi representado um circuito independente, visto que o acionamento das luminárias será feito por zonas individuais. O esquema elétrico dos circuitos de iluminação é apresentado na Figura 29.

Figura 29 - Esquema elétrico do sistema de iluminação.



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

A potência do sistema de iluminação artificial é de 2,6 kW. Há um circuito elétrico independente para cada linha de 5 luminárias, visto que o acionamento das luminárias é realizado por zonas individuais conforme cultura e tomada de decisão do sistema computacional de inteligência.

O sistema de iluminação artificial desenvolvido e instalado nas casas de vegetação de Alpestre/RS e de Santa Rosa do Sul/SC é composto por 20 luminárias led de 130 W de potência cada, com fluxo luminoso de 13.750 lumens, ângulo de abertura de 120°, vida mediana de 100.000 horas. As luminárias possuem fator de potência de 0,96, índice de reprodução de cor superior a 80, nível de impermeabilidade IP67 e uma faixa de espectro de 450 nm a 650 nm. A Tabela 2 apresenta as características técnicas das lâmpadas que compõem o sistema de iluminação artificial das casas de vegetação inteligentes.

Tabela 2 – Características técnicas das luminárias do sistema de iluminação artificial.

Potência (W)	130
Tensão (V)	85-265
Fluxo Luminoso (lm)	13750
Ângulo de Abertura (°)	120
Vida Mediana (h)	100000
Índice de Reprodução de Cor	> 80
Fator de Potência	0,96
Nível de Impermeabilidade	IP67
Espectro (nm)	450-650

Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

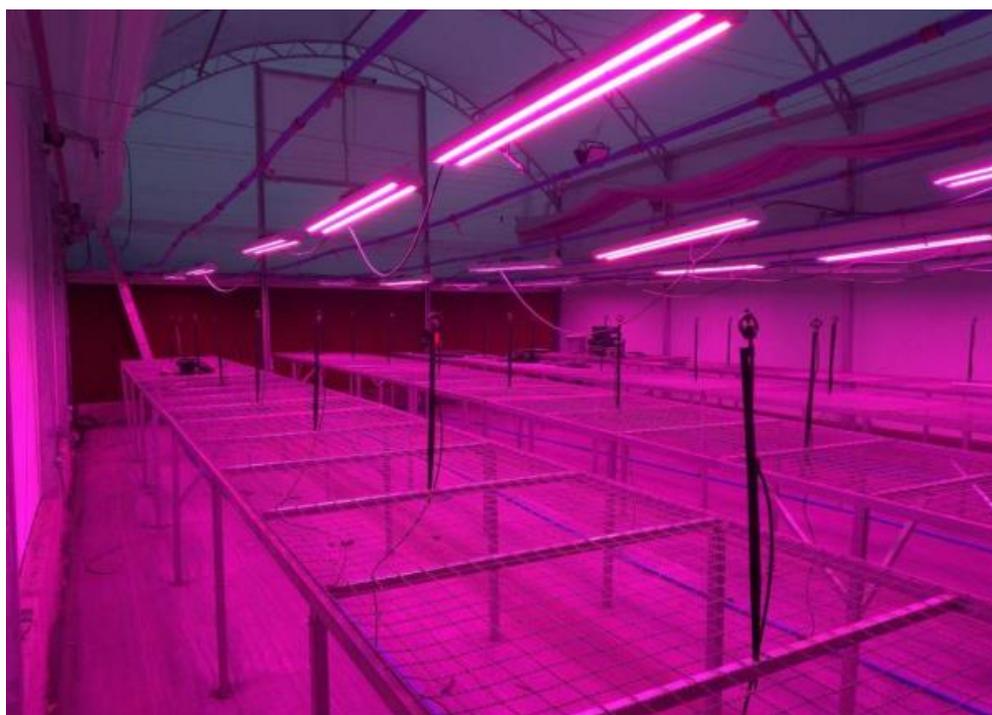
As Figuras 30, 31 e 32 apresentam o sistema de iluminação artificial em funcionamento na casa de vegetação de Santa Rosa do Sul/SC.

Figura 30 – Sistema de iluminação artificial (sistema desligado).



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Figura 31 – Sistema de iluminação artificial (sistema ligado).



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Figura 32 – Sistema de iluminação artificial (vista externa).



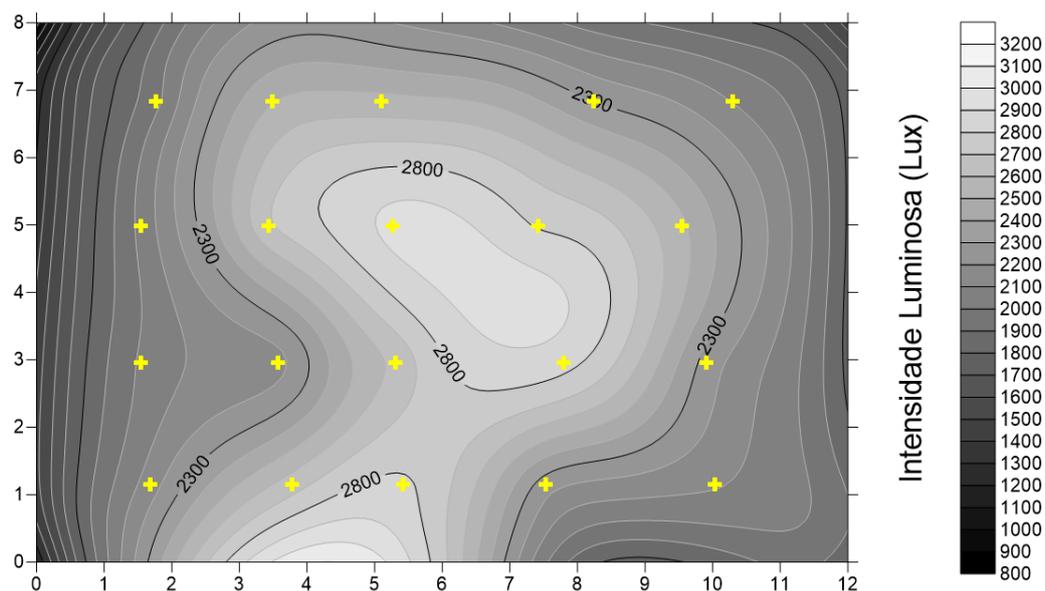
Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

O processamento de dados foi realizado com o auxílio do software *Surfer*, onde foi possível comparar os resultados da intensidade luminosa *in loco* com os resultados obtidos pelo software *Dialux*. As 20 medições foram exportadas do equipamento para um computador onde os dados foram compilados e processados de acordo com as coordenadas de cada ponto medido. As coordenadas foram baseadas na área da casa de vegetação e tomando-se o ponto zero como o vértice esquerdo da parede de exaustores.

Os métodos de interpolação escolhidos foram *Minimum Curvature*, *Radial Base Function* e *Inverse distance to a power*, a fim de experimentar e determinar o melhor modelo de acordo com a quantidade de pontos vizinhos utilizados na interpolação de cada método e de acordo com a percepção visual durante as medições *in loco*.

A Figura 33 a seguir apresenta o mapa da distribuição de intensidade luminosa da casa de vegetação a partir do método *Minimum Curvature*.

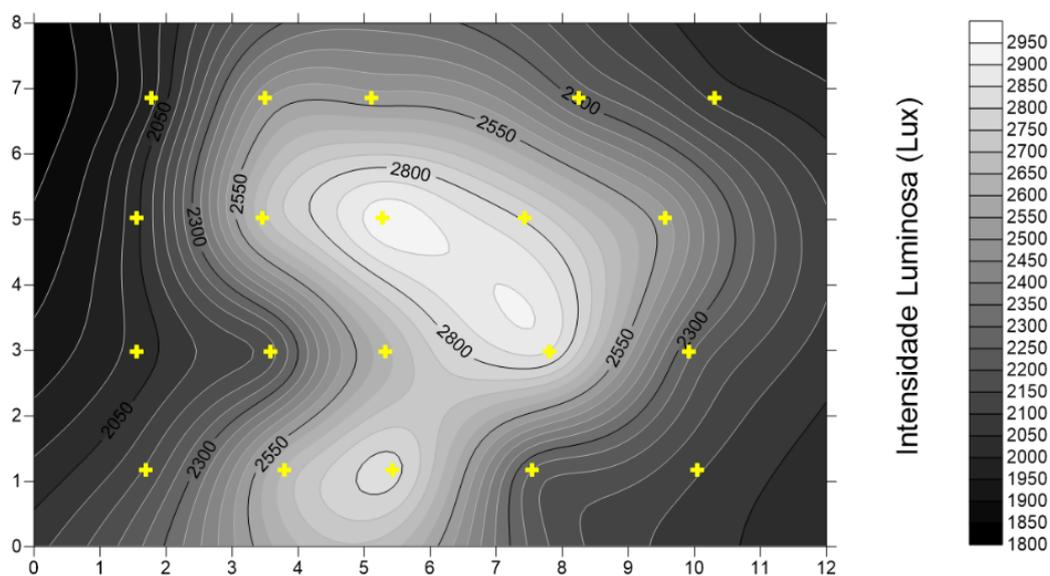
Figura 33 – Mapa da distribuição de intensidade luminosa da casa de vegetação usando o método *Minimum Curvature* com os pontos de medição demarcados.



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

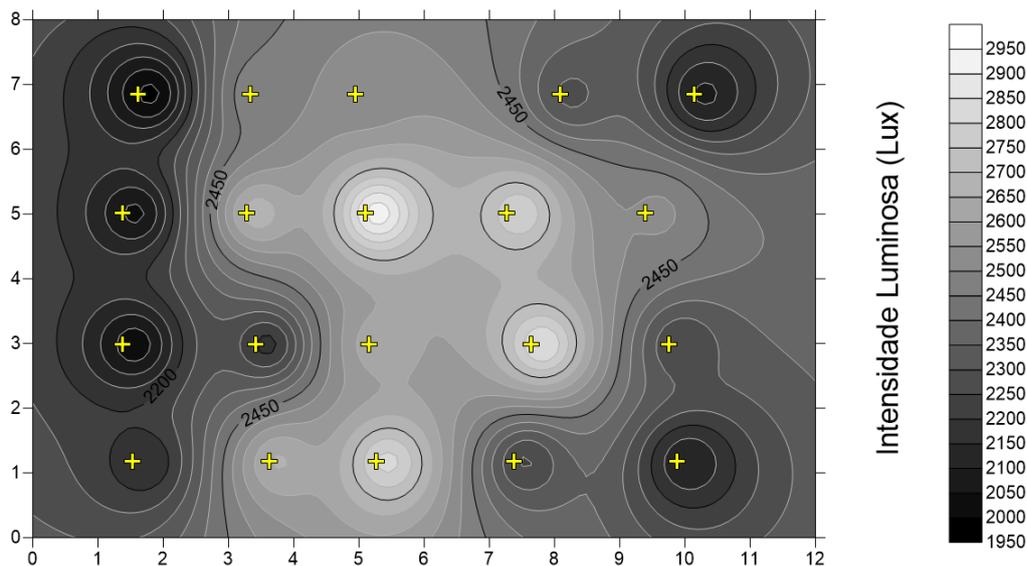
As Figuras 34 e 35 apresentam mapas de distribuição de intensidade luminosa na casa de vegetação a partir de outros métodos de interpolação.

Figura 34 – Método de interpolação *Radial Base Function*.



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Figura 35 – Método de Interpolação *Inverse distance to a power*.



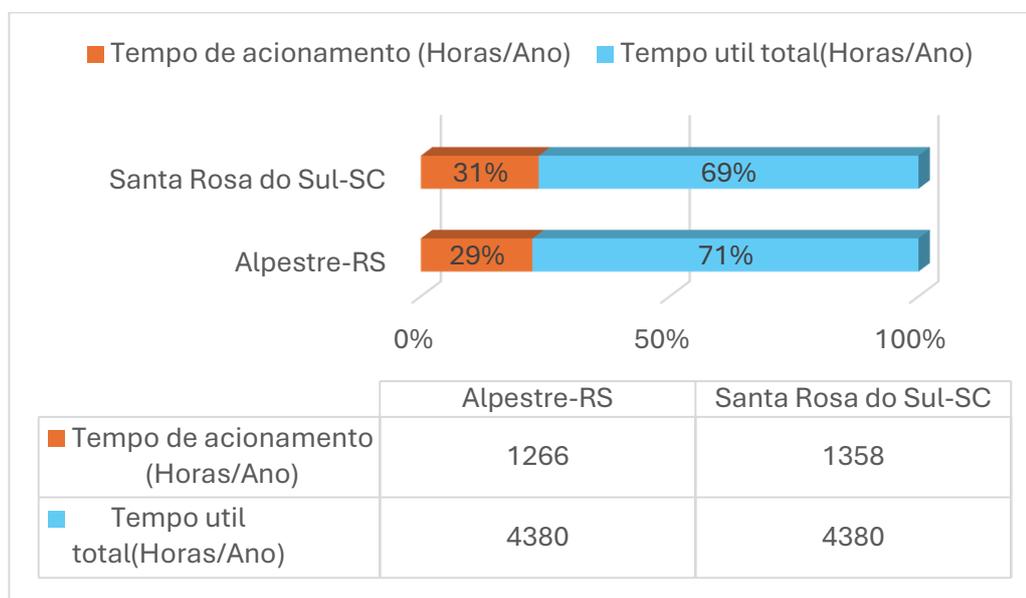
Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Os métodos apresentaram diferenças de intensidade distribuição luminosa entre os métodos, isso se deve justamente aos métodos de interpolação utilizar maior número de vizinhos, e entrelaçá-los para interpolar novos pontos no espaço, dessa forma o método de *Minimum Curvature* foi o mais adequado para a comparação da simulação do *software DiaLux*.

5.2. PERFIL DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

A irradiância solar de referência para acionamento do sistema de iluminação artificial foi de 130 W/m². As Figuras 36 apresenta as relações de período e fotoperíodo em Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS.

Figura 36 – Relação entre o período de acionamento do sistema de iluminação artificial e o fotoperíodo em Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS.



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

O número total de horas em que o sistema de iluminação artificial pode ser acionado é de 4380 h durante o ano. Em Santa Rosa do Sul/SC, o sistema de iluminação artificial aciona as luminárias em 1358 h enquanto em Alpestre/RS o tempo de acionamento é de 1266 h durante o período de um ano. A partir destes valores, é possível estimar o consumo anual de energia elétrica do sistema de iluminação artificial das casas de vegetação de Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS (Tabela 3).

Tabela 3 – Perfil do consumo anual de energia elétrica do sistema de iluminação artificial – método 1.

Dados	Alpestre/RS	Santa Rosa do Sul/SC
Tempo (Horas/ano)	1266,00	1358,00
Potência (W)	130,00	130,00
Nº de Luminárias	20	20
Consumo (kWh/ano)	3291,60	3530,80

Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

O número total de horas em que o sistema de iluminação artificial pode ser acionado é de 4380 h durante o ano. Em Santa Rosa do Sul/SC, o sistema de iluminação artificial aciona as luminárias em 1471 h enquanto em Alpestre/RS o tempo de acionamento é de 1470 h durante o período de um ano. A partir destes valores, é possível estimar o consumo anual de energia elétrica do sistema de iluminação artificial das casas de vegetação de Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS na Tabela 4.

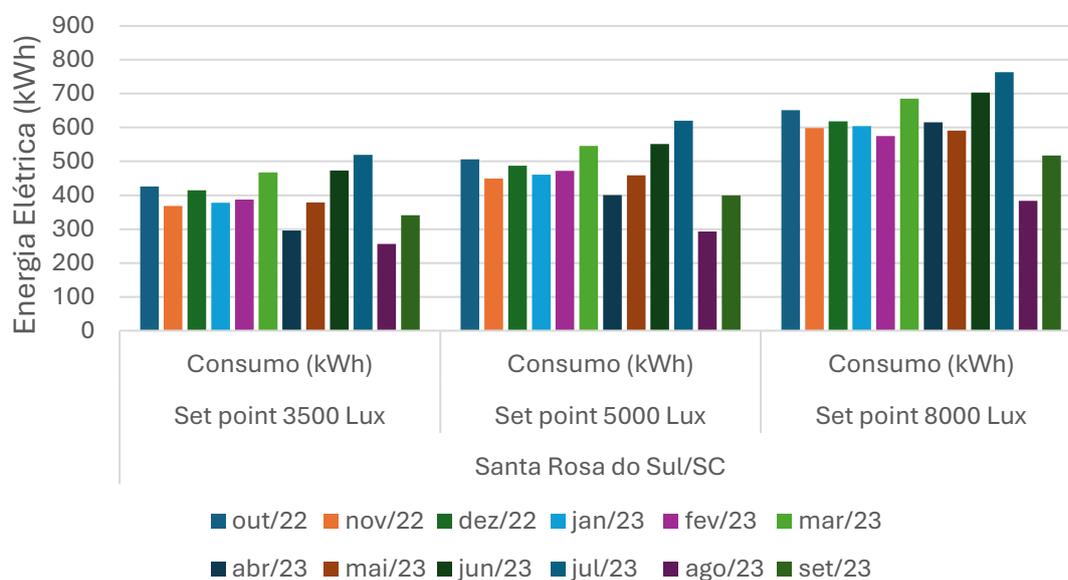
Tabela 4 – Perfil do consumo anual de energia elétrica do sistema de iluminação artificial – método 2.

Dados	Alpestre/RS	Santa Rosa do Sul/SC
Tempo (Horas/ano)	1470,00	1471,00
Potência (W)	130	130
Nº de Luminárias	20	20
Consumo (kWh/ano)	3822,90	3825,14

Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

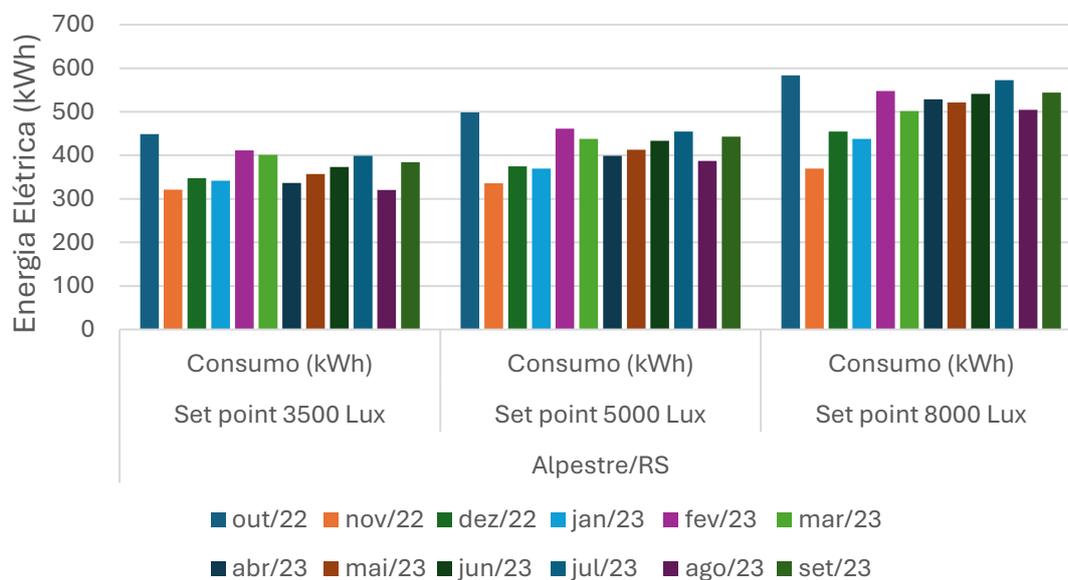
A Figura 37 apresenta o perfil de consumo de energia elétrica do sistema de iluminação artificial da casa de vegetação inteligente de Santa Rosa do Sul/SC considerando o período de um ano entre outubro de 2022 até setembro de 2023. A Figura 38 apresenta o perfil de consumo de energia elétrica do sistema de iluminação artificial da casa de vegetação inteligente em Alpestre/RS considerando o período de um ano, desde o período de operação das casas de vegetação em outubro 2022, até setembro de 2023.

Figura 37 – Perfil de consumo de energia elétrica do sistema de iluminação artificial em Santa Rosa do Sul/SC.



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Figura 39 – Perfil de consumo de energia elétrica do sistema de iluminação artificial em Alpestre/RS.



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Observou-se que os *setpoints* mais altos resultaram em um consumo mais elevado em comparação ao *setpoint* de 3500 lux, as variações entre os meses são referentes a climatologia da região, em meses menos ensolarados ou menor

irradiação houve um aumento no consumo de energia por parte dos sistemas de iluminação.

5.3. SISTEMA FOTOVOLTAICO

A Tabela 5 apresenta a estimativa de geração de energia elétrica mensal para os sistemas fotovoltaicos de Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS. Os dados de irradiação solar para as cidades de Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS foram retirados do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB).

Tabela 5 – Estimativa e geração real de energia elétrica dos sistemas fotovoltaicos de Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS.

Potência 6,37 kW		Santa Rosa do Sul/SC		Alpestre/RS	
		Estimativa	Real	Estimativa	Real
Mês	PR	Energia (kWh)		Energia (kWh)	
Janeiro	0,792	794,73	915,6	912,91	1027,95
Fevereiro	0,788	704,83	765,9	805,45	794,45
Março	0,796	731,92	806,7	852,15	873,05
Abril	0,806	683,53	735	727,29	704,1
Mai	0,817	608,02	654,3	624,46	614,15
Junho	0,824	515,15	611,4	527,8	497,90
Julho	0,821	571,97	575,70	601,33	522,55
Agosto	0,822	663,19	862,28	725,32	825,04
Setembro	0,816	581,04	756	674,82	677
Outubro	0,803	655,74	781,2	819,49	785,2
Novembro	0,794	777,25	741,6	884,37	1076,75
Dezembro	0,793	817,63	832,8	945,43	1097,45
Energia Anual (kWh)		8.105,03	9038,48	9.100,81	9495,59
YF (kWh/kWp)		1.350,84	1418,91	1.516,80	1490,68
Energia Média (kWh/mês)		675,42	751,21	758,4	791,3

Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Pode-se observar na Tabela 5 que o sistema fotovoltaico, apesar de não apresentar o mesmo valor de geração de energia, apresentou valores muito próximos entre estimativa e realidade monitorada experimentalmente via inversor, o que representa uma boa abordagem do método de simulação.

5.4. ANÁLISE QUALITATIVA DAS MUDAS

5.4.1. Bananeiras

Para os parâmetros morfológicos avaliados, diâmetro do pseudocaule, altura do pseudocaule, número de folhas e área foliar, houve diferença nas mudas de bananeiras aclimatadas na SGH em relação a casa de vegetação convencional (Tabela 6).

Tabela 6 - Médias do diâmetro do pseudocaule (mm), altura do pseudocaule (mm), número de folhas e área foliar (cm²), nas mudas de bananeira cv Nanicão Corupá aclimatadas na SGH e CGH.

Ambiente	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Nº de folhas	Área foliar (cm²)
Smart GH	14,82***	95,80***	6,21***	257,9***
Convencional	8,69	65,30	4,77	98,30
CV (%)	7,14	8,72	6,59	15,37
DMS	0,79	6,60	0,34	25,70

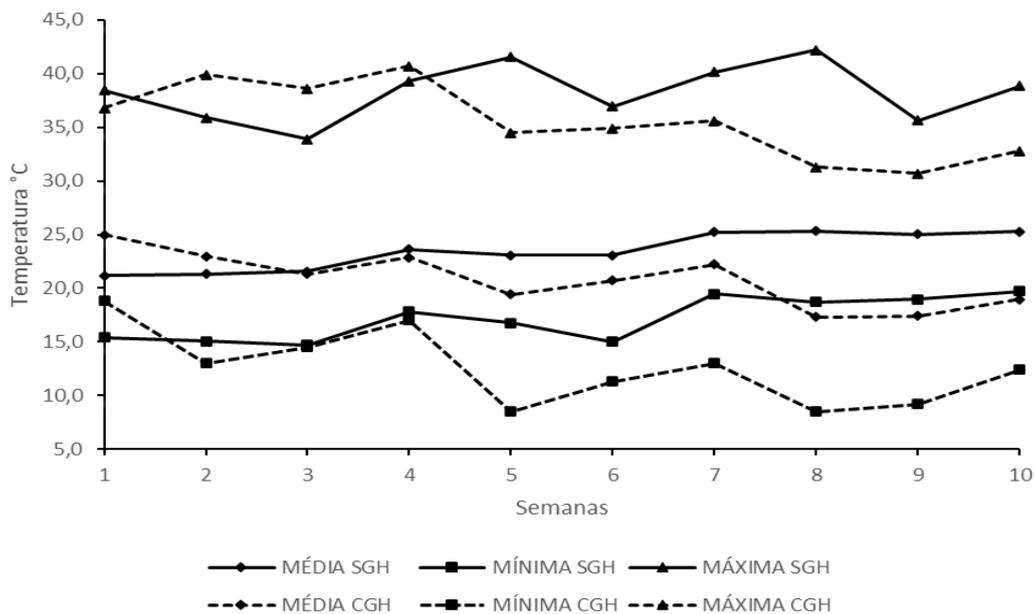
*** Significativo ($p < 0,0001$); ^{CV} coeficiente de variação; ^{DMS} diferença mínima significativa.

Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

O maior desempenho no desenvolvimento das mudas, se deve, principalmente, pelas condições bioclimáticas controladas, como temperatura mais elevada, umidade alta, suplementação luminosa e enriquecimento de CO₂, gerenciados pelo sistema integrado na SGH. Esses parâmetros, estão fortemente relacionados com a maior adaptação das mudas ao ambiente ex vitro, como também potencializam o seu desenvolvimento.

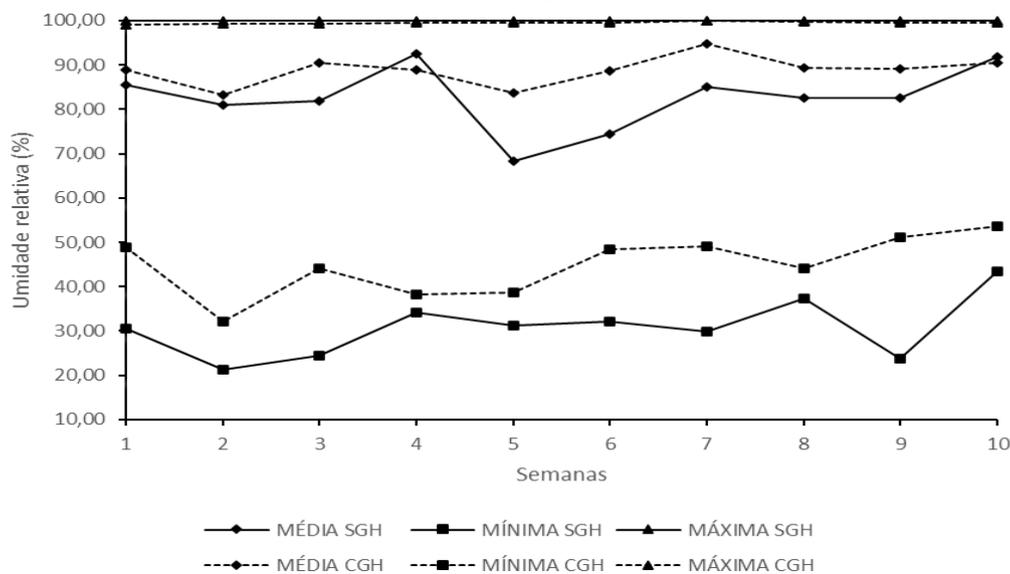
A SGH apresentou temperaturas mais elevadas e melhores condições de umidade (Figura 39 e 40) que somados ao enriquecimento de CO₂ elevaram o ponto de saturação de luz potencializando o desenvolvimento das plantas.

Figura 39 - Temperatura média, mínima e máxima em cada semana da SGH e CGH.



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Figura 40 - Umidade relativa média, mínima e máxima por semana na SGH e CGH.



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

De acordo com Alves (1999), a temperatura considerada ótima para o crescimento das mudas é de 28 °C, com mínima de 18 °C e máxima de 34 °C, sendo esta faixa de amplitude térmica, que se obtém o melhor desenvolvimento das plantas.

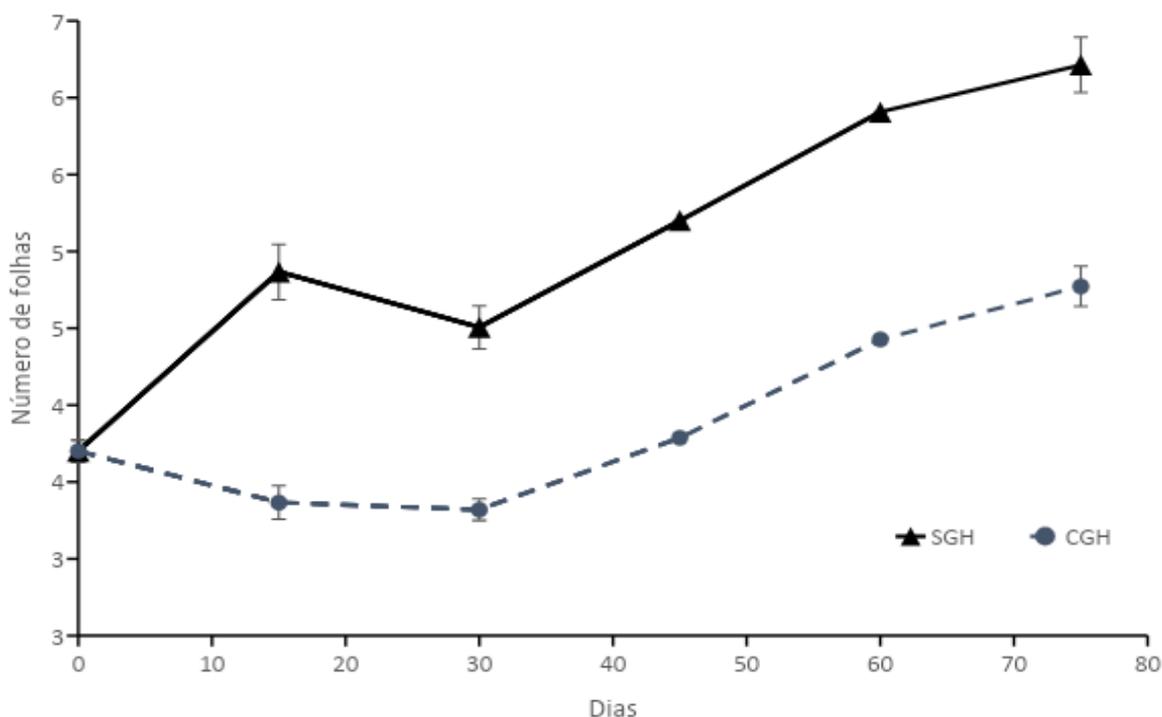
Ainda, pode-se visualizar na Figura 39, que a SGH garantiu que a temperatura mínima ficasse acima da prejudicial às mudas, através do sistema de aquecimento. Alves (1999) relata que temperaturas abaixo de 15 °C a atividade metabólica da bananeira é paralisada e abaixo de 12 °C ocorrem danos nos tecidos foliares.

De acordo com Xin *et al.* (2019), com a maior concentração de CO₂ e temperatura mais elevada, ocorre o aumento do ponto de saturação de luz, ampliando, desta forma, a taxa fotossintética das plantas. Isso ocorre devido à existência de diferentes pontos de saturação de luz, os quais variam conforme a concentração de CO₂ no ambiente, além de uma intensificação na atividade enzimática nas plantas sob temperaturas mais elevadas.

Cabe destacar, que a bananeira é uma planta com metabolismo C3 (Sage e Zhu, 2011). Portanto, a concentração de CO₂ na atmosfera é um dos fatores limitantes da taxa fotossintética, contudo, garantem maior desempenho em ambientes enriquecidos com gás carbônico em comparação a plantas C4, havendo condições de temperatura elevada e alta luminosidade (Ainsworth e Long, 2004; Miri *et al.*, 2012).

Observou-se uma queda no número de folhas nos primeiros 30 dias de aclimação (Figura 41). Isso ocorre devido as plantas eliminarem as folhas desenvolvidas *in vitro*, pouco funcionais, substituindo-as por novas folhas adaptadas às condições *ex vitro*.

Figura 41 - Média do número de folhas avaliadas a cada 15 dias nas mudas de bananeira cv Nanicão Corupá aclimatadas na SGH e CGH.

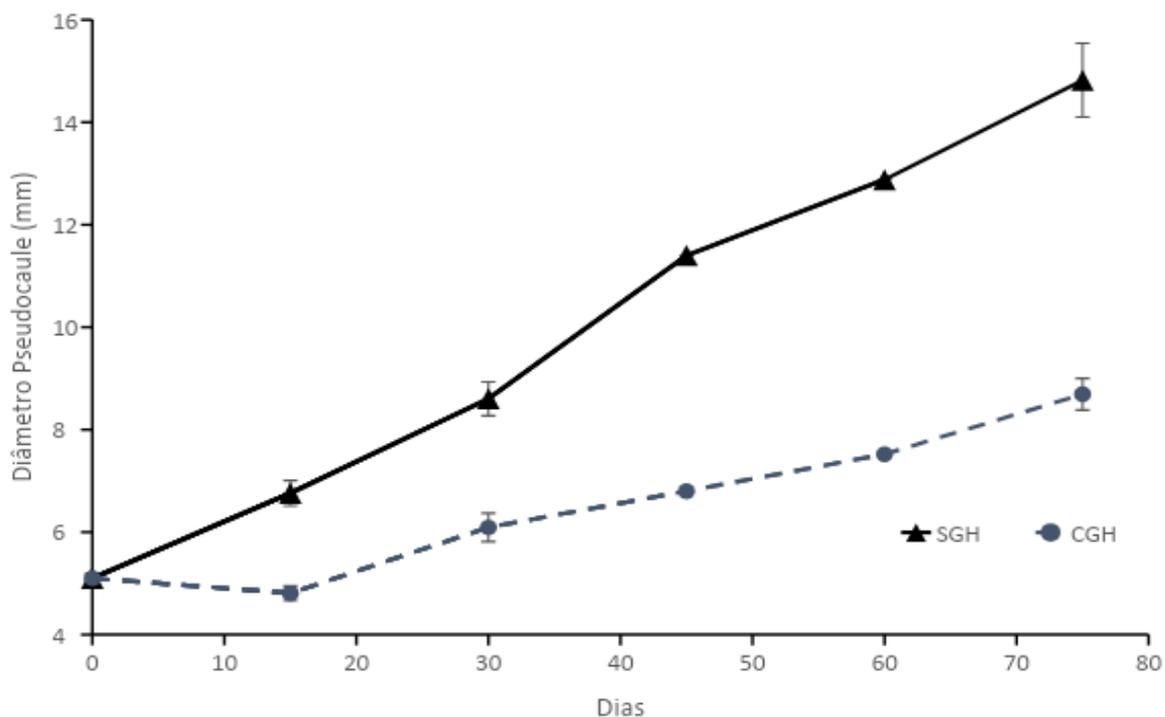


Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Deste modo, havendo condições edafoclimáticas favoráveis, uma planta adulta, emite uma nova folha a cada 7 dias (Medina *et al.*, 1985; Simão, 1998). Evidenciando, desta forma, que o ambiente da SGH proporcionou condições mais propícias para a emissão de folhas, resultando em um aumento médio de 6,2 folhas nas mudas, em contraste com as 4,7 folhas observadas na CGH.

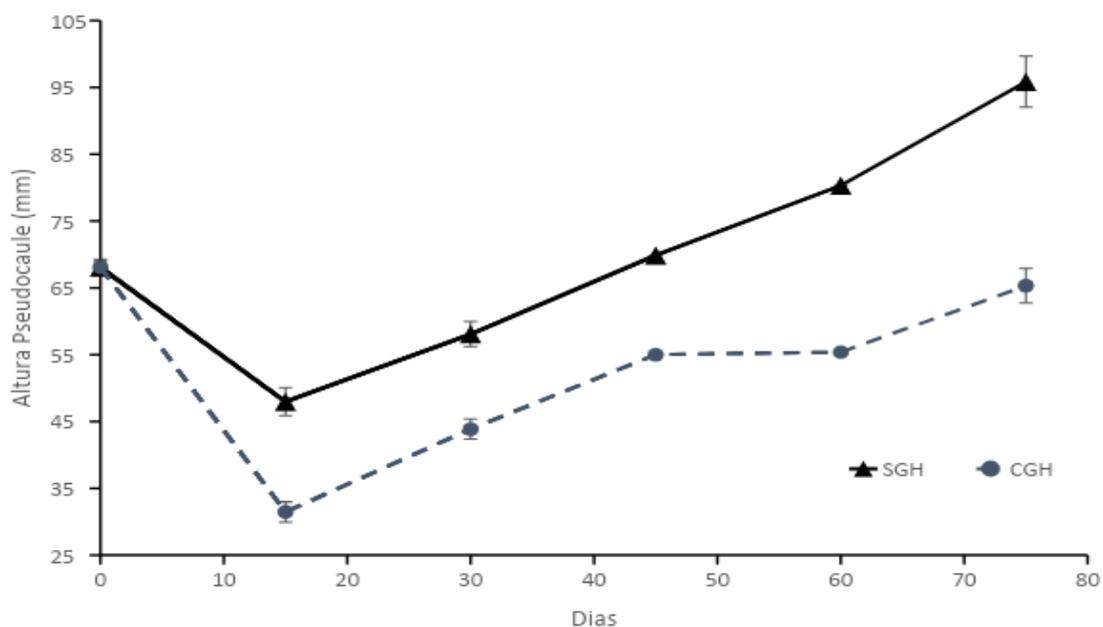
Isso também pode ser notado nos gráficos da Figura 42 e 43, ao analisar os valores médios dos parâmetros de diâmetro do pseudocaule e altura do pseudocaule, onde se destaca uma superioridade de 70,5% e 46,7% respectivamente, em relação às mudas aclimatizadas na CGH aos 75 dias.

Figura 42 - Média do número do diâmetro do pseudocaule (mm) avaliado a cada 15 dias nas mudas de bananeira cv Nanicão Corupá aclimatadas na SGH e CGH.



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Figura 43 - Média da altura do pseudocaule (mm) avaliada a cada 15 dias nas mudas de bananeira cv Nanicão Corupá aclimatadas na SGH e CGH.



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

O diâmetro do pseudocaule está relacionado com a vitalidade das plantas e o armazenamento de reservas, contribuindo para uma maior probabilidade de estabelecimento no campo e superioridade no crescimento inicial das mudas que, por sua vez, resulta em parâmetros agrônômicos mais favoráveis e vantajosos (Roque *et al.*, 2014; Borges *et al.*, 2006; Sousa *et al.*, 2020).

Para as variáveis, massa seca e fresca de parte aérea, massa seca de raiz e teor de água nas plantas (Tabela 7), é notável que as mudas aclimatizadas na SGH, apresentaram médias superiores em comparação com as plantas alocadas na CGH. Para a massa seca da parte aérea a SGH proporcionou um aumento relativo de 548,3% e, considerando a massa seca da raiz, o incremento foi de 718,3%.

Tabela 7 - Médias de massa seca e fresca de parte aérea (g), massa seca de raiz (g) e teor de água nas plantas (%), nas mudas de bananeira cv Nanicão Corupá aclimatadas na SGH e CGH.

*** Significativo ($p < 0,0001$); ^{CV} coeficiente de variação; ^{DMS} diferença mínima significativa.

Ambiente	Massa seca parte aérea (g)	Massa fresca parte aérea (g)	Massa seca raiz (g)	Teor de água na planta (%)
Smart GH	1,59***	13,10***	4,31***	87,91***
Convencional	0,29	4,70	0,60	94,04
CV (%)	26,88	1,99	15,96	1,99
DMS	0,23	1,30	0,50	1,70

Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Esses resultados evidenciam maior desempenho fotossintético das plantas, devido ao aumento significativo na acumulação de massa vegetal durante o período de aclimatização das mudas.

Segundo Larcher (2000), o crescimento da matéria orgânica nas plantas está intimamente ligado à taxa de fotossíntese líquida, que por sua vez, é influenciada pela

disponibilidade de carboidratos e auxinas acumulados, além de requerer um equilíbrio positivo entre a fotossíntese e a respiração.

Portanto, a matéria seca total acumulada pela planta é resultado da fotossíntese líquida, acrescida da incorporação de nutrientes e minerais absorvidos (Rego e Possamai, 2011).

Desta forma, para as variáveis mineralógicas houve diferença entre os tratamentos (Tabela 8). Isso reforça a conclusão de que as mudas aclimatadas na SGH apresentaram um desempenho fotossintético superior, evidenciando uma maior absorção dos macroelementos avaliados.

Tabela 8 - Médias do conteúdo de Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg), expressos em gramas do nutriente na matéria seca total da amostra nas mudas de bananeira cv Nanicão Corupá aclimatadas na SGH e CGH.

Ambiente	N (g)	P (g)	K (g)	Ca (g)	Mg (g)	S (g)
		0,031*		0,107**	0,162***	0,039***
Smart GH	0,408***	**	0,955***	*		
Convencional	0,089	0,005	0,243	0,013	0,027	0,006
CV (%)	30,0	29,9	28,5	37,2	30,5	30,6
DMS	0,070	0,005	0,160	0,021	0,027	0,006

*** Significativo ($p < 0,0001$); ^{CV} coeficiente de variação; ^{DMS} diferença mínima significativa.

Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Para a quantificação dos teores de açúcares totais, redutores e não redutores, houve diferença entre os tratamentos, com os resultados apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Médias do conteúdo de açúcares redutores (g), açúcares não redutores (g) e açúcares totais (g) nas mudas de bananeira cv Nanicao Corupá aclimatadas na SGH e CGH.

Ambiente	Açúcares redutores (g)	Açúcares não redutores (g)	Açúcares totais (g)
Smart GH	5,90***	3,98***	9,91***
Convencional	1,20	0,80	2,03
CV (%)	33,06	29,22	31,28
DMS	1,10	0,66	1,76

*** Significativo ($p < 0,0001$); ^{CV} coeficiente de variação; ^{DMS} diferença mínima significativa.

Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Sabe-se que a qualidade da luz e a radiação, influenciam na morfologia e anatomia foliar das plantas durante seu período de crescimento, especialmente, por se tratar de um órgão com capacidade de ajustar-se às condições impostas pelo ambiente (Martins *et al.*, 2008, Roberto *et al.*, 2015).

Os mesmos autores ainda relatam que a intensidade e a qualidade do espectro, bem como fatores do clima, têm forte influência na morfofisiologia vegetal e no desenvolvimento das plantas.

Desta forma, a interação de todos esses fatores, influenciam no maior acúmulo de carboidratos na massa vegetal, sendo que a produção e o transporte de fotoassimilados dependem, principalmente, da atividade fotossintética que assimila o CO₂ atmosférico em moléculas orgânicas. (Amarante *et al.*, 2007; Henrique *et al.*, 2011; Roberto *et al.*, 2015).

Esses relatos na literatura, corroboram com os resultados obtidos neste trabalho para os teores de açúcares totais, redutores e não redutores, havendo 388,2% (Tabela 9) de superioridade no conteúdo total de açúcares nas mudas aclimatizadas na SGH.

Em relação a quantificação dos pigmentos fotossintéticos, não foram encontradas diferenças significativas entre os índices falker de clorofila a e clorofila

total. O mesmo se repete para os teores de carotenóides, clorofila *a* e clorofila total extraídos em acetona. Entretanto, para os teores de clorofila *b*, foram encontradas diferenças entre os tratamentos em ambos os métodos de quantificação do pigmento (Tabelas 10 e 11).

Tabela 10 - Médias dos índices falker de clorofila *a*, clorofila *b* e clorofila total nas mudas de bananeira cv Nanicão Corupá aclimatadas na SGH e CGH.

Ambiente	IF clorofila <i>a</i>	IF clorofila <i>b</i>	IF clorofila total
Smart GH	387,1	77,6	464,7
Convencional	396,1 ^{ns}	85,9*	482,0 ^{ns}
CV (%)	3,955	8,627	4,665
DMS	14,6	6,6	20,8

*Significativo ($p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p < 0,05$); ^{CV} coeficiente de variação; ^{DMS} diferença mínima significativa.

Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Tabela 11 - Médias dos teores de clorofila *a* ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$), clorofila *b* ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) e clorofila total ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) e carotenóides ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$), extraídos em acetona nas mudas de bananeira cv Nanicão Corupá aclimatadas na SGH e CGH.

Ambiente	Clorofila <i>a</i>	Clorofila <i>b</i>	Clorofila total	Carotenóides
Smart GH	12,2	3,71	16,0	5,34
Convencional	13,2 ^{ns}	4,23*	17,3 ^{ns}	5,39 ^{ns}
CV (%)	13,00	12,17	12,59	11,46
DMS	1,50	0,50	2,00	0,58

*Significativo ($p < 0,05$); ^{ns} não significativo ($p < 0,05$); ^{CV} coeficiente de variação; ^{DMS} diferença mínima significativa.

Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

A luz é um fator de grande relevância para o desenvolvimento das plantas, além disso, as variações na iluminação do ambiente de cultivo provocam adaptações no sistema fotossintético das plantas (Almeida *et al.*, 2004; Rego e Possamai, 2011).

A clorofila *b*, é um pigmento acessório do complexo antena responsável pela absorção de luz nas plantas, sobretudo, ampliando a gama de comprimentos de onda de luz que podem ser captadas em situações de baixa luminosidade (Engel e Poggiani 1991; Taiz e Zeiger 2017).

A presença mais acentuada desse pigmento nas folhas, sugere uma adaptação das plantas a condições de menor intensidade luminosa. Isso foi particularmente observado no tratamento CGH, principalmente, por não dispor de suplementação luminosa em dias nublados, levando as mudas a acumularem maior quantidade de clorofila *b* devido a menor oferta de luz.

Souza *et al.* (2011) também encontrou resultados semelhantes ao avaliar teores de pigmentos fotossintéticos em mudas de guaco (*Mikania laevigata*) em diversos tipos de sombreamento. Rego e Possamai (2006), também verificaram maiores concentrações de clorofila *b*, ao avaliarem o efeito do sombreamento sobre o teor do pigmento em mudas de jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*).

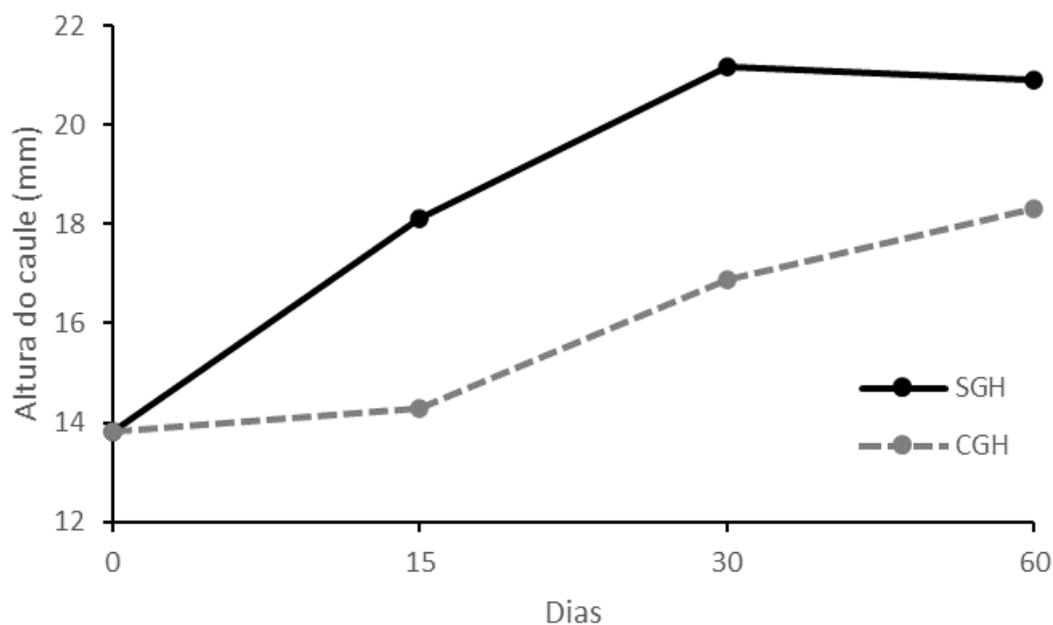
Aos 60 dias após o transplante, as mudas acondicionadas na SGH atingiram 6,2 folhas totalmente expandidas, raízes fibrosas e 8,0 cm de altura e 13,5 mm de diâmetro do pseudocaule, estando, desta forma, aclimatadas e prontas para o plantio a campo.

Deste modo, a SGH reduziu o período de aclimação produzindo mudas de maneira mais rápida e com maior qualidade demonstrando a eficiência do uso das inovações presentes nos processos contidas no sistema SGH.

5.4.2. Orquídeas

A partir dos resultados obtidos realizou-se a confecção de gráficos. Devido as orquídeas apresentarem naturalmente desenvolvimento lento, observa-se que nos primeiros meses de aclimação em ambos os tratamentos as mudas mantiveram crescimento pouco expressivo. Entretanto, na Figura 44 é possível perceber que o tratamento SGH proporcionou melhores condições de desenvolvimento das mudas, evidenciando alturas maiores das plantas.

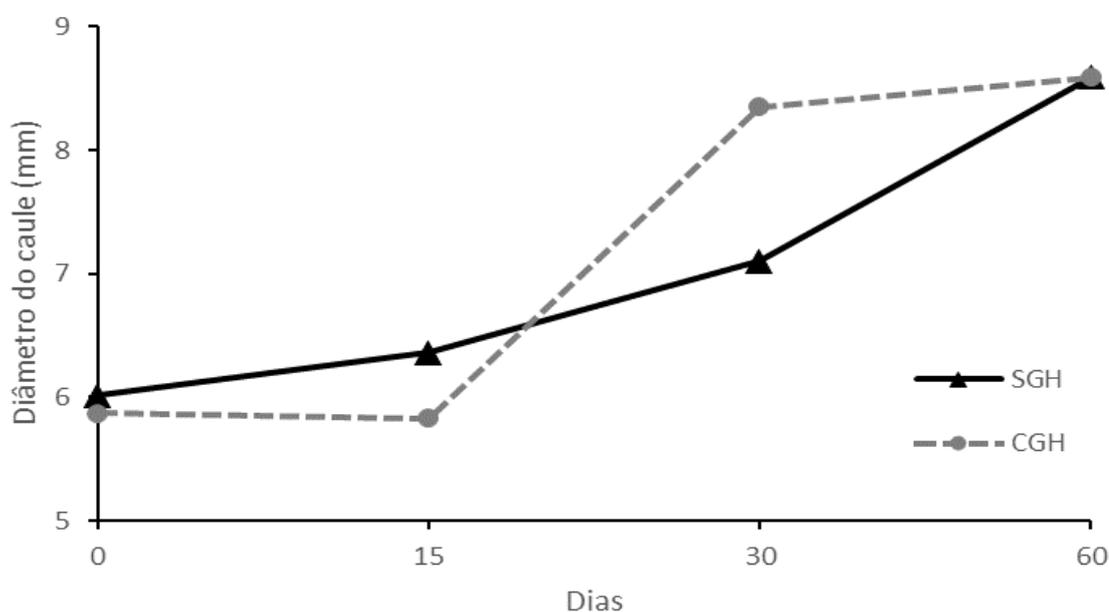
Figura 44 - Médias da altura do caule (mm) das orquídeas *Phalaenopsis* aclimatadas na SGH e CGH.



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

A Figura 45, apresenta o diâmetro do caule, onde para os dois tratamentos não apresentou diferenças para esta variável, tendo em vista o crescimento mais lento das plantas. Neste sentido, para obter resultados mais significativos em diâmetro do caule, é necessário maior período de avaliação das mudas de orquídeas para possivelmente se observar diferenças entre os ambientes quanto aos quesitos vegetativos.

Figura 45 - Diâmetro do caule das mudas de orquídeas *Phalaenopsis* aclimatadas na SGH e CGH.

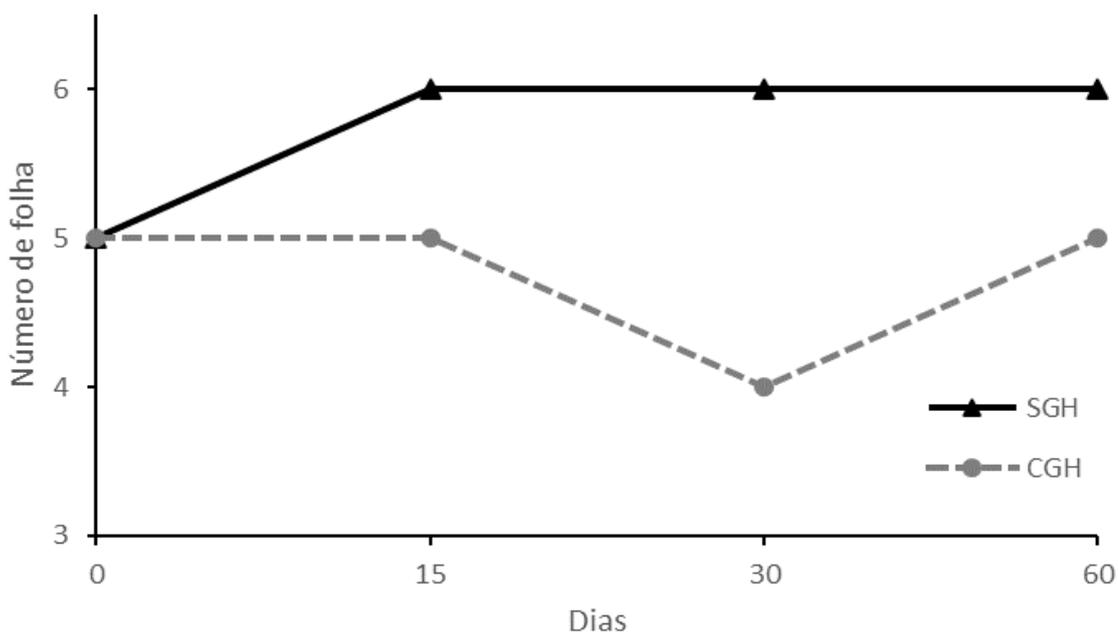


Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Quanto ao número de folhas (Figura 45), percebe-se superioridade nas mudas aclimatadas na SGH, alcançando 6 folhas em contraste a 5 nas mudas alocadas na CGH. O maior desempenho na emissão de folhas das orquídeas, se deve principalmente, pelas melhores condições bioclimáticas oferecidas pela SGH, sobretudo, temperatura, umidade e luminosidade (Figura 39 e 40).

Esses parâmetros não podem ser manipulados na CGH, estando sujeitos às condições fornecidas pelo ambiente externo. O menor desempenho das plantas aclimatadas na CGH, ocorre devido à maior amplitude térmica e às condições desfavoráveis de umidade e luminosidade.

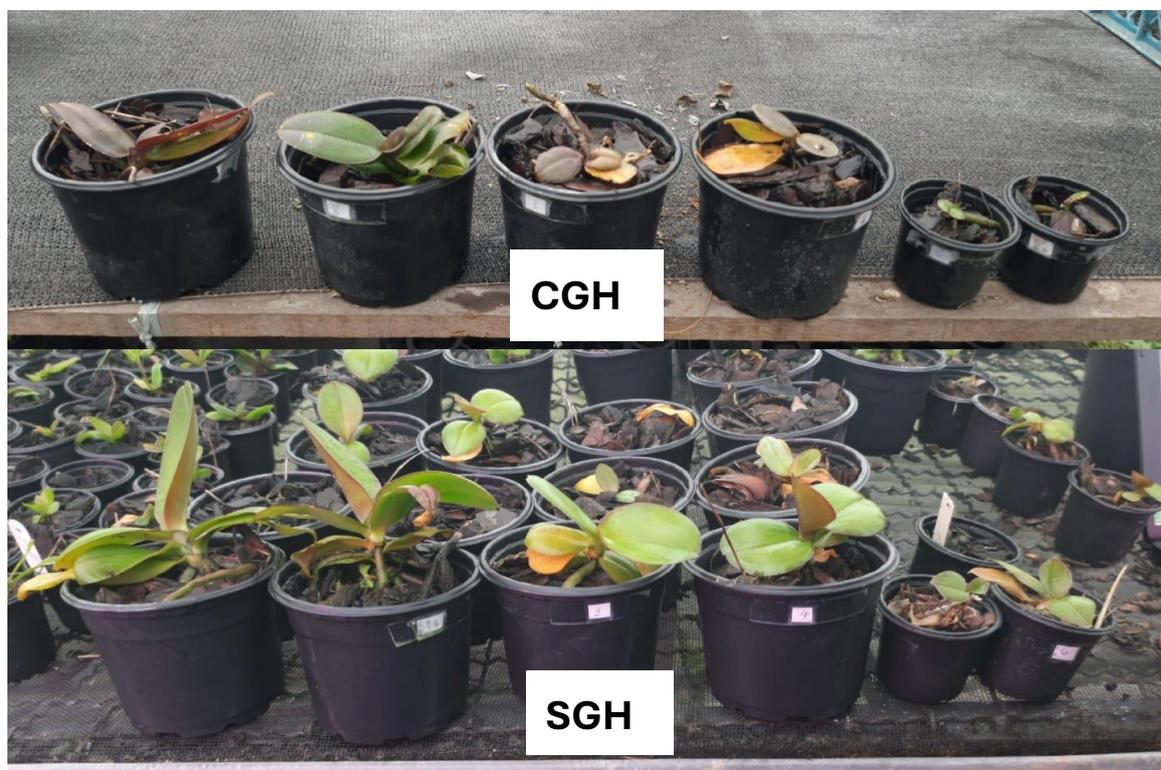
Figura 46 - Média do número de folhas das mudas de orquídeas *Phalaenopsis* aclimatadas na SGH e CGH.



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Selecionaram-se mudas para serem acompanhadas por meio de registros fotográficos ao longo do experimento. A Figura 47 evidencia a diferença entre os tratamentos, as plantas do tratamento SGH apresentam limbo foliar maior e mais vigoroso, além da coloração verde intenso, sendo desejável a menor presença de manchas possível.

Figura 47 - Comparação visual das mudas de orquídeas nos dois tratamentos.



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

Ainda, é possível verificar danos foliares, folhas em senescência e coloração arroxeadas nas mudas aclimatadas na CGH. Estes sintomas, estão relacionados a estresses ocasionados por fatores ambientais, principalmente, pelas baixas temperaturas noturnas. Evidenciado pelo acúmulo de antocianinas, que confere a cor roxa nas folhas, sendo desencadeado pelo mecanismo de defesa das orquídeas em condições de baixas temperaturas.

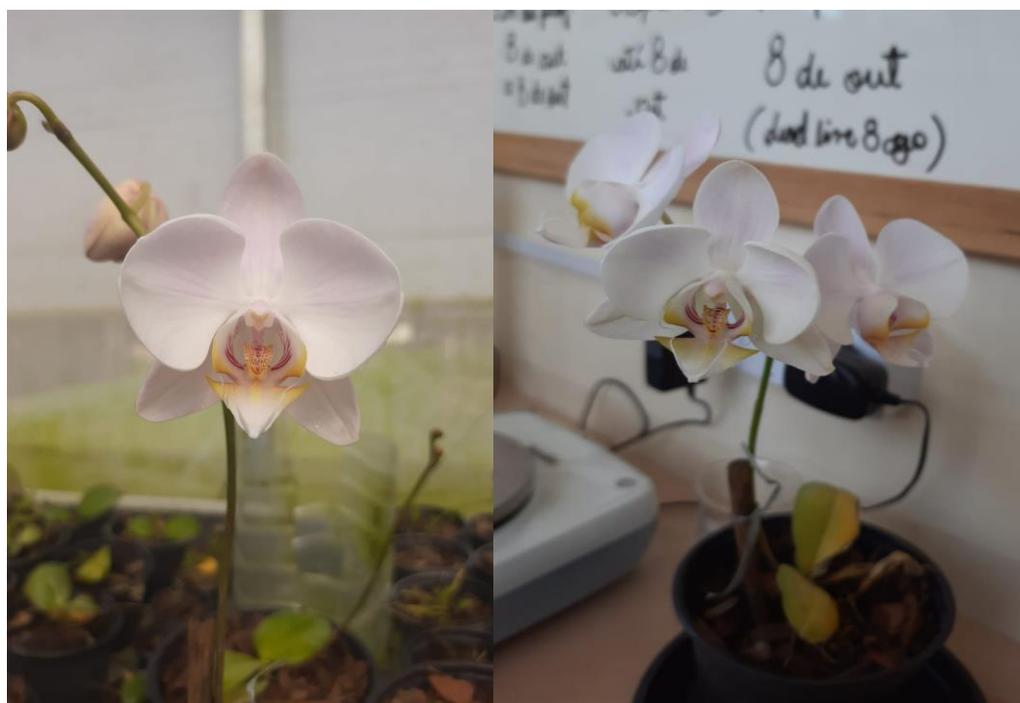
O índice de mortalidade na SGH foi de 14,54%, enquanto na CGH, devido ao baixo controle das variáveis bioclimáticas verificou-se 25,45% das plantas mortas. Ainda se verificou, raízes em maior volume, mais fibrosas e com aspecto mais sadio nas mudas aclimatadas na SGH.

As orquídeas são sensíveis aos estresses hídricos e térmicos, como também, às condições de luminosidade e nutrição mineral, ou seja, fortemente influenciadas pelas condições climáticas, principalmente quanto ao tempo de floração.

Desta forma, as orquídeas transplantadas no período de testes de funcionamento da Smart Greenhouse, também apresentaram ótimos resultados, ficando por um maior período em aclimação.

Mesmo em fase de testes na SGH, onde alguns testes trouxeram condições desfavoráveis, após 8 meses de cultivo ocorreram as primeiras florações (Figura 48). Em estufa convencional, espera-se que as orquídeas apresentem os primeiros botões florais em um período médio de 2 a 3 anos. A redução estimada no tempo de emissão das hastes florais na SGH é de 3 a 4,5 vezes.

Figura 48 - Florescimento das primeiras mudas aclimatadas na Smart Greenhouse em Santa Rosa do Sul.



Fonte: Arquivos do P&D SmartGreenHouse

O tempo de floração das mudas de orquídea, dentre outros fatores, é o mais importante para a comercialização da planta. Com a emissão precoce de flores é possível otimizar o espaço, recursos e o tempo, além do alto valor agregado da comercialização das plantas com flores quando comparadas com a venda de mudas jovens.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e análise de sistemas de iluminação artificial para suplementação de luz visível em casas de vegetação inteligentes, integradas a estratégias bioclimáticas e sistemas agrovoltáticos. A abordagem demonstrou como tecnologias avançadas, como modelagem computacional no software DiaLux, inteligência artificial e geração de energia renovável, podem otimizar o ambiente de cultivo, reduzir o consumo energético e promover maior sustentabilidade no setor agrícola.

Os dados e análises apresentados neste trabalho são provenientes de uma análise documental realizada com base no projeto de pesquisa "Smart Greenhouse", que desenvolveu e implementou casas de vegetação inteligentes para cultivo protegido de mudas de banana e orquídea. Este projeto documentou de forma sistemática o desenvolvimento, implementação e validação de sistemas integrados de controle, automação e energia, fornecendo um conjunto robusto de informações para embasar este estudo.

As medições de distribuição luminosa, realizadas com luxímetro em 20 pontos da casa de vegetação, foram comparadas com os resultados das simulações no software DiaLux. A interpolação pelo método *Minimum Curvature* apresentou os resultados mais homogêneos na intensidade luminosa medida, corroborando com a observação in loco de que não há grandes discrepâncias na distribuição de luz durante o funcionamento das luminárias. No entanto, as comparações indicaram diferenças significativas entre os valores simulados e medidos, tanto na magnitude em lux quanto na distribuição espacial. Essas diferenças foram atribuídas à potência das luminárias instaladas, que foi menor do que a utilizada na simulação, e ao posicionamento assimétrico das luminárias durante a instalação, que não seguiu rigorosamente a geometria definida na modelagem. Apesar dessas discrepâncias, os métodos *Minimum Curvature* e *Radial Basis Function* conseguiram reproduzir uma distribuição luminosa mais homogênea no centro da casa de vegetação, similar à prevista na simulação.

As análises comparativas de crescimento e desenvolvimento das mudas mostraram resultados significativamente superiores nas casas de vegetação inteligentes (SGH) em comparação com as casas convencionais (CGH). Nas mudas de bananeira, o diâmetro do pseudocaule foi 70% maior na SGH, alcançando uma

média de 14,82 mm, contra 8,69 mm na CGH. A altura do pseudocaule também apresentou uma diferença significativa, com média de 95,80 mm na SGH, comparada a 65,30 mm na CGH. A área foliar média das mudas aclimatadas na SGH foi 162% maior, atingindo 257,9 cm², enquanto as mudas na CGH apresentaram média de 98,3 cm². Além disso, o número médio de folhas por planta na SGH foi de 6,21, contra 4,77 na CGH, evidenciando uma maior adaptação e vigor das plantas sob controle automatizado.

Para as orquídeas, os parâmetros avaliados, como número de folhas, altura da planta e diâmetro do caule, também apresentaram melhor desempenho na SGH. O índice de mortalidade das mudas foi reduzido significativamente na SGH devido às condições controladas, de temperatura, umidade e suplementação luminosa, enquanto na CGH, as oscilações ambientais impactaram negativamente o desenvolvimento das plantas.

Os resultados energéticos demonstraram que o sistema de iluminação artificial, acionado em função da irradiância solar, teve um consumo anual de energia de 3530,8 kWh em Santa Rosa do Sul/SC e 3291,6 kWh em Alpestre/RS. Esses valores foram compensados pelo sistema fotovoltaico instalado, que gerou 9038,48 kWh e 9495,59 kWh anuais, respectivamente, destacando a viabilidade energética e a autossustentabilidade das casas de vegetação.

Portanto, este estudo reforça o potencial das casas de vegetação inteligentes como solução tecnológica para a agricultura de precisão e sustentável. A integração entre sistemas agrovoltáticos, iluminação artificial e estratégias bioclimáticas comprovou ser eficiente tanto para o aumento da produtividade quanto para a redução do impacto ambiental. Futuras pesquisas podem explorar a aplicação desse modelo em outras culturas e condições climáticas, ampliando os benefícios dessa tecnologia para diferentes contextos agrícolas.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Normativa nº NBR15215, de novembro de 2004. Iluminação Natural – Parte 4: Verificação Experimental das Condições de Iluminação Interna de Edificações – Método de Medição. Rio de Janeiro, RJ.
- ACHOUR, Y.; OUAMMI, A.; ZEJLI, D.** Technological progresses in modern sustainable greenhouses cultivation as the path towards precision agriculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 147, p. 111251, 26 set. 2022.
- AGARWAL, A.; DUTTA GUPTA, S. D.** Impact of Light-Emitting Diodes (LEDs) and its potential on plant growth and development in controlled environment plant production systems. *Current Biotechnology*, v. 1, n. 1, p. 28-43, 2016.
- AINSWORTH, Elizabeth A.; LONG, Stephen P.** What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE). A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist*, v. 165, n. 2, p. 351-372, 18 nov. 2004. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2004.01224.x.
- ALMEIDA, Luciano Pessoa de; ALVARENGA, Amauri Alves de; CASTRO, Evaristo Mauro de; ZANELA, Silvia Mara; VIEIRA, Carlos Vinício.** Crescimento inicial de plantas de *Cryptocaria aschersoniana* Mez. submetidas a níveis de radiação solar. *Ciência Rural*, v. 34, n. 1, p. 83-88, fev. 2004. DOI: 10.1590/s0103-84782004000100013.
- ALVES, Élio José.** A cultura da banana: aspectos técnicos, socioeconômicos e agroindustriais. Brasília, DF: Embrapa, 1999.
- AMARANTE, Cassandro Vidal Talamini do; STEFFENS, Cristiano André; MOTA, Clenilso Sehnem; SANTOS, Henrique Pessoa dos.** Radiação, fotossíntese, rendimento e qualidade de frutos em macieiras 'Royal Gala' cobertas com telas antigranizo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 42, n. 7, p. 925-931, jul. 2007. DOI: 10.1590/s0100-204x2007000700003.
- ANDRADE, R. S. DE et al.** Light-emitting diodes (LEDs) in development and response to water stress in *Eucalyptus benthamii* seedlings (Myrtaceae). *Ciência Rural*, v. 53, n. 11, p. e20220365, 2023.

- BODACH, S.; LANG, W.; HAMHABER, J.** Climate responsive building design strategies of vernacular architecture in Nepal. *Energy and Buildings*, v. 81, p. 227–242, 1 out. 2014.
- BORGES, Ana Lúcia et al.** A cultura da banana. 3. ed. rev. e amp. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2006. 110 p. (Coleção Plantar, 56).
- ÇAKIR, U.; ŞAHIN, E.** Using solar greenhouses in cold climates and evaluating optimum type according to sizing, position and location: A case study. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 117, p. 245–257, 1 set. 2015.
- CHEN, Chiachung; LIN, Rey-Song.** CO₂ uptake patterns in *Phalaenopsis amabilis*. *African Journal of Agricultural Research*, v. 7, n. 1, p. 128-141, 5 jan. 2012. DOI: 10.5897/ajar11.1221.
- COLIN, Sílvio.** Uma introdução à arquitetura. 7. ed. Rio de Janeiro: Jaguaritica, 2019. 212 p.
- COSTA, Gilberto José Correa da.** Iluminação Econômica: cálculo e avaliação. 4. ed. Porto Alegre: Edipuc-Rs, 2006.
- CUCE, E.; HARJUNOWIBOWO, D.; CUCE, P. M.** Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 64, p. 34–59, 1 out. 2016.
- ENGEL, V. L.; POGGIANI, F.** Estudo da concentração de clorofila nas folhas e seu espectro de absorção de luz em função do sombreamento em mudas de quatro espécies florestais nativas. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, v. 3, n. 1, p. 39-45, 1991.
- FANWOUA, J. et al.** Supplemental LED lighting affects the dynamics of tomato fruit growth and composition. *Scientia Horticulturae*, v. 256, p. 108571, 15 out. 2019.
- GAMEZ, R. et al.** Screening, plant growth promotion and root colonization pattern of two rhizobacteria (*Pseudomonas fluorescens* Ps006 and *Bacillus amyloliquefaciens* Bs006) on banana cv. Williams (*Musa acuminata* Colla). *Microbiological Research*, v. 220, p. 12-20, mar. 2019. DOI: 10.1016/j.micres.2018.11.006.
- GUIMARÃES, I. A. B.** Análise e dimensionamento de sistema de iluminação artificial com LEDs para suplementação luminosa no cultivo de *Humulus lupulus*. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2017. 100 p. Trabalho de Conclusão de Curso.

HENRIQUE, Paôla de Castro et al. Aspectos fisiológicos do desenvolvimento de mudas de café cultivadas sob telas de diferentes colorações. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 46, n. 5, p. 458-465, maio 2011. DOI: 10.1590/s0100-204x2011000500002.

JENSEN, M. H. Controlled environment agriculture in deserts, tropics, and temperate regions - A world review. *International Society for Horticultural Science*, 2002.

KERSLAKE, N.; SHUANG, S. Asia's rise of indoor agriculture industry. Newbean Capital, jan. 2016. Disponível em: https://agfundernews.com/wp-content/uploads/2016/01/The-Rise-of-Asias-Indoor-Agriculture-Industry-White-Paper_FinalProtected.pdf. Acesso em: 31 maio 2023.

KOFFI, Marie Chantal; DECLERCK, Stéphane. In vitro mycorrhization of banana (*Musa acuminata*) plantlets improves their growth during acclimatization. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, v. 51, n. 3, p. 265-273, 5 maio 2015. DOI: 10.1007/s11627-015-9666-0.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. Eficiência energética na arquitetura. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras, 20---. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/apostilas/eficiencia_energetica_na_arquitetura.pdf. Acesso em: 26 set. 2022.

LARCHER, W. Ecofisiologia vegetal. São Carlos: RiMa Artes e Textos, 2000. 531 p.

LICHTENTHALER, Hartmut. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. [S.l.]: Copyright, 1987. 382 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira de Potassa e do Fósforo, 1997. 319 p.

MALDONADE, Iriani R.; CARVALHO, Patrícia G. B.; FERREIRA, Nathalie A. Protocolo para determinação de açúcares totais em hortaliças pelo método de DNS. Brasília, DF: Embrapa, 2013.

MASSARO, Raquel et al. Light quality in vitro growth and acclimatization of two varieties of *Phalaenopsis amabilis alba* Blume (Orchidaceae). *Iheringia, Série Botânica*, v. 73, n. 2, p. 208-215, 11 jan. 2018. DOI: 10.21826/2446-8231201873113.

- MEDINA, Júlio Cezar et al.** Banana: cultura, matéria-prima, processamento e aspectos econômicos. Campinas: Ital, 1985. 302 p.
- MELLO, B. F. F. R. DE et al.** Suplementação de radiação fotossinteticamente ativa na formação de mudas de manjeriço. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 9, p. e138996694, 2020.
- MIRI, Hamid Reza et al.** The impact of elevated CO₂ on growth and competitiveness of C₃ and C₄ crops and weeds. *European Journal of Experimental Biology*, v. 4, n. 2, p. 1144-1150, fev. 2012.
- MOHAGHEGHI, A.; MOALLEM, M.** Intelligent spectrum controlled supplemental lighting for daylight harvesting. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 17, n. 5, p. 3263–3272, 2022.
- MOBTAKER, H. G. et al.** Solar energy conservation in greenhouse: Thermal analysis and experimental validation. *Renewable Energy*, v. 96, p. 509–519, 1 out. 2016.
- MONTEIRO NETO, J. L. L. et al.** Produção de mudas de pimentão (*Capsicum annuum* L.) em diferentes ambientes e substratos. *Agrária*, v. 11, n. 4, p. 289-297, 2016.
- PALHA, G. M. de.** Iluminação artificial em horticultura protegida: uso de LEDs. INIAV I.P., 2020.
- PARNKLANG, J. et al.** Daytime solar greenhouse plant light spectrum control system. *2021 6th International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE)*, p. 135–138, 16 abr. 2021.
- PAWLÓWSKA, B.; ŻUPNIK, M.; SZEWCZYK-TARANIEK, B.; CIOĆ, M.** Impact of LED light sources on morphogenesis and levels of photosynthetic pigments in *Gerbera jamesonii* grown in vitro. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, v. 59, n. 1, p. 115-123, 2018.
- PEREIRA, Marlon Cristian Toledo et al.** Aclimatização de mudas micropropagadas de bananeira sob diferentes condições de luminosidade. *Brasc. Frutic.*, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 238-240, ago. 2005.
- REGO, G. M.; POSSAMAI, E.** Efeito do sombreamento sobre o teor de clorofila e crescimento inicial do jequitibá-rosa. *Pesquisa Florestal Brasileira*, n. 53, p. 179, 2011.
- ROBERTO, Guilherme Garcia et al.** Variação da fotossíntese e dos teores de carboidratos induzidos por etefom e déficit hídrico na fase de maturação da cana-

de-açúcar. *Bragantia*, v. 74, n. 4, p. 379-386, 15 set. 2015. DOI: 10.1590/1678-4499.0062.

ROQUE, Rafaella de Lima et al. Desempenho agrônômico de genótipos de bananeira no recôncavo da Bahia. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 36, n. 3, p. 598-609, set. 2014. DOI: 10.1590/0100-2945-361/13.

SAGE, R. F.; ZHU, X.-G. Exploiting the engine of C4 photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*, v. 62, n. 9, p. 2989-3000, 1 maio 2011. DOI: 10.1093/jxb/err179.

SILVA, Raphael Reis da. Relações da irradiância com o crescimento e compostos fenólicos em plantas de *Moringa oleifera*. 2018. 59 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/handle/1/29413>. Acesso em: 17 out. 2022.

SIMÃO, Salim. Tratado de fruticultura. Piracicaba: Fealq, 1998. 760 p.

SOUSA, Bruno Teixeira de; ZUCARELI, Valdir; MARTINS, Andréia Paula Carneiro. Quantificação de açúcares totais e auxina no desenvolvimento inicial de mini-toletes de cana-de-açúcar. *Colloquium Agrariae*, Presidente Prudente - SP, v. 16, n. 3, p. 94-103, maio 2020.

SOUZA, Girlene Santos de et al. Teores de pigmentos fotossintéticos, taxa de fotossíntese e estrutura de cloroplastos de plantas jovens de *Mikania laevigata* cultivadas sob malhas coloridas. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 32, p. 1843-1854, 6 dez. 2011. DOI: 10.5433/1679-0359.2011v32suplp1843.

TAIZ, Lincoln; ZEIGER, Eduardo. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TEIXEIRA, D. L. Messias et al. Suplementação luminosa aplicada ao cultivo de hortaliças. Repositório UFSM, 2022.

XIN, Pingping et al. Optimization and control of the light environment for greenhouse crop production. *Scientific Reports*, v. 9, n. 1, p. 1-13, 17 jun. 2019. DOI: 10.1038/s41598-019-44