



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

Chaiane Caroline Stalter

**Análise de Estratégias Bioclimáticas e Sistemas de Energia Aplicado à Casas
de Vegetação Inteligentes: Estudo de Caso no Sul do Brasil**

Araranguá
2025

Chaiane Caroline Stalter

**Análise de Estratégias Bioclimáticas e Sistemas de Energia Aplicado à Casas
de Vegetação Inteligentes: Estudo de Caso no Sul do Brasil**

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 Engenheira de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli

Araranguá

2025

Stalter, Chaiane Caroline

Análise de Estratégias Bioclimáticas e Desempenho Energético de Casas de Vegetação Inteligentes no Âmbito do P&D ANEEL Smart Greenhouse / Chaiane Caroline Stalter ; orientador, Giuliano Arns Rampinelli, 2025.

86 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá,
Graduação em Engenharia de Energia, Araranguá, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia de Energia. 2. Estufas inteligentes. 3. Estratégias Bioclimáticas. 4. Eficiência Energética. 5. Agricultura Sustentável. I. Rampinelli, Giuliano Arns. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Energia. III. Título.

Chaiane Caroline Stalter

Análise de Estratégias Bioclimáticas e Sistemas de Energia Aplicado à Casas de Vegetação Inteligentes: Estudo de Caso no Sul do Brasil

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), Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Leonardo Elizeire Bremermann, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Thayane Lodete Bilésimo, Dra.
Pesquisadora PosAutomação

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

Prof^a. Kátia Cilene Rodrigues Madruga, Dra.
Coordenadora do Curso

Prof. Giuliano Arns Rampinelli, Dr.
Orientador

Chaiane Caroline Stalter

Autora

Araranguá, 24 de junho de 2025.

AGRADECIMENTOS

Com profunda gratidão, expresso meu reconhecimento à minha família — meus pais Vilmar e Lenir, minha irmã Carline, meu cunhado Andrius e meu companheiro Daniel. Obrigada pelo amor e apoio incondicionais, incentivo constante, paciência e, sobretudo, pela compreensão diante das ausências e dos desafios ao longo desta jornada acadêmica.

Aos amigos e colegas, agradeço pelo companheirismo, pelas palavras de apoio, pelas conversas e pela parceria nos estudos. Em especial, às minhas amigas Luiza, pelas risadas compartilhadas e por estar, literalmente, ao meu lado nos dias mais intensos, e Diandra, que há mais de uma década me ensina a ver a vida com leveza e bom humor. Também à minha companheira felina, Margot, que com seu olhar sereno e gestos simples, trouxe paz aos dias agitados e foi presença constante nos bastidores desta jornada.

Aos professores Marcelo Zannin da Rosa, Tiago Elias Allievi Frizon e Giuliano Arns Rampinelli, agradeço por me proporcionarem a oportunidade de participar de projetos de extensão e pesquisa. Essas experiências foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico e pessoal, ampliando horizontes e fortalecendo minha trajetória.

À minha equipe de estágio, especialmente ao meu gestor Rafael e ao meu líder Israel, agradeço a oportunidade concedida e por todo o conhecimento compartilhado ao longo dessa experiência.

Estendo também minha gratidão à Universidade Federal de Santa Catarina, ao Instituto Federal Catarinense, à Foz do Chapecó Energia S.A., à CSC Energia, à Agência Nacional de Energia Elétrica e à Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária. O apoio e a colaboração de cada uma dessas instituições foram essenciais para a concretização deste estudo — sem essa parceria, sua realização não teria sido possível.

“Você não pode controlar todos os eventos que acontecem com você, mas pode decidir não ser reduzido por eles.”

Maya Angelou

RESUMO

A intensificação da produção agrícola, aliada aos desafios impostos pelas mudanças climáticas e à crescente demanda por práticas sustentáveis, tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias para ambientes de cultivo protegido. Nesse contexto, as casas de vegetação inteligentes, ou *Smart Greenhouses* (SGH), destacam-se como soluções inovadoras ao integrarem estratégias de arquitetura bioclimática, automação e sistemas de eficiência energética, promovendo a otimização das condições ambientais para o cultivo de plantas de alto valor agregado. Este trabalho teve como objetivo principal avaliar o desempenho termoenergético, arquitetônico e agrônômico de duas casas de vegetação inteligentes implantadas nos municípios de Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS, no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL (P&D ANEEL). A pesquisa envolveu o dimensionamento e a modelagem termoenergética das estruturas, o desenvolvimento e integração de sistemas fotovoltaicos, bem como a implementação de sistemas automatizados de monitoramento e controle ambiental baseados em lógica *fuzzy*. Além disso, foram conduzidos experimentos comparativos com o cultivo de mudas micropropagadas de bananeiras e orquídeas em ambientes convencional e inteligente, permitindo a análise das condições bioclimáticas, da eficiência energética e dos efeitos sobre o desenvolvimento das culturas. A abordagem metodológica adotou técnicas de modelagem computacional, monitoramento em tempo real, análise de desempenho energético e avaliações morfológicas e fisiológicas das mudas. Os procedimentos adotados propiciaram melhor desenvolvimento das plantas, em relação diâmetro altura do pseudocaule e número de folhas em menor período, além da redução de mortalidade. A pesquisa contribui para o avanço do conhecimento sobre a aplicação de tecnologias inteligentes e sustentáveis na agricultura protegida, alinhando-se às diretrizes da Agenda 2030 da ONU e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente no que se refere à inovação, segurança alimentar e uso eficiente de recursos naturais.

Palavras-chave: estufas inteligentes; eficiência energética; agricultura sustentável.

ABSTRACT

The intensification of agricultural production, coupled with the challenges posed by climate change and the growing demand for sustainable practices, has driven the development of technologies for protected cultivation environments. In this context, Smart Greenhouses (SGH) stand out as innovative solutions by integrating bioclimatic architecture strategies, automation, and energy efficiency systems, promoting the optimization of environmental conditions for the cultivation of high value-added plants. The main objective of this work was to evaluate the thermoenergetic, architectural, and agronomic performance of two smart greenhouses implemented in the municipalities of Santa Rosa do Sul/SC and Alpestre/RS, within the scope of the ANEEL Research and Development Program (P&D ANEEL). The research involved the sizing and thermoenergetic modeling of the structures, the development and integration of photovoltaic systems, as well as the implementation of automated environmental monitoring and control systems based on fuzzy logic. In addition, comparative experiments were conducted with the cultivation of micropropagated banana and orchid seedlings in conventional and smart environments, allowing the analysis of bioclimatic conditions, energy efficiency, and the effects on crop development. The methodological approach adopted computational modeling techniques, real-time monitoring, energy performance analysis, and morphological and physiological evaluations of the seedlings. The adopted procedures provided better plant development, in terms of pseudostem height diameter and number of leaves in a shorter period, in addition to reducing mortality. The research contributes to the advancement of knowledge on the application of intelligent and sustainable technologies in protected agriculture, aligning with the guidelines of the UN 2030 Agenda and the Sustainable Development Goals, especially regarding innovation, food security, and efficient use of natural resources.

Keywords: *Smart Greenhouses*; energy efficiency; sustainable agriculture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3 - Diferentes geometrias de estufas.....	24
Figura 4 – Parede Trombe com diferentes configurações.....	30
Figura 5 - Matriz elétrica brasileira em abril de 2025.....	34
Figura 6 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.....	36
Figura 7 - Vista em perspectiva da casa de vegetação.....	38
Figura 8 - Trajetória solar.....	40
Figura 9 – Exemplo de <i>boxplot</i> e informações.....	41
Figura 10 – Perfil de temperatura do ar em Araranguá/SC.....	42
Figura 11 – Perfil de temperatura do ar em Torres/RS.....	42
Figura 12 - Comportamento da umidade relativa em Araranguá/SC.....	43
Figura 13 - Comportamento da umidade relativa em Torres/RS.....	44
Figura 14 - Velocidade do vento em Araranguá/SC.....	44
Figura 15 - Velocidade do vento em Torres/RS.....	45
Figura 16 - Direção do vento em Araranguá/SC.....	45
Figura 17 - Direção do vento em Torres/RS.....	46
Figura 18 - Radiação solar global em Araranguá/SC.....	47
Figura 19 - Radiação solar global em Torres/RS.....	47
Figura 20 - Perfil de temperatura do ar em Chapecó/SC.....	48
Figura 21 - Perfil de temperatura do ar em Frederico Westphalen/RS.....	48
Figura 22 - Comportamento da umidade relativa em Chapecó/SC.....	49
Figura 23 - Comportamento da umidade relativa em Frederico Westphalen/RS.....	50
Figura 24 - Velocidade do vento em Chapecó/SC.....	50
Figura 25 - Velocidade do vento em Frederico Westphalen/RS.....	51
Figura 26 - Direção do vento em Chapecó/SC.....	52
Figura 27 - Direção do vento em Frederico Westphalen/RS.....	52
Figura 28 - Radiação solar global em Chapecó/SC.....	53
Figura 29 - Radiação solar global em Frederico Westphalen/RS.....	53
Figura 30 - Modelagem da versão v1 da casa de vegetação.....	55
Figura 31 - Modelagem da versão v2 da casa de vegetação.....	56
Figura 32 - Modelagem da versão v3 da casa de vegetação.....	57
Figura 33 - Sistema de iluminação para fotoperíodo.....	59
Figura 34 - Esquema elétrico do sistema de iluminação para fotoperíodo.....	60

Figura 35 - Sistema de abertura e estação meteorológica em Alpestre/RS.....	65
Figura 36 - Cortina de aluminet e forro móvel.	66
Figura 37 - Parede úmida de celulose.....	67
Figura 38 – Exaustores.	68
Figura 39 - Sistema de aquecimento.....	69
Figura 40 - Sistema de iluminação instalado: vista interna.	70
Figura 41 - Sistema de iluminação instalado: vista externa.	70
Figura 42 – Vista externa da estufa.....	71
Figura 43 - SFCR de Santa Rosa do Sul/SC.....	72
Figura 44 - SFCR de Alpestre/SC.	72
Figura 45 - Mudanças de bananeiras transplantadas em fase de aclimação.	76
Figura 46 - Temperatura média, mínima e máxima em cada semana da SGH e CGH.	77
Figura 47 - Umidade relativa média, mínima e máxima por semana na SGH e CGH.	77
Figura 48 - Média do número de folhas avaliadas a cada 15 dias nas mudas de bananeira aclimatadas na SGH e CGH.....	78
Figura 49 - Média do número do diâmetro do pseudocaule (mm) avaliado a cada 15 dias nas mudas de bananeira aclimatadas na SGH e CGH.....	79
Figura 50 - Média da altura do pseudocaule (mm) avaliada a cada 15 dias nas mudas de bananeira aclimatadas na SGH e CGH.....	79
Figura 51 - Comparativo das mudas de bananeiras cultivadas em CGH e SGH.	80
Figura 52 - Mudanças micropropagadas de <i>Phalaenopsis</i> no dia 0 de aclimação.....	81
Figura 53 - Médias da altura do caule (mm) das orquídeas <i>Phalaenopsis</i> aclimatadas na SGH e CGH.....	82
Figura 54 - Diâmetro do caule das mudas de orquídeas <i>Phalaenopsis</i> aclimatadas na SGH e CGH.....	82
Figura 55 - Média do número de folhas das mudas de orquídeas <i>Phalaenopsis</i> aclimatadas na SGH e CGH.....	83
Figura 56 - Comparativo das mudas de orquídeas cultivadas em CGH e SGH.	84
Figura 57 - Florescimento das primeiras mudas aclimatadas na <i>Smart Greenhouse</i> em Santa Rosa do Sul.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros e condições de contorno para cada Zona Bioclimática	22
Tabela 2 - Irradiação solar de Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS.....	62
Tabela 3 - Estimativa de geração de energia elétrica mensal do sistema fotovoltaico.	63
Tabela 4 - Resultados da simulação termo energética das casas de vegetação.....	68
Tabela 5 - Estimativa e geração real de energia elétrica dos sistemas fotovoltaicos.	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CFC	Clorofluorcarboneto
CGH	<i>Conventional Greenhouses</i>
FAPEU	Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFC	Instituto Federal Catarinense
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PR	<i>Performance Ratio</i>
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado À Rede
SGH	<i>Smart Greenhouses</i>
SIRE	Secretaria de Inteligência e Relações Estratégicas
TMY	<i>Typical Meteorological Year</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UR	Umidade Relativa
YF	<i>Performance Factor</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	OBJETIVO GERAL	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1	CULTIVO PROTEGIDO: EVOLUÇÃO DAS ESTUFAS E ESTRATÉGIAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	18
3.2	ARQUITETURA E ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS	20
3.2.1	Estratégias passivas	23
3.2.1.1	<i>Geometria da estrutura</i>	23
3.2.1.2	<i>Orientação solar</i>	25
3.2.1.3	<i>Seleção de Materiais</i>	25
3.2.1.4	<i>Gerenciamento das aberturas</i>	28
3.2.1.5	<i>Sistemas de sombreamento</i>	28
3.2.1.6	<i>Isolamento térmico</i>	29
3.2.1.7	<i>Aquecimento passivo</i>	29
3.2.2	Estratégias ativas	31
3.2.2.1	<i>Sistema de resfriamento evaporativo</i>	31
3.2.2.2	<i>Sistema de aquecimento ativo</i>	32
3.2.2.3	<i>Sistema de iluminação artificial</i>	33
3.3	SISTEMA FOTOVOLTAICO E APLICAÇÃO NO CULTIVO PROTEGIDO .	34
3.4	OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	35
4	MATERIAIS E MÉTODOS	37
4.1	CONFIGURAÇÃO ESTRUTURAL DA CASA DE VEGETAÇÃO	38
4.2	ORIENTAÇÃO SOLAR	39
4.3	LEVANTAMENTO CLIMÁTICO E ESTRATÉGIAS ARQUITETÔNICAS ...	40
4.4	MODELAGEM E SIMULAÇÃO	54
4.4.1	Modelagem	54
4.4.2	Simulação	57
4.5	SISTEMA DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL	58
4.6	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	60
4.7	DEFINIÇÃO DAS CULTURAS A SEREM IMPLEMENTADAS	64

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1	ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS PASSIVAS.....	65
5.2	ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS ATIVAS.....	66
5.3	SISTEMA FOTOVOLTAICO	71
5.4	ANÁLISE QUALITATIVA E COMPARATIVA DAS MUDAS	75
5.4.1	Mudas de bananeiras	75
5.4.2	Mudas de orquídeas	81
6	CONCLUSÃO	86
7	PRODUÇÕES CIENTÍFICAS E TECNOLÓGICAS DERIVADAS DO PROJETO	88
8	REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

A produção de mudas e plantas em ambientes controlados é uma prática que remonta à Antiguidade, mas que hoje enfrenta novos desafios devido às mudanças climáticas, ao aumento da demanda por alimentos e à necessidade de práticas agrícolas mais sustentáveis. (KERSLAKE e SHUANG, 2016). Nesse cenário, as *Smart Greenhouses* (SGH) surgem como uma solução inovadora, integrando tecnologias de eficiência energética, automação e energias renováveis para criar ambientes otimizados ao cultivo, superando limites das *Conventional Greenhouses* (CGH). (AHAMED; GUO; TANINO, 2019). Essas estruturas representam uma evolução na agricultura protegida, combinando princípios de agricultura de precisão, sustentabilidade e controle ambiental avançado. (BENKE e TOMKINS, 2017).

Este estudo, vinculado ao projeto *Smart Greenhouse*, fundamenta-se no conceito de que as casas de vegetação inteligentes são sistemas projetados para otimizar parâmetros ambientais cruciais ao desenvolvimento vegetal. Ao superar as limitações sazonais da agricultura tradicional, essas estruturas proporcionam um ambiente estável e favorável ao crescimento durante todo o ano. (ACHOUR; OUAMMI; ZEJLI, 2021).

A arquitetura bioclimática aplicada a essas estufas segue a carta bioclimática de Givoni (1992), adaptada para condições brasileiras por Goulart, Lamberts e Firmino (1998), e dividindo-se em estratégias passivas e ativas. As estratégias passivas visam a orientação solar e geometria da estrutura, materiais inovadores e sistemas naturais de ventilação, como *windcatchers*. (AHAMED; GUO; TANINO, 2019; CUCE; HARJUNOWIBOWO; CUCE, 2016; GHOLEM *et al.*, 2020).

Já as estratégias ativas incluem tecnologias como resfriamento evaporativo, aquecimento por tubulações ou energia solar e iluminação LED (*Light Emitting Diode*) com espectro ajustável, influenciando em processos fisiológicos como floração e frutificação. (CUI *et al.*, 2018; AHAMED; GUO; TANINO, 2018; MASSA *et al.*, 2008).

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2023a), a integração com sistemas fotovoltaicos complementa essas soluções, promovendo sustentabilidade energética. Essa abordagem sistêmica, que combina estratégias passivas, ativas e geração renovável, demonstra o potencial transformador das *Smart Greenhouses* na agricultura moderna. (MANZANO-AGUGLIANO *et al.*, 2015).

Nesse contexto, a modelagem torna-se uma ferramenta valiosa para simulações, baseando-se em condições reais e dados experimentais, permitindo a realização de ajustes para aumentar a produtividade, reduzir perdas, melhorar a qualidade e tornar o cultivo mais eficiente e previsível. (CUI *et al.*, 2018; LA NOTTE *et al.*, 2020).

Além disso, os avanços proporcionados pelas *Smart Greenhouses* também dialogam com a Agenda 2030 da ONU (Organização das Nações Unidas), contribuindo para diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Essas estufas inteligentes se destacam especialmente ao elevar a produtividade de forma sustentável, produzir energia limpa por meio da integração com sistemas fotovoltaicos e pela eficiência no uso de água e nutrientes. Ainda, a tecnologia apresenta sinergias com parte dos ODS, evidenciando como soluções tecnológicas aplicadas à agricultura podem impulsionar o desenvolvimento sustentável em múltiplas dimensões. (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2025; EMBRAPA, 2025).

Dessa forma, as *Smart Greenhouses* mostram-se um modelo replicável, que alia a produtividade e sustentabilidade, respondendo aos desafios globais de segurança alimentar e se consolidando como uma alternativa promissora para o futuro da agricultura. Nesse sentido, este estudo avalia seu desempenho no cultivo de mudas de bananeiras e orquídeas em Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS, considerando o desenvolvimento das plantas, o consumo energético e a viabilidade econômica.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar como o ambiente controlado e a arquitetura bioclimática das *Smart Greenhouses* influenciam o desenvolvimento de mudas, com ênfase na análise das soluções estruturais adotadas e estratégias de eficiência.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Compactuando com o objetivo geral descrito anteriormente, os específicos são:

- a) Modelar e simular o desempenho termoenergético da casa de vegetação, considerando as estratégias bioclimáticas aplicadas;
- b) Dimensionar e integrar o sistema fotovoltaico para suprimento das demandas energéticas da casa de vegetação inteligente;
- c) Investigar a contribuição dos sistemas energéticos para a redução do consumo de energia nas casas de vegetação;
- d) Analisar o consumo e a geração de energia elétrica, avaliando a eficiência energética do sistema;
- e) Comparar o desenvolvimento morfológico e fisiológico das mudas de bananeiras e orquídeas em ambientes de cultivo convencional e inteligente;
- f) Avaliar a influência das estratégias bioclimáticas e do sistema automatizado de controle de variáveis no desempenho agrônomo e energético das casas de vegetação.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentado o referencial teórico utilizado para o desenvolvimento dessa pesquisa.

3.1 CULTIVO PROTEGIDO: EVOLUÇÃO DAS ESTUFAS E ESTRATÉGIAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Estufas, ou casas de vegetação, são construções projetadas para possibilitar o controle de fatores essenciais ao desenvolvimento das plantas, como a radiação solar, a temperatura do ar, a umidade relativa, a intensidade da luz e a concentração de dióxido de carbono. Esse controle tem como principal objetivo otimizar o crescimento das culturas, garantindo alta produtividade durante todo o ano, independentemente das condições climáticas externas, com maior controle climático e redução de perdas. (ACHOUR; OUAMMI; ZEJLI, 2021; SILVA; SILVA; PAGIUCA, 2014).

É possível cultivar diversos híbridos de orquídeas *Phalaenopsis* em estufas convencionais, iniciando com uma fase juvenil que é relativamente longa, variando de 6 a mais de 24 meses a partir do transplante de plantas micropropagadas jovens, dependendo da variedade e do híbrido. Após a fase vegetativa, que pode durar até 24 meses sob temperaturas de 28/26°C, as plantas são submetidas a um tratamento de resfriamento para indução floral e, em seguida, passam pela fase de acabamento. Assim, o tempo total para a floração em estufas convencionais pode se estender por um longo período, alinhando-se à estimativa de 2 a 3 anos (PARADISO; DE PASCALE, 2014; PARADISO; MAGGIO; PASCALE, 2012).

Outro cultivo que pode ser aplicado é a de banana da variedade Nanicão Corupá, que de acordo com a CEASA/SC (Central de Abastecimento de Santa Catarina, 2019) é cultivada em regiões subtropicais como Corupá-SC, e apresenta um ciclo de desenvolvimento e frutificação influenciado pelas condições climáticas locais. Embora não haja um tempo exato do plantio à floração, a colheita do cacho após a floração pode levar até 240 dias (aproximadamente 8 meses) na região de Corupá.

Adicionalmente, a mesma touceira de banana Nanicão Corupá pode demorar até 14 meses para produzir um novo cacho para colheita, refletindo a adaptação da planta ao clima e relevo da região. (CEASA/SC, 2019). O cultivo em regiões

subtropicais pode apresentar desafios, mas a banana Nanicão de Corupá é reconhecida por suas características de sabor e doçura, que são influenciadas pelas baixas temperaturas e índices de radiação solar durante o inverno e início da primavera. (DIAS FILHO, 2015).

A evolução das estufas levou ao surgimento de sistemas modernos e tecnológicos, partindo de estruturas apenas cobertas para verdadeiros complexos produtivos, capazes de conduzir a agricultura de forma eficiente e com custos reduzidos: as *Smart Greenhouses*. (ACHOUR; OUAMMI; ZEJLI, 2021).

As estufas modernas incorporam distintos graus de automação e gestão de variáveis climáticas, integrando tanto mecanismos passivos quanto ativos de aquecimento e resfriamento. Aliadas a sistemas automatizados de cultivo, as casas de vegetação viabilizam produções agrícolas rentáveis ao longo de todas as estações. Contudo, a manutenção das condições ambientais internas exige um consumo alto de energia primária. (BRONCHART *et al.*, 2013). Este custo pode ser reduzido com a integração de sistemas fotovoltaicos, contribuindo ainda para a redução de impactos ambientais quando em comparação a outras fontes de geração de energia. (CARVALHO, 2018).

Pesquisas apontam cinco aspectos principais para o desenvolvimento de estufas e a otimização do consumo energético: a forma geométrica, a orientação, os materiais usados no revestimento, os tipos de aberturas e os sistemas de sombreamento. (ACHOUR; OUAMMI; ZEJLI, 2021).

3.2 ARQUITETURA E ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS

De forma geral, a arquitetura é definida como a construção de algo que tem como finalidade ser belo, sendo assim incluída como uma das belas artes. (COLIN, 2019).

Lamberts *et al.* (2019) afirmam que quando se trata de uma arquitetura bioclimática, a beleza e eficiência estão intrinsicamente relacionadas, empregando estratégias que são necessárias ao aprimoramento da situação.

Neste contexto, a carta bioclimática é uma ferramenta valiosa para a seleção e elaboração de estratégias bioclimáticas na arquitetura adaptadas a diversas condições climáticas. Com isso, estabelece-se uma relação entre estas simplificando dados climáticos para uma interpretação mais acessível. (Lamberts *et al.*, 2019).

Estudos conduzidos por Goulart, Lamberts e Firmino (1998) demonstraram que a carta bioclimática adequada para a utilização no país baseia-se no modelo proposto por Givoni em 1992, o qual demonstrou-se mais adequado para as condições climáticas. Com base nessas pesquisas, Lamberts *et al.* (2019) desenvolveram uma representação mais didática e detalhada dessa carta, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Carta bioclimática adotada para o Brasil.



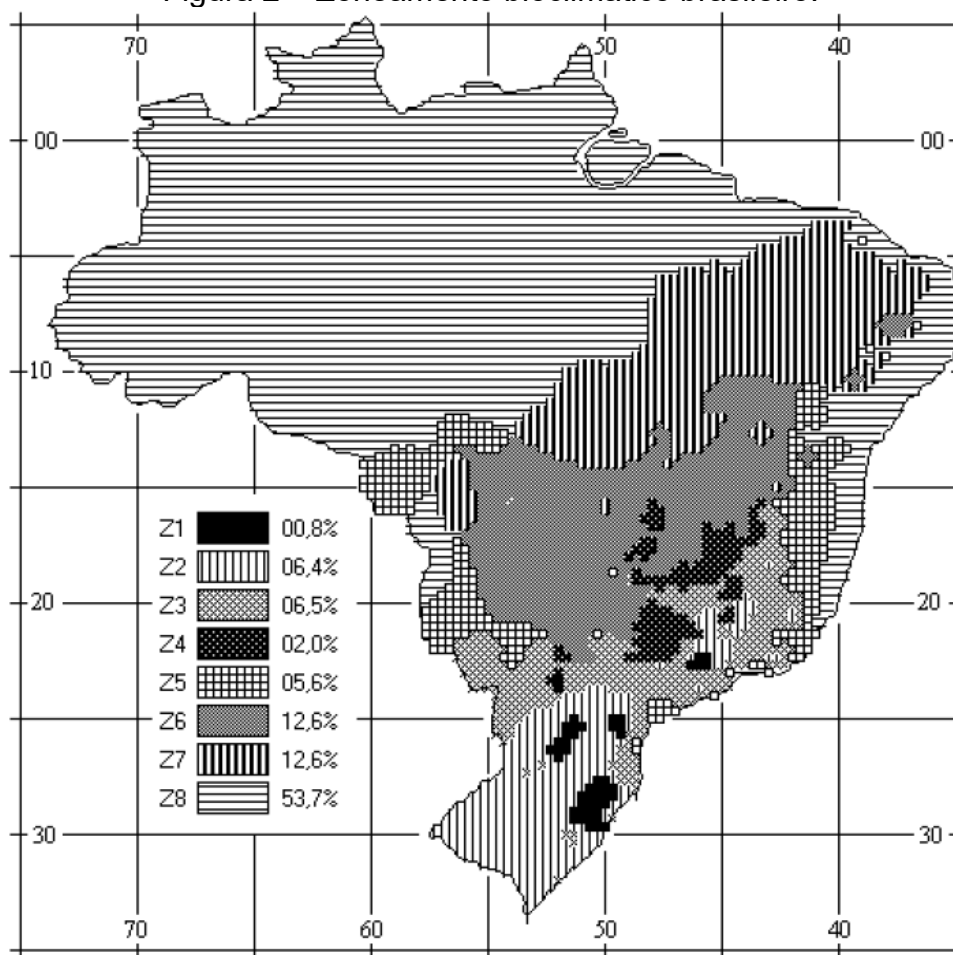
Fonte: Lamberts *et al.* (2019)

A carta bioclimática, construída a partir do diagrama psicrométrico, permite relacionar a temperatura do ar com a umidade relativa, possibilitando a definição de

estratégias projetuais adequadas ao clima local, com base nos dados representativos dos principais períodos do ano climático da região. Esses dados podem ser inseridos diretamente na carta, que indica as zonas bioclimáticas aplicáveis. (LAMBERTS *et al.*, 2019).

Segundo Lamberts *et al.* (2010) é essencial que as condições climáticas específicas de cada localidade sejam analisadas e validadas, de modo a garantir que o desempenho térmico que atenda às necessidades regionais. Complementando, a NBR 15220-3 (ABNT, 2005) estabelece o zoneamento bioclimático brasileiro, dividido em oito zonas distintas, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Zoneamento bioclimático brasileiro.



Fonte: ABNT (2005).

A norma estabelece parâmetros, condições de contorno e diretrizes construtivas para cada uma das zonas bioclimáticas: tamanho das aberturas para ventilação, proteção das aberturas, vedações externas e estratégias de condicionamento térmico passivo. (ABNT, 2005). Essas definições são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros e condições de contorno para cada Zona Bioclimática

Zona Bioclimática	Aberturas para ventilação	Sombreamento das aberturas	Vedações externas		Inverno	Estação	
			Parede	Cobertura		Verão	
Z1	Médias	Permitir sol durante o período de frio	Leve	Leve isolada	Aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas (inércia térmica).		-
Z2	Médias	Permitir sol durante o inverno	Leve	Leve isolada	Aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas (inércia térmica).	Ventilação cruzada	
Z3	Médias	Permitir sol durante o inverno	Leve refletora	Leve isolada	Aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas (inércia térmica).	Ventilação cruzada	
Z4	Médias	Sombrear aberturas	Pesada	Leve isolada	Aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas (inércia térmica).	Resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento e ventilação seletiva (nos períodos quentes em que a temperatura interna seja superior à externa).	
Z5	Médias	Sombrear aberturas	Leve refletora	Leve isolada	Vedações internas pesadas (inércia térmica)	Ventilação cruzada	
Z6	Médias	Sombrear aberturas	Pesada	Leve isolada	Vedações internas pesadas (inércia térmica)	Resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento e ventilação seletiva (nos períodos quentes em que a temperatura interna seja superior à externa).	
Z7	Pequenas	Sombrear aberturas	Pesada	Pesada		Resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento e ventilação seletiva (nos períodos quentes em que a temperatura interna seja superior à externa).	-
Z8	Grandes	Sombrear aberturas	Leve refletora	Leve refletora		Ventilação cruzada permanente	-

Além do conforto humano em ambientes, estas estratégias (ativas ou passivas) são a principal forma 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 as plantas. (MANZANO-AGUGLIANO *et al.*, 2015).

Para o clima subtropical, como o 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).

3.2.1 Estratégias passivas

As estratégias passivas consistem no planejamento inteligente da estufa para tirar proveito das condições climáticas naturais, reduzindo a necessidade de sistemas mecânicos e promovendo o uso eficiente dos recursos disponíveis. Entre essas estratégias, destacam-se a orientação e o layout da estrutura, o isolamento térmico, os dispositivos de sombreamento, a ventilação cruzada e os elementos de armazenamento térmico. (MANZANO-AGUGLIANO *et al.*, 2015).

3.2.1.1 Geometria da estrutura

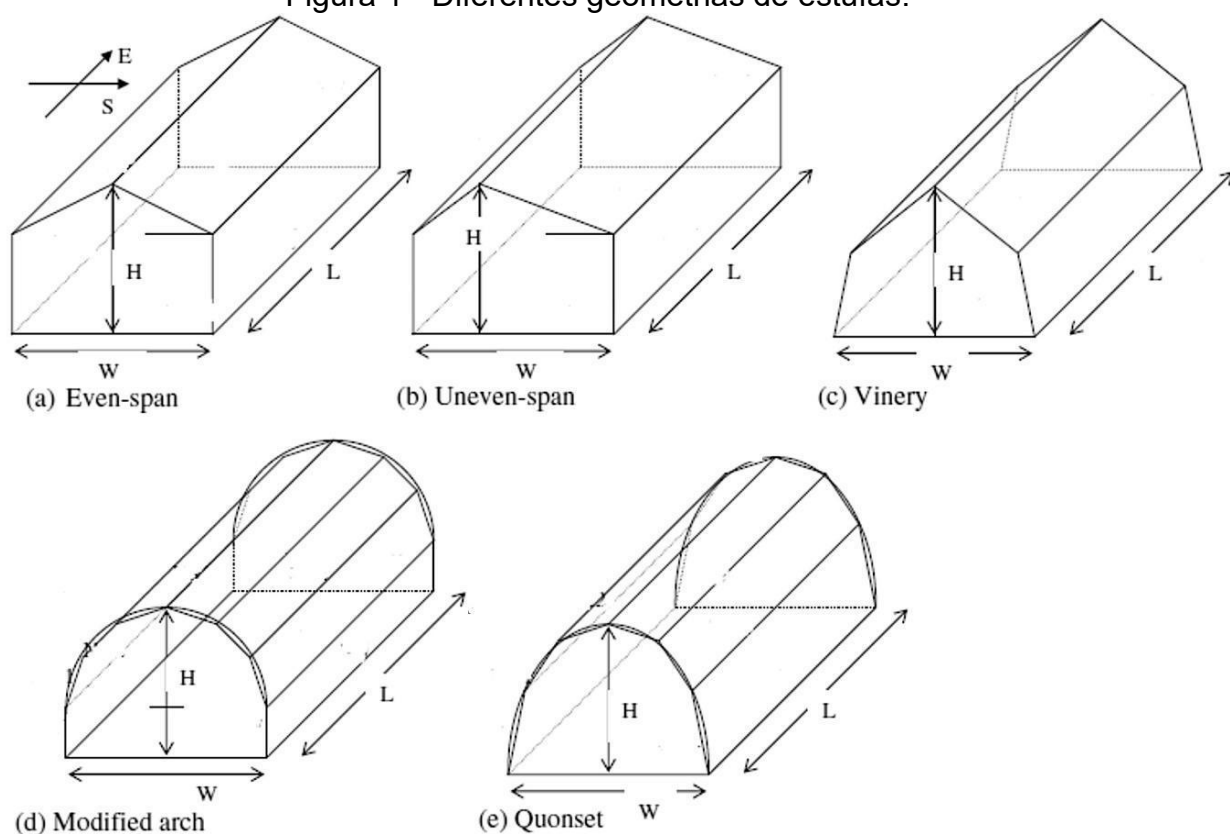
Conforme Cuce, Harjunowibowo e Cuce (2016) a maioria das estufas emprega materiais de construção, como plástico ou vidro, que possuem alta transmissividade, embora apresentem um baixo coeficiente geral de transferência de calor, resultando em aproximadamente 40% da energia total consumida sendo destinada ao processo de aquecimento. Mobtaker *et al.* (2016), destacam que a disponibilidade total de radiação solar e a demanda de energia de uma estufa dependem de sua forma, estrutura e orientação.

Para controlar a temperatura de forma eficaz, é fundamental integrar a medição da temperatura e otimizá-la para manter uma média ideal em determinado período, tudo isso enquanto se reduz o consumo de energia. A faixa de temperatura ideal é definida pela extremidade inferior, na qual podem ocorrer danos, e pela extremidade superior, na qual a taxa de crescimento é consideravelmente reduzida,

com o controle da temperatura interligado ao controle da umidade. (IDDIO *et al.*, 2020).

Tanto a configuração (orientação, tipo de cobertura, sistemas de ventilação e posicionamento no terreno) como a geometria da estufa exercem influência sobre a quantidade de radiação solar recebida e a transferência de calor para o ambiente externo. Estufas com múltiplos vãos demonstram maior eficiência energética, uma vez que apresentam menor área exposta ao exterior por unidade de superfície. Adicionalmente, o potencial de economia de energia da estufa é influenciado pela sua localização geográfica. Diversos tipos de cobertura, como telhados de duas águas com vãos de dimensões distintas, arco modificado, forma de vinha e Quonset, apresentados na Figura 3, são considerados para aplicação na agricultura. (AHAMED; GUO; TANINO, 2019).

Figura 1 - Diferentes geometrias de estufas.



Fonte: Ahamed, Guo e Tanino (2019).

A partir da análise destes cinco tipos de estufas para a disponibilidade de radiação solar, Çakir e Sahin (2015) identificaram que um dos principais parâmetros eficazes nas taxas de ganho de energia solar das estufas é o formato do telhado.

Conforme mencionado por Achour, Ouammi e Zejli (2021), a proporção comprimento-largura da estufa influencia diretamente a temperatura interna, umidade e ganho de radiação solar. Relações como 1:3 ajudam a manter temperaturas mais baixas, enquanto 3:4 reduz umidade e velocidade do ar. O ganho solar diminui com a redução dessa proporção, exceto no verão, e aumenta linearmente com o ângulo do telhado.

3.2.1.2 *Orientação solar*

Ahamed, Guo e Tanino (2019) afirmam que a orientação da estufa desempenha um papel crucial na minimização do consumo de energia térmica e no potencial de economia de energia. Ressaltando que a orientação ideal é diretamente relacionada e influenciada pela sua localização geográfica. A partir de um estudo realizado no Canadá, os autores evidenciaram que estufas com orientação leste-oeste demandam cerca de 20% menos aquecimentos em comparação às estufas com orientação norte-sul. Esses resultados foram obtidos devido à maior incidência de radiação solar durante o inverno, consequência das latitudes mais elevadas.

No Brasil, após estudos realizados sobre diferentes tipos de estufas, geometrias e orientações, notou-se que é mais conveniente que o comprimento da estufa seja orientado no sentido leste-oeste, sendo favorável, também, aos ventos. (BLISKA JUNIOR; HONORIO, 2019 apud MELLO; CAMPAGNOL, 2016).

Ahamed, Guo e Tanino (2019) ainda destacam a importância de mapear a trajetória solar com base nas coordenadas geográficas para determinar os ângulos relevantes, como a altura e o azimute solar.

3.2.1.3 *Seleção de Materiais*

No que concerne à fachada, os materiais convencionais empregados em estufas frequentemente apresentam deficiências no isolamento térmico, acarretando perdas energéticas. Materiais caracterizados por uma baixa resistência térmica, como vidro, polietileno, plástico semi-rígido e filme plástico são comumente utilizados. Tal

característica demanda um aumento do aquecimento durante o inverno e resulta em um coeficiente de sombreamento elevado, ocasionando ganhos térmicos excessivos durante o verão, impactando a demanda de resfriamento das estufas. (CUCE; HARJUNOWIBOWO; CUCE, 2016).

Além dos citados anteriormente, também são empregados plásticos rígidos: policarbonato, plásticos reforçados com fibra de vidro, acrílico e cloreto de polivinila e plásticos finos: polietileno de baixa densidade, copolímero de etileno acetato de vinila, PVC e copolímero de etileno tetrafluoroetileno. O uso de vidro reduz a transmissão de luz natural, porém, a luz difusa melhora a temperatura e a distribuição da luz dentro da estufa, resultando em um aumento no conteúdo foliar de minerais e sólidos solúveis. Estudos demonstraram que o policarbonato é mais eficaz que o vidro e o polietileno, pois bloqueia os raios UV-A e UV-B, permite uma maior quantidade de radiação fotossinteticamente ativa e reduz o consumo de energia térmica em comparação com o polietileno. (ACHOUR; OUAMMI; ZEJLI, 2021).

Os materiais considerados ideais para a cobertura devem ser altamente transparentes à radiação solar global, especialmente na faixa fotossinteticamente ativa e, ao mesmo tempo, opacos à radiação infravermelha de onda longa, com boa radiação difusa, isolamento adequado e propriedades anticondensação. (AHAMED; GUO; TANINO, 2019, LA NOTTE *et al.*, 2020).

Segundo Ahamed, Guo e Tanino (2019), características como alta transmissividade de radiação de ondas curtas, baixa de ondas longas e baixa condutividade térmica são essenciais para a conservação de energia nas coberturas de estufas no inverno. A utilização de uma camada dupla de material nas coberturas das estufas, em vez de uma única camada, emerge como um método promissor para reduzir a demanda de energia para aquecimento. Os autores demonstraram, por meio de suas pesquisas, que estufas com cobertura de camada dupla em polietileno têm uma redução de aproximadamente 27% na demanda de aquecimento em comparação às estufas de camada única com cobertura de vidro. Também se observou que, em relação às estufas com vidro de camada dupla, registram um aumento de cerca de 21%.

A utilização de folhas de policarbonato em estufas é amplamente favorecida devido à economia de energia que oferecem, podendo alcançar até 30%, sem comprometer a quantidade de luz solar que penetra na casa de vegetação. O policarbonato de parede dupla é a escolha mais recomendada devido às suas

características de maior eficiência térmica e melhor difusão da luz solar natural. (CUCE; HARJUNOWIBOWO; CUCE, 2016). É relevante considerar o clima do Brasil para esta aplicação, já que de acordo com o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2025) varia entre equatorial, tropical e temperado, influenciando diretamente nesta escolha.

Segundo Lamnatou e Chemisana (2013) os filmes plásticos seletivos em relação à fotossíntese podem desempenhar um papel substancial na eficiência produtiva das plantas. Os autores afirmam ainda que filmes com maior transmissão de luz resultaram em aumento de 51% no rendimento comercial por planta de morango, em comparação com filmes de menor transmissão de luz. Por outro lado, diferentes tipos de filmes seletivos também influenciaram o crescimento das plantas: o filme YXE-10 reduziu a altura das plantas de camarão dourado e bigodes de gato, enquanto o filme SXE-4 aumentou a altura do camarão dourado.

Outra abordagem promissora é a inclusão de corantes fluorescentes em folhas de polietileno, o que resultou em um aumento na produção de frutos de tomate e no número de ramos de flores. Adicionalmente, o uso de plásticos de dupla camada e camadas duplas de cobertura de polietileno com espaço entre elas também demonstrou benefícios, incluindo o aumento da taxa de crescimento vegetativo e da produtividade do tomate fresco. (LAMNATOU; CHEMISANA, 2013).

Li, Roskilly e Wang (2018) propuseram um método eficiente de gerenciamento de energia para estufas solares com paredes de armazenamento térmico e ventiladores, onde é possível conservar energia enquanto se mantém a temperatura interna da estufa em níveis desejados.

Ouammi *et al.* (2020) investigaram um sistema de controle preditivo para uma estufa inteligente, que consistiu em uma bomba central, dispositivo de armazenamento de energia, geradores renováveis, microchip, iluminação artificial, bomba de irrigação, gerador de dióxido de carbono e sensores avançados. Com a estufa coberta com policarbonato de parede dupla, o sistema foi capaz de ajustar a operação do microchip para rastrear a temperatura ideal, considerando mudanças nas cargas elétricas e térmicas, e a resistência térmica do material.

3.2.1.4 Gerenciamento das aberturas

A ventilação natural é amplamente utilizada em estufas devido ao alto custo da eletricidade, enquanto os sistemas fotovoltaicos podem fornecer energia elétrica de forma mais econômica quando a ventilação natural não é suficiente. (OUAMMI *et al.*, 2020).

O *windcatcher* é um sistema de ventilação ecológico amplamente utilizado no Oriente Médio, que não requer eletricidade para funcionar, o qual consiste em coletores de vento instalados na cobertura dos edifícios, com diferentes tipos de aberturas para garantir a circulação imediata de ar. (CUCE; HARJUNOWIBOWO; CUCE, 2016).

Ghoulem *et al.* (2020) conduziram uma investigação sobre a aplicação de *windcatchers* com sistemas de resfriamento evaporativo em estufas situadas em regiões de clima quente. O estudo avaliou diversos parâmetros, como a altura do *windcatcher*, a adição de aletas, a velocidade do vento, a temperatura ambiente e a umidade relativa, indicando reduções na umidade relativa e na temperatura do ar dentro da estufa. Ademais, a pesquisa investigou o efeito das estruturas adjacentes na uniformidade do fluxo de ar, revelando que os *windcatchers* têm um desempenho superior em comparação com a ventilação de fluxo cruzado, quando cercada por outras estruturas. Isso sugere benefícios consideráveis ao utilizar *windcatchers* em proximidade dessas estruturas adjacentes.

3.2.1.5 Sistemas de sombreamento

Basicamente, o sombreamento em estufas pode ser feito por meio de cal, redes plásticas, telas térmicas ou painéis fotovoltaicos no telhado. Optar pelo sombreamento externo é preferível ao interno, uma vez que este último reduz a radiação térmica em 21% durante o dia e 15% durante a noite, enquanto o sombreamento interno resulta em um aumento de 147%.

No contexto do uso de energia solar fotovoltaica para sombreamento, é importante considerar que essa prática pode comprometer a distribuição da luz, a menos que sejam empregados painéis fotovoltaicos dinâmicos. Módulos fotovoltaicos opacos reduzem a transmissão de luz visível, afetando as culturas, enquanto os semitransparentes são promissores para telhados, pois oferecem mais iluminação e

sombreamento adequado. (ACHOUR; OUAMMI; ZEJLI, 2021; CUCE; HARJUNOWIBOWO; CUCE, 2016).

Quando se trata de módulos fotovoltaicos transparentes, cobrir até cerca 40% da cobertura do telhado reduz a radiação solar interna em cerca de 32%, porém sem quaisquer impactos relevantes na temperatura interna e parâmetros agrônômicos. Ao mesmo tempo, cobrir menos de 50% com módulos transparentes não afetaram consideravelmente o crescimento das plantas. É relatado que estufas localizadas em áreas ensolaradas podem se beneficiar da utilização destes módulos, seja para substituir materiais de sombreamento ou gerar eletricidade a partir do excesso de luz solar. (LA NOTTE *et al.*, 2020).

3.2.1.6 *Isolamento térmico*

Para Ahamed, Guo e Tanino (2019), a técnica mais comum e acessível para isolar estufas com polietileno de dupla camada, é utilizar um soprador elétrico que mantém uma camada de ar inflada, formando uma barreira térmica e reduzindo a perda de calor pelo telhado. Outra opção, segundo os autores, é o uso de espuma líquida dinâmica, que quando aplicada em um protótipo de estufa proporcionou mais de 50% de economia de energia à noite e reduziu em cerca de 5% a radiação solar dentro da estufa, além de ocasionar a perda de calor do telhado à noite. No entanto, a manutenção e operação do sistema de isolamento com esta técnica podem ser desafiadoras, e há poucas informações disponíveis sobre sua viabilidade econômica em escala comercial. (AHAMED; GUO; TANINO, 2019).

O isolamento da fundação ao redor do perímetro das estufas, desde as paredes laterais até a altura das plantas, pode reduzir a perda de calor por condução. A instalação de 25 a 50 mm de poliuretano ou poliestireno pode diminuir essas perdas em até 50%. (AHAMED; GUO; TANINO, 2019).

3.2.1.7 *Aquecimento passivo*

Sistemas solares passivos são aqueles que têm a capacidade de captar e transmitir a energia solar por meio de convecção, condução e radiação, sem uso de meios mecânicos. (LEITE, 2021).

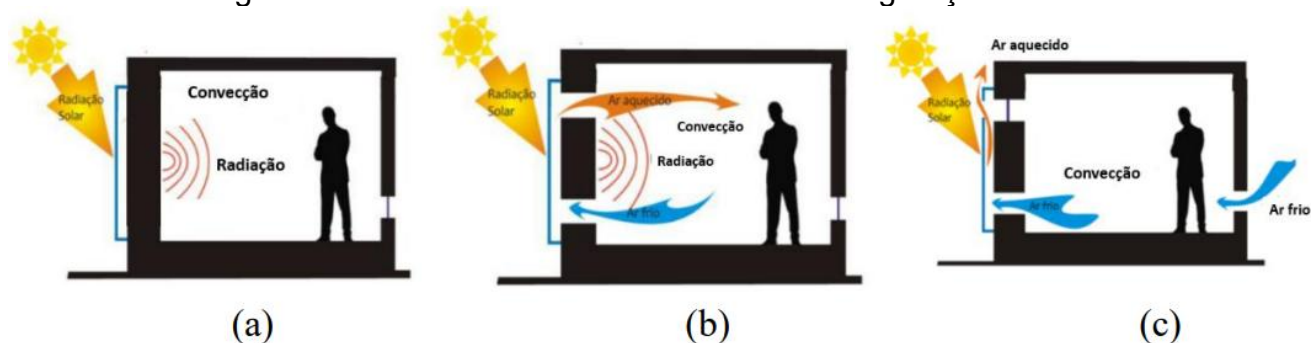
Agurto *et al.* (2020) mencionam que a parede Trombe consiste em uma parede pesada, feita de materiais como tijolos ou pedras, normalmente pintada em cor escura e posicionada atrás de um vidro. Estudo realizado no Chile, em edificações sociais, indicaram que houve uma economia de energia no aquecimento entre 30% e 50%, nos meses de maior consumo.

A taxa de transferência de calor depende dos materiais e da espessura da parede. Para acelerar as trocas térmicas por convecção e suprir as necessidades de aquecimento diurno, podem ser utilizadas aberturas inferiores e superiores nas paredes. Contudo, no verão, torna-se necessário sombrear a parede Trombe e ventilar a câmara de ar para minimizar o superaquecimento, o que pode ser feito por meio de vegetação de folhagem sazonal ou persianas móveis externas. (PROJETEEE, 2025b).

A parede Trombe pode ter diferentes funções, como ventilação e aquecimento, ou apenas aquecimento. O desempenho mais interessante ocorre na dupla funcionalidade, quando ela aquece o ambiente durante o inverno e ajuda a resfriá-lo no verão. (LEITE, 2021).

A Figura 4 ilustra a parede Trombe, dividida em três partes. A parte (a) mostra a liberação retardada da energia acumulada na parede para o interior da edificação por convecção e radiação. Na parte (b), aberturas no sistema aceleram esse processo por termocirculação dentro da câmara para o ambiente interno. Já a parte (c) apresenta uma configuração de aberturas que promove ventilação por efeito de chaminé térmica, usada especialmente no verão. (CHEL, 2008 apud ECHER, 2021).

Figura 2 – Parede Trombe com diferentes configurações.



Fonte: Chel (2008 apud Echer 2021).

3.2.2 Estratégias ativas

Estratégias ativas envolvem o uso de tecnologias e sistemas mecânicos para modificar e melhorar o conforto térmico dentro de um edifício ou casa de vegetação, como sistemas de aquecimento, resfriamento, ventilação forçada e controle automatizado, via sensores. (MANZANO-AGUGLIANO *et al.*, 2015).

3.2.2.1 Sistema de resfriamento evaporativo

O sistema de resfriamento evaporativo utiliza a evaporação da água para reduzir a temperatura do ar ambiente, melhorando sua qualidade por meio de um conjunto de placas com canais ou tubos interligados dispostos entre elas. (PROJETEEE, 2025a).

Essas placas, também conhecidas como almofadas, painéis evaporativos ou parede úmida, são fabricadas com materiais porosos, como celulose, papelão ou fibras sintéticas, e são projetadas em formato de colmeia ou ripas para permitir a passagem de ar. A seleção do material e do *design* varia conforme o sistema de resfriamento evaporativo, sendo essencial realizar manutenções regulares para assegurar o desempenho adequado e prevenir a acumulação de sujeira. Os exaustores têm papel fundamental para o resfriamento e umidificação da casa de vegetação, já que estes são responsáveis por forçar o ar a atravessar a parede úmida localizada na parede oposta aos exaustores. A parede úmida atua em sinergia com os exaustores formando o sistema de resfriamento evaporativo. (FERNANDES *et al.*, 2022).

Esse sistema é uma opção mais sustentável e eficiente energeticamente, com uma diminuição nos requisitos de potência máxima, redução nas emissões de poluentes, fácil integração e ausência de gás refrigerante clorofluorcarboneto (CFC). São alcançados melhores resultados em climas quentes e secos, aumentando a umidade do ar, embora possa ser menos eficaz em regiões úmidas, o que acaba se tornando favorável às plantas desde que aplicado o controle automatizado por sensoriamento. (CUI *et al.*, 2018).

3.2.2.2 Sistema de aquecimento ativo

Segundo Ahamed, Guo e Tanino (2018), o aquecimento de água é comum em grandes estufas comerciais, enquanto o aquecimento por ar quente e infravermelho predomina em estufas menores ou climas mediterrâneos, com menor demanda de aquecimento.

O sistema de aquecimento através de tubulações visa manter as plantas em temperaturas superiores às do ambiente circundante, priorizando a temperatura das plantas em detrimento da temperatura do ar interno da estufa. Isso reduz a necessidade de aquecimento direto dentro da estufa, fornecendo calor próximo às superfícies das plantas. Ao posicionar as tubulações de aquecimento próximas ao dossel das plantas ou no solo, consegue-se uma distribuição vertical uniforme de temperatura, evitando a estratificação do ar na estufa. Esse método reduz a demanda por aquecimento em 15-25% em comparação com aquecedores convencionais, sendo a altura média da copa da cultura a posição ideal para as tubulações de aquecimento. (AHAMED; GUO; TANINO, 2018).

A implementação de sistemas de aquecimento solar pode resultar em reduções nos custos energéticos, sendo geralmente composto por um coletor solar, um tanque com sistema de aquecimento auxiliar e radiadores para aquecimento. A vantagem desse sistema se torna evidente quando comparada ao uso de gás, onde os custos mensais com gás para um sistema simples totalizam cerca de 50 m³/mês. Levando em conta um período de uso de 6 meses e o custo do gás em torno de 10 \$/m³, o investimento em um sistema solar é recuperado aproximadamente após dois anos de operação. (ROMERO *et al.*, 2018).

Adicionalmente, o armazenamento de calor em estufas, utilizando água como meio de armazenamento, é uma opção viável. Isso é alcançado através de sacos plásticos cheios de água, tubulações de solo e tanques de água, que funcionam como coletores solares e liberam calor durante a noite. Esses sistemas podem resultar em economias de energia de aquecimento, especialmente em estufas de pequeno porte situadas em climas moderados. (AHAMED; GUO; TANINO, 2018).

3.2.2.3 Sistema de iluminação artificial

A iluminação adequada desempenha um papel fundamental na asseguuração da produtividade e qualidade nutricional das plantas, com os LED's emergindo como uma opção competitiva para a iluminação artificial em cultivos *indoor*. Os LED's oferecem vantagens em relação às fontes de luz convencionais, como menor consumo de energia, baixa emissão de calor, estrutura compacta e a ajuste dos comprimentos de onda da luz de acordo com as necessidades de cada cultivo. (O AGRONÔMICO, 2023).

Os sistemas de iluminação artificial complementam a luz solar, fornecendo luz adicional quando a intensidade ou duração da luz natural é insuficiente, especialmente no inverno, quando os dias são mais curtos. O controle do fotoperíodo, ou seja, do tempo de exposição à luz e à escuridão, permite influenciar o crescimento, a floração e a frutificação das plantas, viabilizando colheitas fora de época. Cumpre mencionar que o uso de diferentes espectros de luz, como vermelho, azul e branco, contribui diretamente para etapas específicas do desenvolvimento vegetal, melhorando a qualidade das plantas cultivadas em estufas. (MASSA *et al.*, 2008).

Conforme evidenciado por um estudo realizado por Fanwoua *et al.* (2019) que analisou o efeito da iluminação LED no crescimento e qualidade dos tomates, foi notado um discreto incremento na massa fresca dos frutos quando empregada a combinação de LED vermelho-azul, sem que houvesse quaisquer alterações na qualidade deles.

Além dos benefícios em termos de economia de energia, pesquisas relacionadas às essas lâmpadas de espectro controlado têm demonstrado que o crescimento, o desenvolvimento e o valor da produção das culturas são diretamente afetados pela iluminação. Isso por serem capazes de fornecer luz em diferentes faixas de espectro, como verde, vermelho e azul, permitindo ajustes personalizados com base nos requisitos específicos de cada planta (MOHAGHEGHI; MOALLEM, 2021).

Parnklang *et al.* (2021) demonstraram que, ao posicionar essas luminárias a 1,5 metro acima de plantas de cannabis medicinal, houve um incremento de 12% no crescimento em relação ao cultivo tradicional. O estudo evidenciou que intensidades luminosas superiores a 100 lux, aplicadas na parte superior das plantas, favorecem o desenvolvimento.

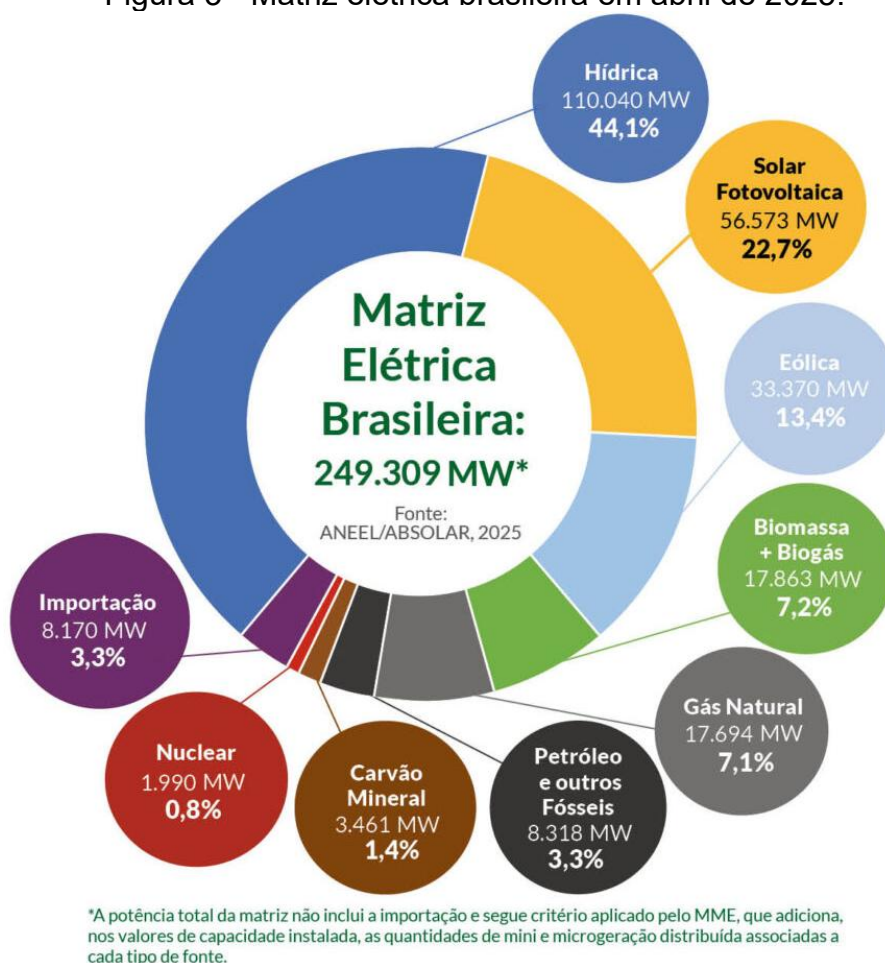
3.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO E APLICAÇÃO NO CULTIVO PROTEGIDO

Conforme o Instituto de Energia e Ambiente (2024) a energia fotovoltaica é a produção de eletricidade a partir da luz solar. Sua geração é diretamente proporcional à radiação solar incidente nos painéis, o que confere ao Brasil um grande potencial para essa fonte energética limpa, renovável e sustentável.

Os sistemas fotovoltaicos são compostos por painéis solares, que captam e convertem a radiação em energia elétrica, geralmente interligados em série ou paralelo (formando uma *string*), e outros componentes comercializados em kits especializados. (IEE, 2024).

De acordo com dados fornecidos pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica – ABSOLAR (2025), indicados na Figura 5, a energia solar fotovoltaica ocupa o segundo lugar na produção de energia na matriz elétrica do país.

Figura 3 - Matriz elétrica brasileira em abril de 2025.



Fonte: Adaptado de ABSOLAR (2025).

Estes sistemas apresentam diferentes topologias e configurações, como conectado à rede (*on-grid*), híbrido independente (*on-grid* e *off-grid*) e híbrido integrado (*on-grid* e *off-grid*). Os chamados *on-grid*, ou ainda SFCR, são conectados à rede e composto por módulos, inversor e medidor bidirecional, com a energia gerada pelos módulos injetada na rede elétrica, não havendo armazenamento de energia. (PROJETEEE, 2023a).

Sistemas *off-grid* são compostos por módulos, controlador de carga, inversor e baterias, onde a edificação é isolada da rede elétrica, dependendo exclusivamente da energia gerada pelo sistema fotovoltaico. (PROJETEEE, 2023b).

Assim, a energia gerada pelo sistema é capaz de alimentar a casa de vegetação, contribuindo para a movimentação e funcionamento geral das estratégias da estufa. A complementar, a regulamentação da geração distribuída é estabelecida pela resolução normativa 482/2012 da ANEEL, com o marco legal da geração distribuída (PL 5.829/2019). (ANEEL, 2023a). A Lei 14.300, que entrou em vigor em janeiro de 2022, define o marco legal da geração distribuída e opera por meio do sistema de compensação de energia elétrica. (ANEEL, 2023b).

3.4 OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável foram criados pela ONU em 2015 como parte da Agenda 2030, com 17 objetivos, indicado na Figura 6. (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2025). Dentro destes, existem 169 metas voltados ao desenvolvimento sustentável em cinco eixos: pessoas, planeta, prosperidade, paz e parcerias. Vale ressaltar que o Brasil aderiu oficialmente à agenda por meio do Decreto nº 8.892/2016. (EMBRAPA, 2025).

Figura 4 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.



Fonte: Nações Unidas Brasil (2025).

A Embrapa, como órgão governamental vinculado ao Ministério da Agricultura do Brasil, desempenha papel estratégico na implementação dos ODS, especialmente devido à forte relação da agricultura com esses objetivos. Coordenada pela Secretaria de Inteligência e Relações Estratégicas (SIRE), avaliou sua programação e identificou que contribui direta ou indiretamente com 131 das 169 metas dos ODS. (EMBRAPA, 2025).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Projeto *Smart Greenhouse*: Desenvolvimento de Estufas Inteligentes e Eficientes Energeticamente para Cultivo de Plantas de Alto Valor Agregado Aplicadas a Comunidades Lindeiras ou Assentadas de Usinas Hidrelétricas. O projeto integra o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL (P&D ANEEL), realizado no período de 2021 a 2023, com foco na promoção de alternativas sustentáveis e inovadoras para comunidades próximas a usinas hidrelétricas.

A equipe executora, multidisciplinar, foi composta por professores, doutores, mestrandos e graduandos dos cursos de Engenharia Agrônômica, Engenharia da Computação, Engenharia de Energia, Engenharia e Gestão do Conhecimento e Tecnologias da Informação e Comunicação.

O intuito deste trabalho foi projetar, construir e avaliar estufas com ambiente controlado, utilizando soluções bioclimáticas, sistemas fotovoltaicos e tecnologias de automação com inteligência artificial. A iniciativa foi conduzida em parceria com a Foz do Chapecó Energia S.A., a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC – Campus Araranguá) e o Instituto Federal Catarinense (IFC – Campus Santa Rosa do Sul).

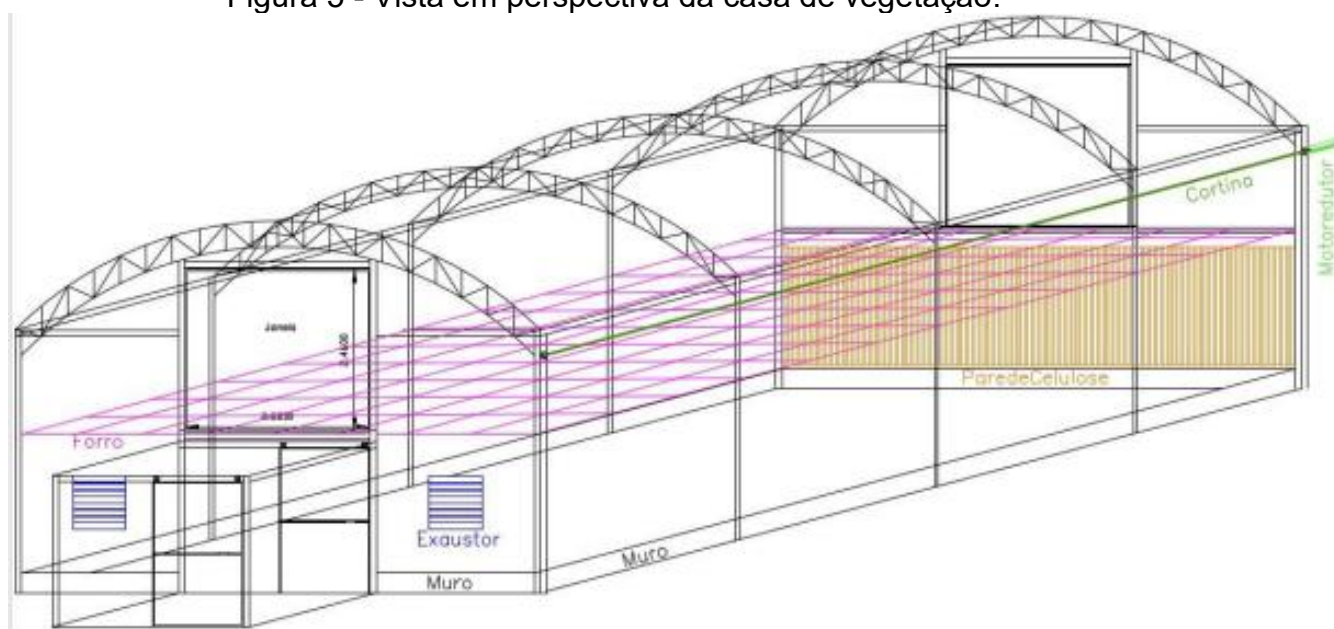
Como forma de contribuir para o fortalecimento da agricultura local e o desenvolvimento socioeconômico dessas comunidades, após a conclusão do projeto, as mudas produzidas nas estufas foram doadas a produtores rurais da região.

As *Smart Greenhouses* contam com um sistema de controle automatizado e computacional, que integra sensores ambientais e informações provenientes de uma estação meteorológica instalada na própria estrutura. Esse sistema permite o monitoramento e o ajuste preciso dos parâmetros fundamentais para o desenvolvimento adequado das plantas, como temperatura, umidade, luminosidade e ventilação. No entanto, este trabalho não abordará o funcionamento do sistema de controle e lógica automatizada, uma vez que tal temática extrapola o escopo deste estudo.

4.1 CONFIGURAÇÃO ESTRUTURAL DA CASA DE VEGETAÇÃO

A configuração da estrutura da estufa foi definida como etapa inicial para o desenvolvimento das demais fases do projeto, com dimensões de 12 metros de comprimento, 8 metros de largura e 4 metros de altura. Adotou-se o mesmo padrão construtivo nas unidades localizadas no IFC, em Santa Rosa do Sul, e na biofábrica em Alpestre. O projeto mecânico e civil da casa de vegetação integrou diversos sistemas, identificados por cores distintas: cortinas em verde escuro, o motor redutor em verde claro, forro em magenta, exaustores em azul e parede de celulose, para resfriamento evaporativo, em laranja. A Figura 7 a seguir ilustra o esquemático.

Figura 5 - Vista em perspectiva da casa de vegetação.



Fonte: Arquivos do P&D Smart Greenhouse.

A estrutura da casa de vegetação abrange uma área total de 96m² e é delimitada por muretas de concreto, as quais possuem uma altura de 30 cm. A configuração estrutural é composta por elementos distintos, incluindo colunas de sustentação confeccionadas a partir de perfis U enrijecidos, arcos treliçados em perfil U e perfis de chapa dobrados, além de tubos variados empregados para suporte dos arcos. Ressaltando que para fixação do plástico de cobertura foram utilizados perfis de alumínio e molas fix. Adicionalmente, a casa de vegetação conta com calhas de alumínio, travamentos superiores centrais e travessas frontais destinadas ao reforço estrutural.

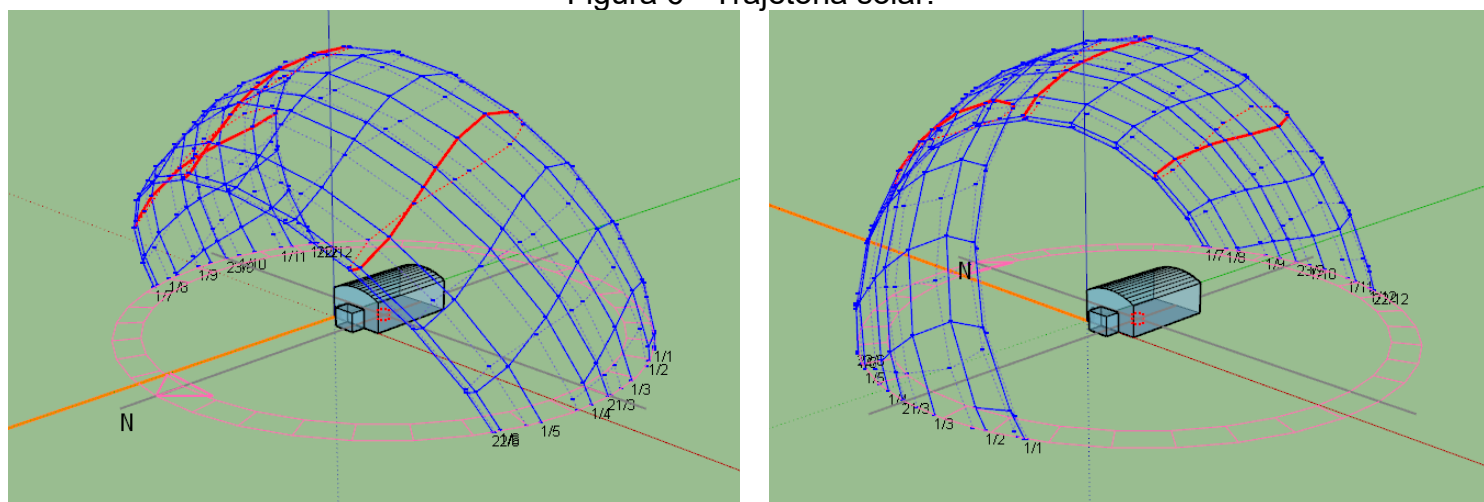
O pé direito da estufa foi fortalecido por meio de enrijecimento inercial, enquanto o interior é preenchido com brita e rafia de solo carijó. Ademais, uma antessala foi provida com cobertura de filme agrícola difusor de 150 micras, enquanto as laterais contam com tela anti-afídeo fixada. Uma casa de máquinas adjacente foi construída utilizando blocos de concreto, apresentando cobertura em telha de cimento e uma porta de giro. A estrutura metálica da estufa foi confeccionada com chapa de aço galvanizado, sendo a cobertura composta por filme difusor de 150 micras tratado contra raios UV. Diversos sistemas complementares foram implementados, incluindo filmes móveis, cortinas de enrolar, portas deslizantes, janelas de abertura automática e mesas de cultivo.

4.2 ORIENTAÇÃO SOLAR

Para a realização do estudo de orientação da casa de vegetação, utilizou-se o *software SketchUp*, por meio da ferramenta *Curic Sun*, associada à configuração de geolocalização do local de implantação das estufas. A partir desse recurso, foi possível gerar o mapa solar, que representa a trajetória anual do sol conforme a latitude, analisando a trajetória das sombras.

Esse percurso é descrito pelos ângulos de azimute e de altura solar, sendo considerado para a modelagem e simulação duas diferentes orientações: norte-sul e leste-oeste. Cabe ressaltar que a referência para definição das orientações foi a disposição da antecâmara e da parede úmida, posicionadas em lados opostos no eixo de menor comprimento da edificação. Na configuração norte-sul, a parede úmida está orientada para o sul, enquanto na configuração leste-oeste, a parede úmida posiciona-se na face leste. A Figura 8 ilustra a modelagem da trajetória solar para ambas as orientações analisadas.

Figura 6 - Trajetória solar.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

Com isso, decidiu-se pela orientação leste-oeste para a casa de vegetação localizada em Santa Rosa do Sul/SC, enquanto a unidade de Alpestre/RS será orientada no sentido norte-sul, pela maximização da irradiação solar.

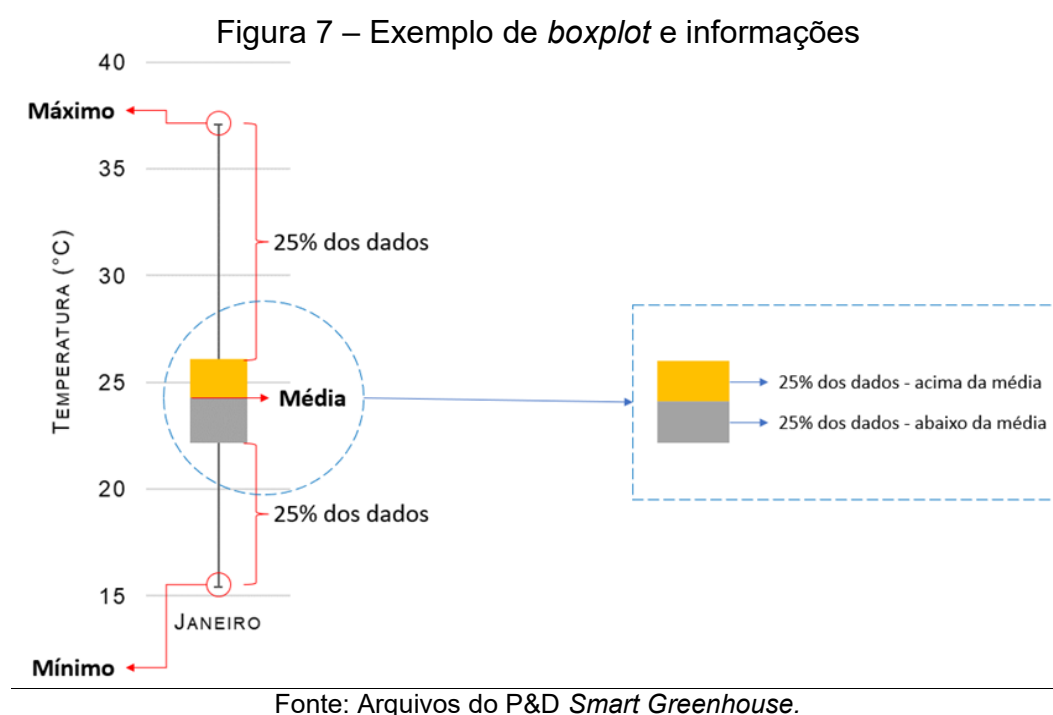
4.3 LEVANTAMENTO CLIMÁTICO E ESTRATÉGIAS ARQUITETÔNICAS

Após a definição da estrutura física da estufa e dos sistemas que a compõem, tornou-se indispensável a análise das condições climáticas das regiões de instalação. O levantamento e interpretação dos dados meteorológicos foram fundamentais para orientar decisões projetuais e operacionais, uma vez que variáveis como temperatura, umidade, radiação solar e vento influenciam diretamente o desempenho termoenergético da casa de vegetação. Além disso, essa caracterização permitiu o desenvolvimento de estratégias bioclimáticas adequadas, promovendo maior eficiência no uso de recursos naturais e contribuindo para o conforto térmico e a produtividade das culturas. Desta forma, viabilizou a otimização do aproveitamento da radiação solar e dos processos naturais tanto para resfriamento quanto para aquecimento.

Contudo, dada a ausência de dados meteorológicos consolidados para as cidades de Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS, foram utilizadas informações provenientes de cidades vizinhas que dispunham de estações meteorológicas capazes de fornecer os dados necessários para a pesquisa. Especificamente, foram selecionadas as cidades de Araranguá/SC e Torres/RS para Santa Rosa do Sul/SC, e Chapecó/SC e Frederico Westphalen/RS para Alpestre/RS.

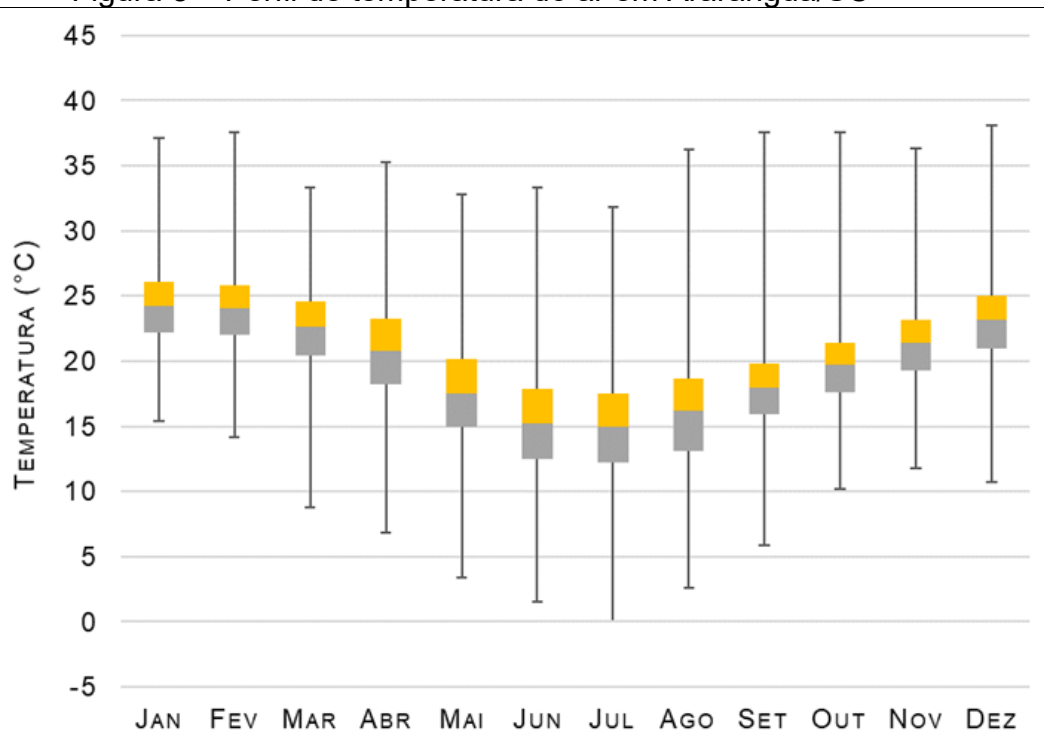
Adicionalmente, foram instaladas estações meteorológicas nas casas de vegetação com o intuito de fornecer informações locais pertinentes ao sistema computacional. Os dados meteorológicos das respectivas cidades foram obtidos via banco de dados históricos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Para melhor visualização dos dados, estes foram organizados em *boxplots*, observando os valores mínimos, máximos, a média e a concentração dos dados mais frequentes, em que quanto maior os indicadores em torno da média, mais dispersos são os dados, conforme indicado na Figura 9.



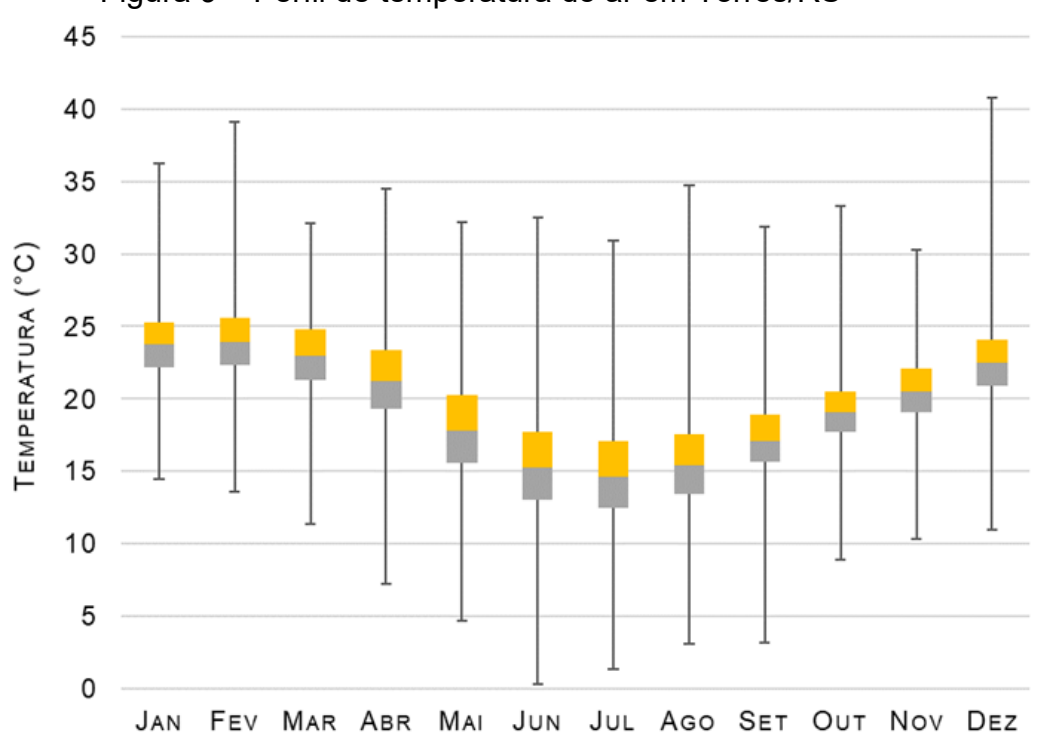
As cidades vizinhas a Santa Rosa do Sul/SC, como Araranguá/SC e Torres/RS, apresentam padrões térmicos semelhantes, conforme ilustrado nas Figuras 10 e 11.

Figura 8 – Perfil de temperatura do ar em Araranguá/SC



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

Figura 9 – Perfil de temperatura do ar em Torres/RS

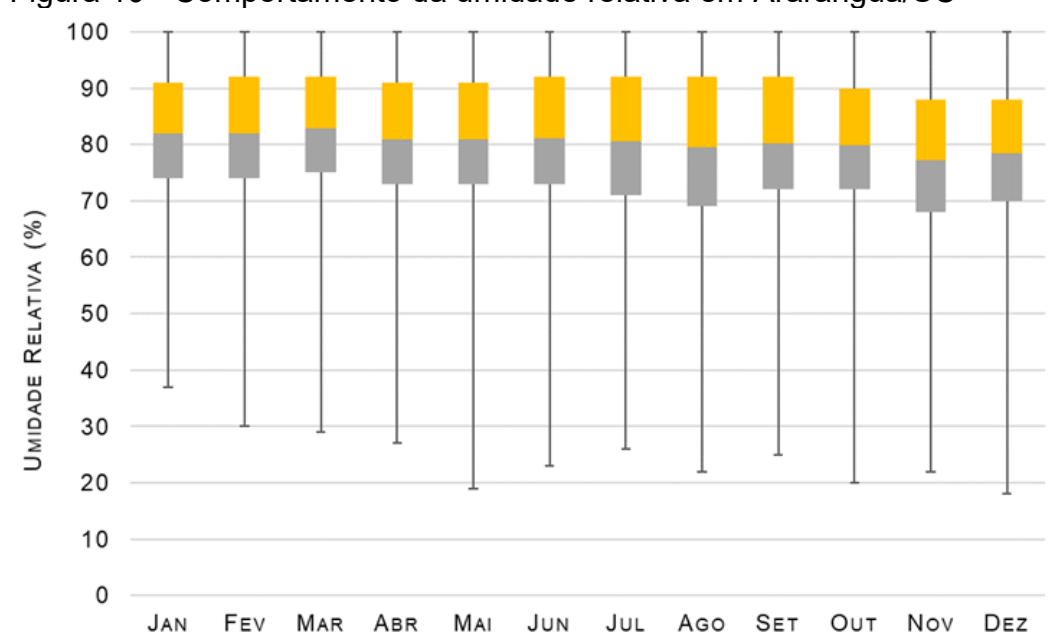


Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

Embora as temperaturas possam chegar a quase 40 °C no verão e se aproximar de 0 °C no inverno (com mínima de -0,3 °C em julho, em Araranguá/SC), metade dos dados se concentra em uma faixa com variação máxima de 5 °C. Apesar das amplitudes mensais elevadas (cerca de 30 °C no inverno), esses valores devem ser interpretados com cautela, já que o conjunto analisado cobre mais de 15 anos, período em que a severidade dos invernos pode ter variado consideravelmente.

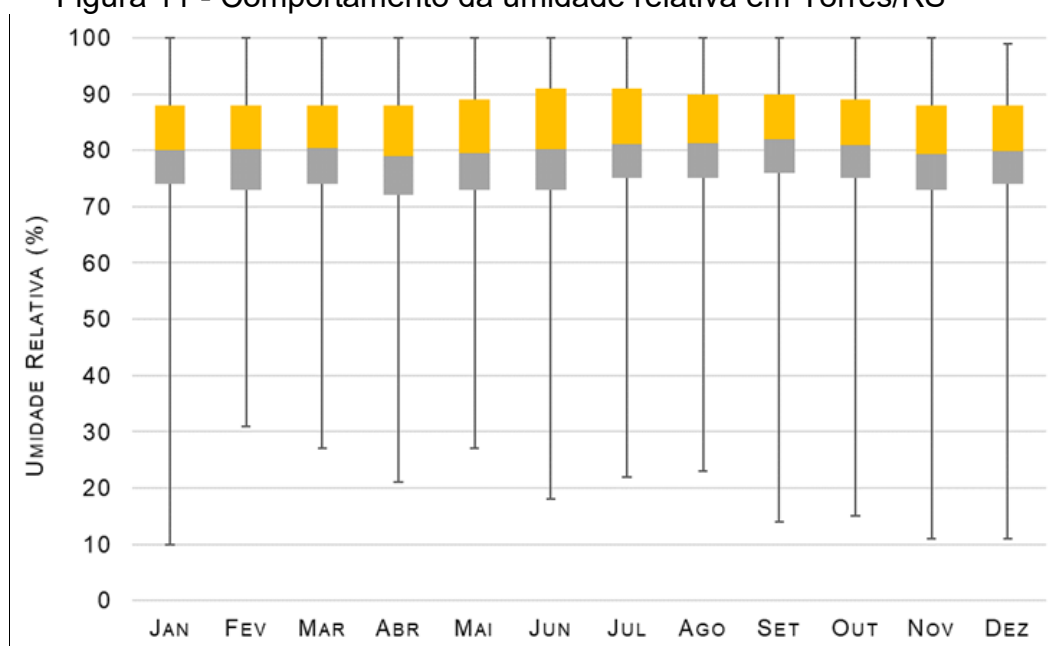
No caso da umidade relativa, observa-se que foram registrados períodos mais secos na cidade de Torres/RS, com mínimas próximas de 10% nos meses de verão. A cidade de Araranguá/SC, por outro lado, apresentou poucos registros de umidade relativa abaixo de 20%. Nas duas cidades, a maior parte dos dados aponta umidade relativa acima dos 70%, conforme indicado nas Figuras 12 e 13.

Figura 10 - Comportamento da umidade relativa em Araranguá/SC



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

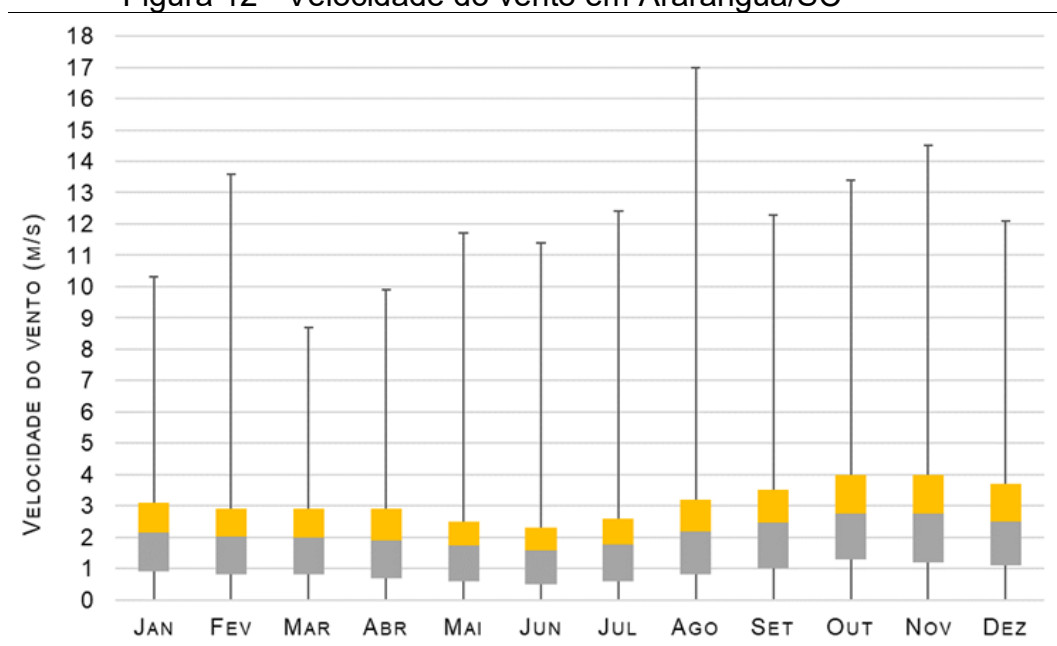
Figura 11 - Comportamento da umidade relativa em Torres/RS



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

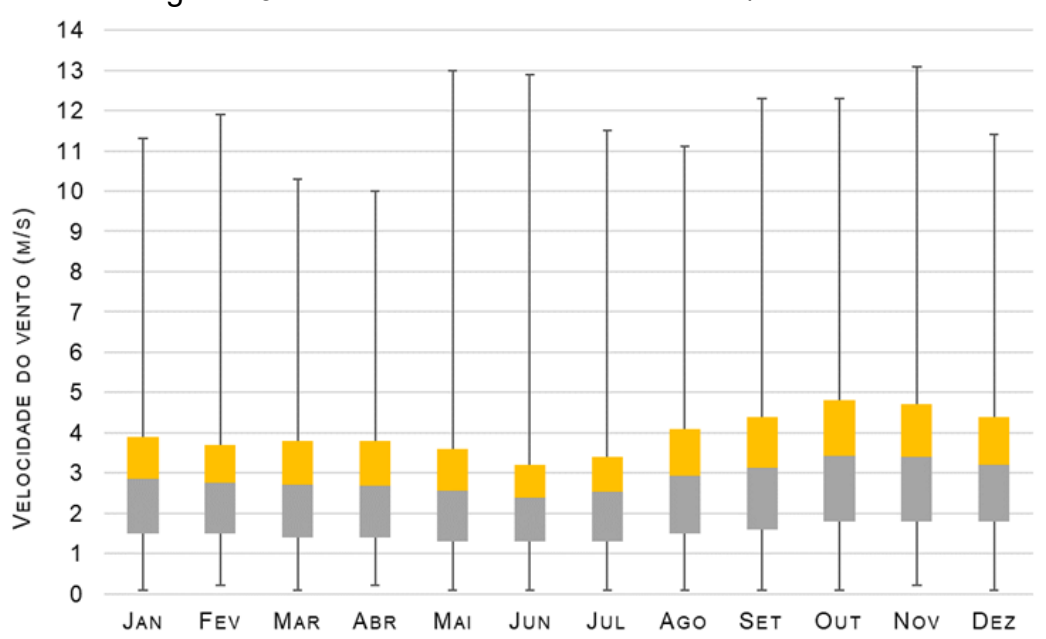
A velocidade do vento, apresentada nas Figuras 14 e 15, revela valores máximos de até 17 m/s em Araranguá/SC, enquanto em Torres/RS o pico registrado foi de cerca de 13 m/s. Em termos de frequência, as velocidades mais comuns em Araranguá/SC variam de 0,5 m/s a 4 m/s ao longo do ano, ao passo que, em Torres/RS, os ventos tendem a ser ligeiramente mais intensos, predominando entre 1 m/s e 5 m/s.

Figura 12 - Velocidade do vento em Araranguá/SC



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

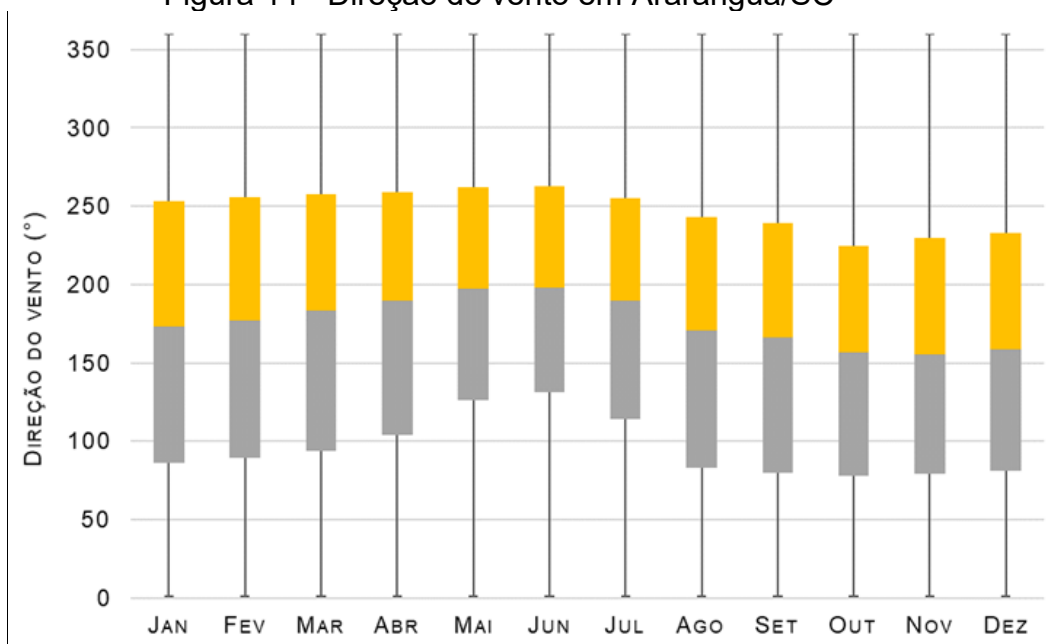
Figura 13 - Velocidade do vento em Torres/RS



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

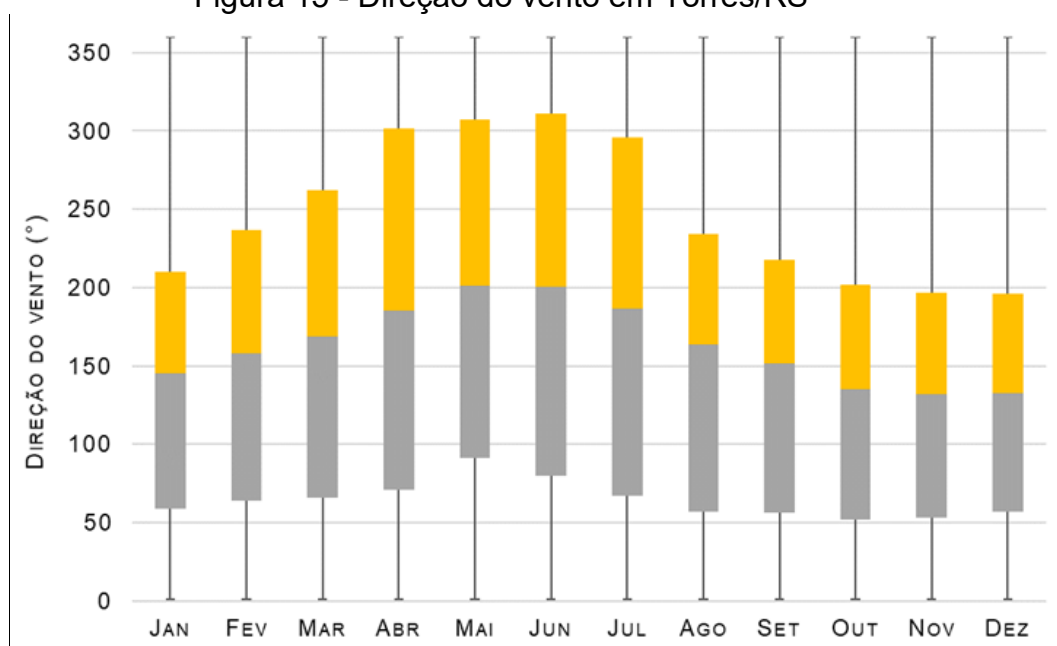
A direção do vento, apresentada nas Figura 16 e 17, mostra distribuição ao longo de todos os quadrantes (0° a 360°). Em Araranguá/SC, observa-se maior concentração em dois quadrantes, enquanto em Torres/RS a predominância ocorre em três. Essas variações estão diretamente relacionadas à localização específica das estações meteorológicas, informação fundamental para o uso eficiente da ventilação natural como estratégia de resfriamento ambiental.

Figura 14 - Direção do vento em Araranguá/SC



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

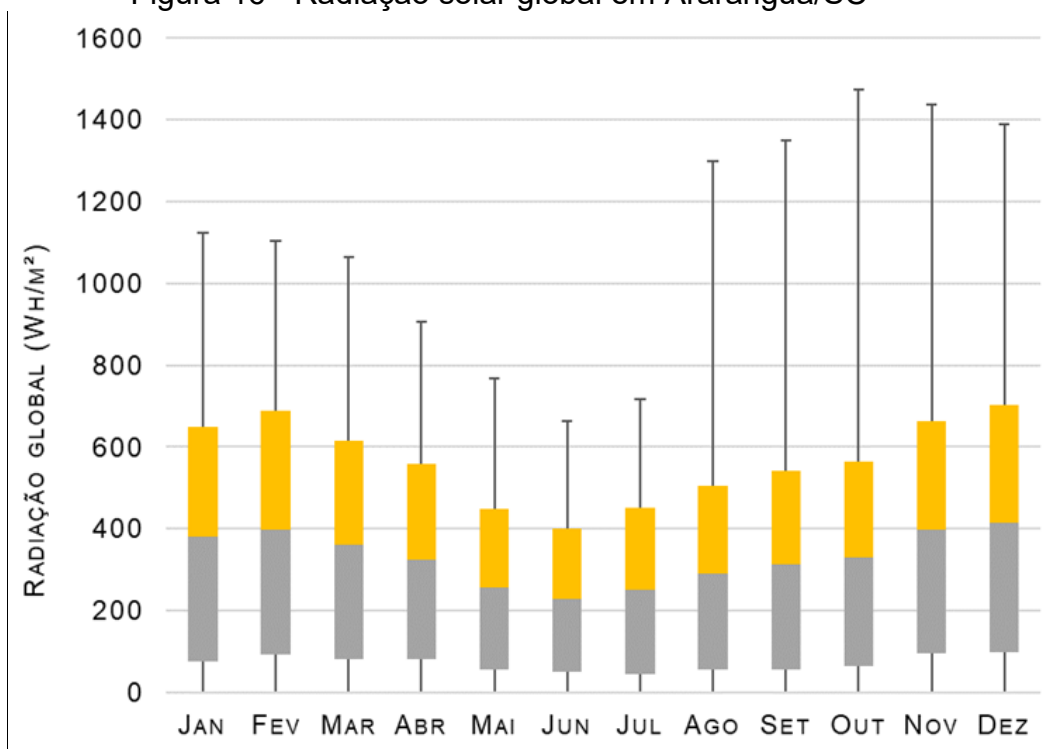
Figura 15 - Direção do vento em Torres/RS



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

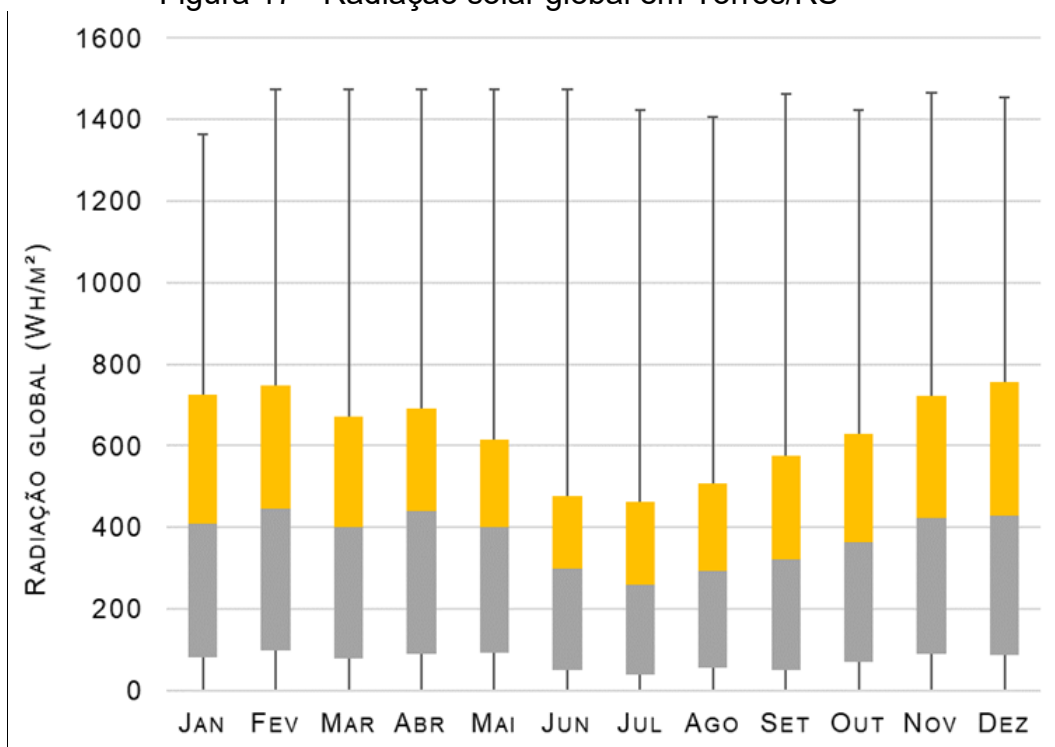
A radiação solar, ilustrada nas Figura 18 e 19, apresenta comportamento semelhante em ambas as cidades, com redução nos meses de inverno, com os dados integralizados em base horária, refletindo a distribuição da irradiação solar ao longo das horas. A cidade de Torres/RS registra os valores mais frequentes e os máximos, que chegam a cerca de 1400 Wh/m² durante o ano. Por se tratar de dados horários, os valores também representam a irradiância solar instantânea em determinados momentos.

Figura 16 - Radiação solar global em Araranguá/SC



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

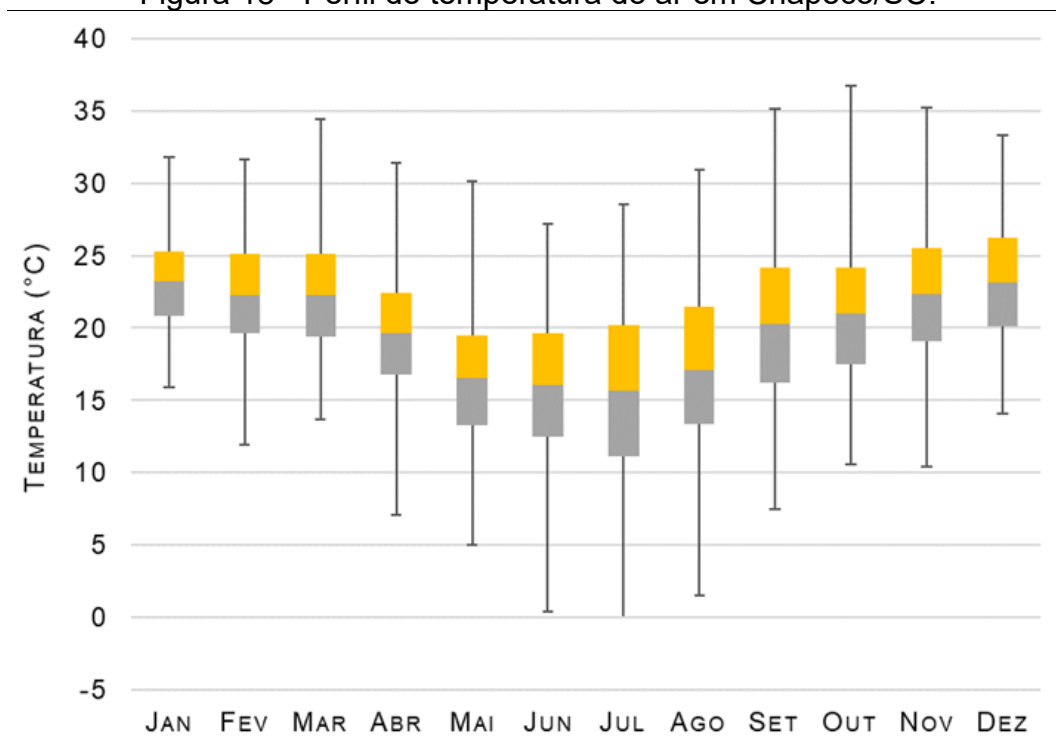
Figura 17 - Radiação solar global em Torres/RS



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

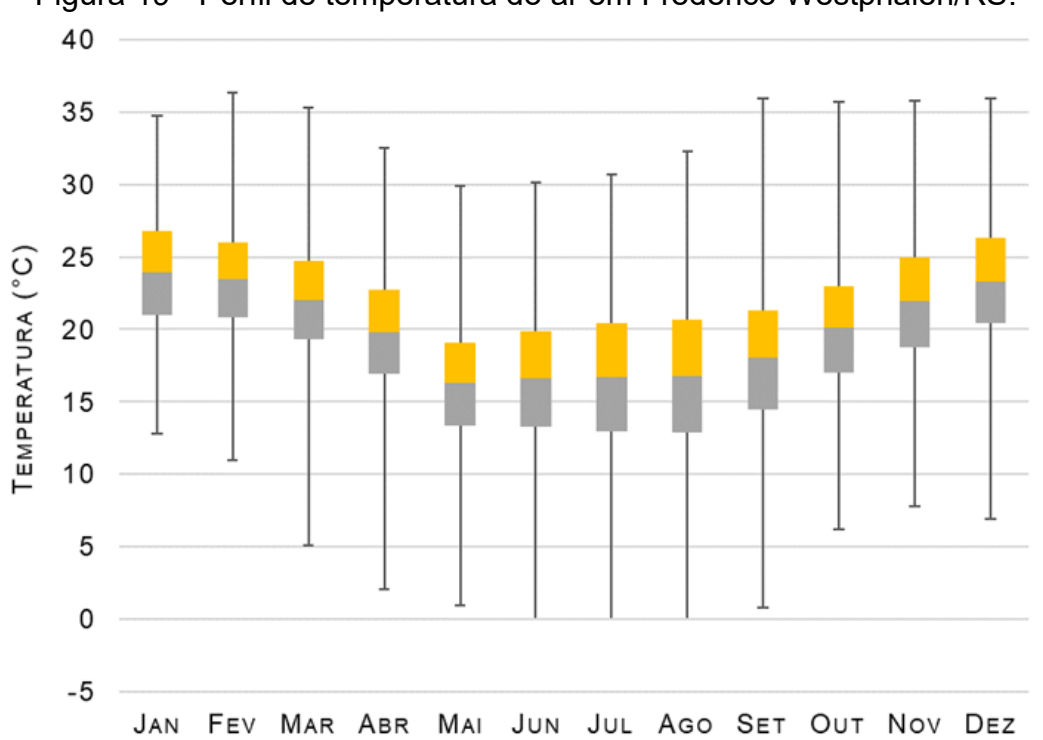
Considerando agora o município de Alpestre/RS, as cidades próximas apresentam diferentes padrões de temperatura e umidade relativa ao longo do ano. Os dados obtidos referentes as cidades são apresentadas nas Figuras 20 e 21.

Figura 18 - Perfil de temperatura do ar em Chapecó/SC.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

Figura 19 - Perfil de temperatura do ar em Frederico Westphalen/RS.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

Embora Chapecó/SC tenha apresentado uma menor amplitude térmica mensal, é relevante notar que esses dados provêm da estação mais recente (2019) e possuem menos registros.

Por outro lado, os dados de Frederico Westphalen/RS exibiram uma dispersão menor, possivelmente devido à maior quantidade de dados disponíveis. No que tange à umidade relativa, Frederico Westphalen/RS demonstrou uma estabilidade relativa ao longo do ano, oscilando entre 60% e 90%, com um leve aumento durante o inverno (UR > 70%), como mostrado nas Figuras 22 e 23.

Nos dados de Chapecó/SC, observou-se também este aumento na umidade relativa no inverno, isto também pode ser por conta do período de dados.

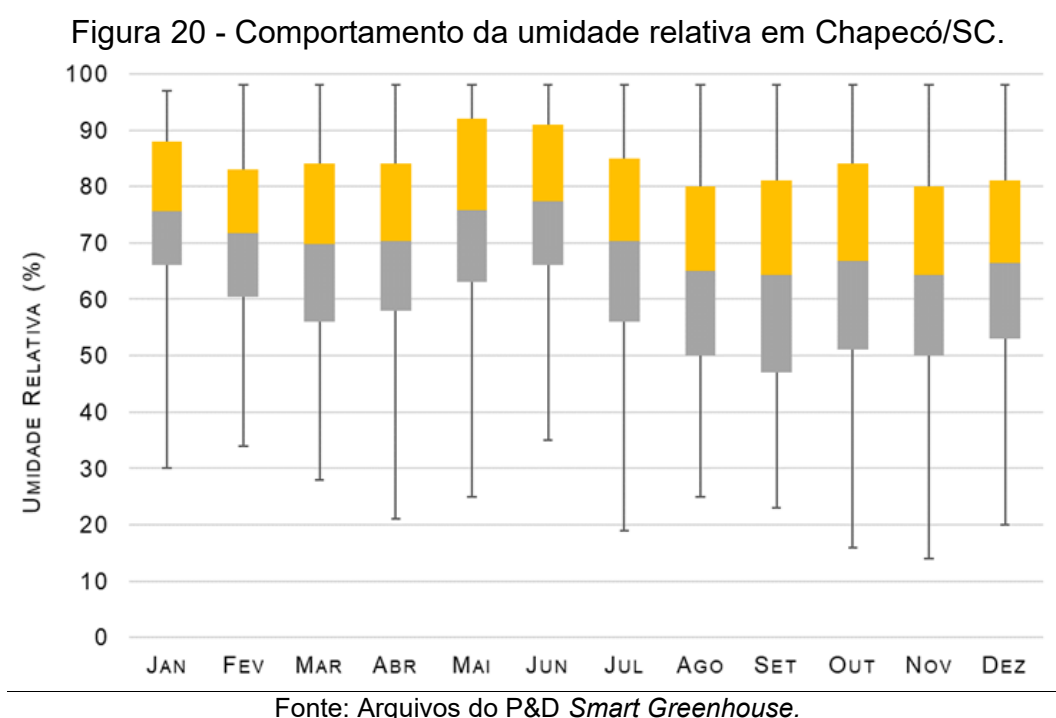
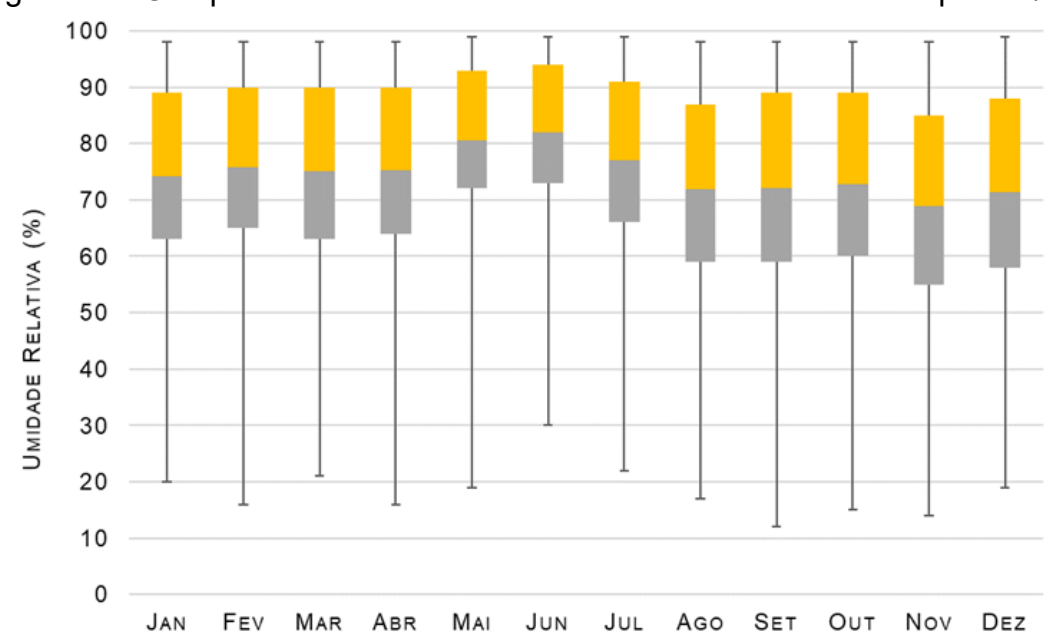


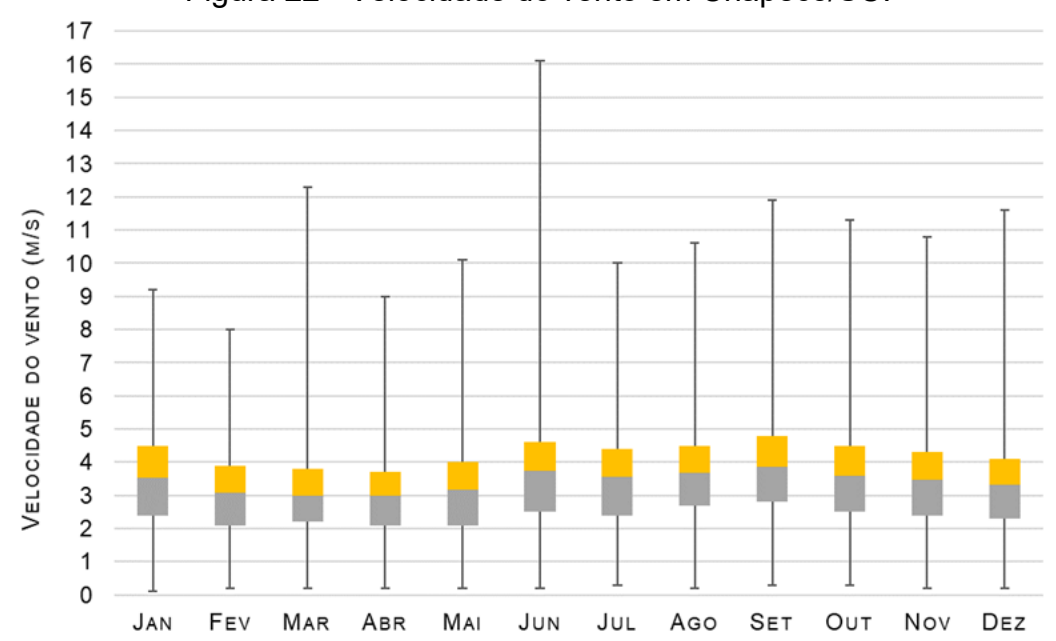
Figura 21 - Comportamento da umidade relativa em Frederico Westphalen/RS.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

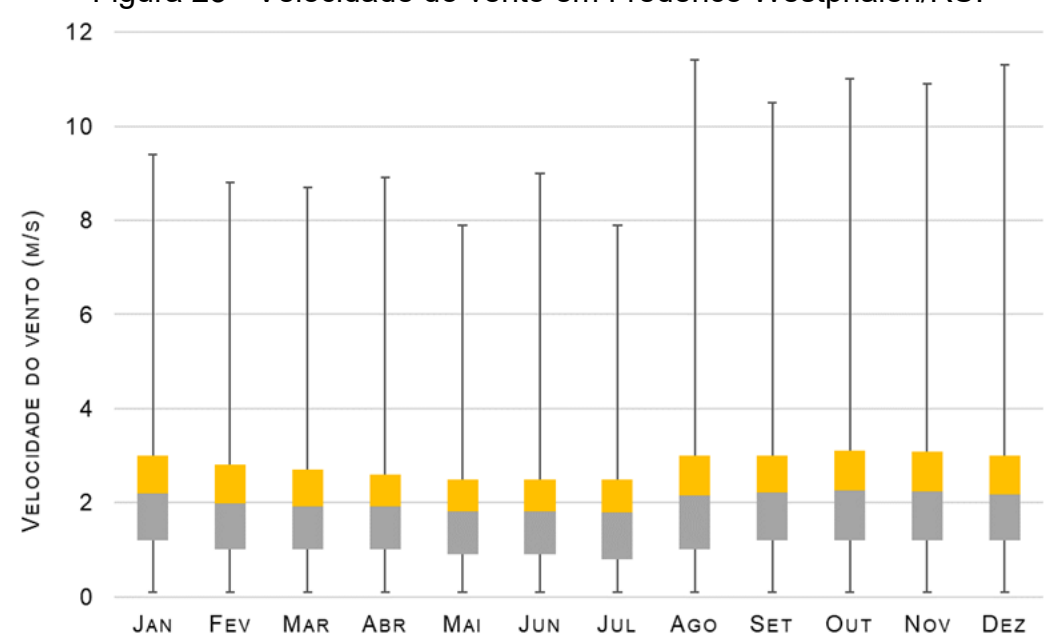
Com relação a velocidade do vento (Figuras 24 e 25), observou-se que a cidade de Chapecó/SC apresenta velocidades mais altas ao longo de todo o ano quando comparada com Frederico Westphalen/RS.

Figura 22 - Velocidade do vento em Chapecó/SC.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

Figura 23 - Velocidade do vento em Frederico Westphalen/RS.

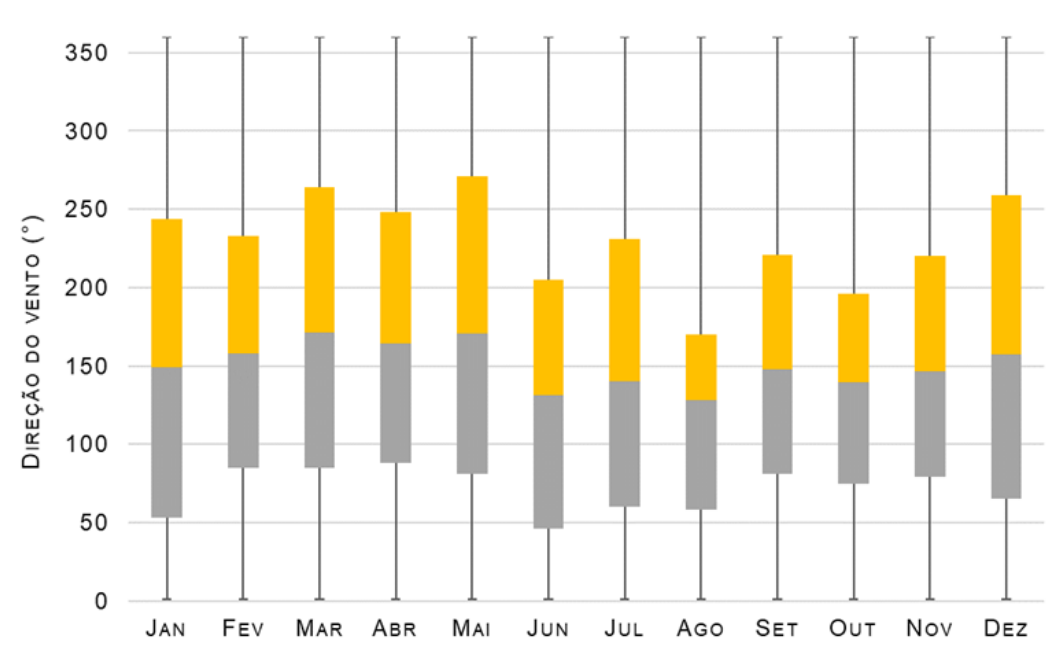


Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

Em Chapecó/SC a velocidade do vento variou entre 2 m/s e 5 m/s, com máximas horárias de até 16 m/s. Já em Frederico Westphalen/RS a velocidade permaneceu entre 1 m/s e 3 m/s na maior parte do tempo, com máxima de 12 m/s. Ressaltando que este comportamento é influenciado pelo local da estação meteorológica.

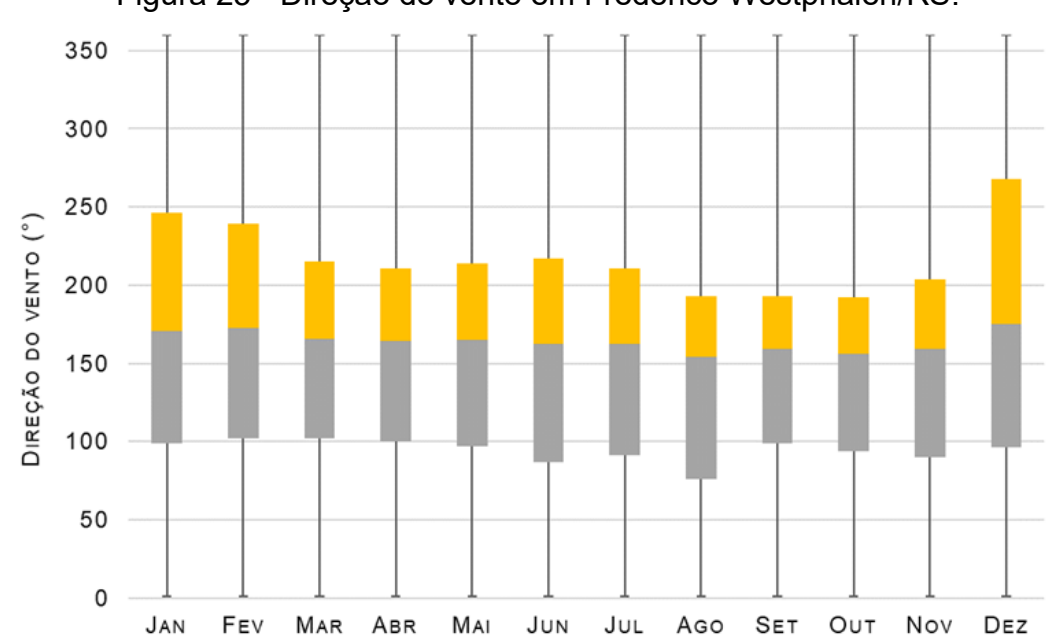
Em Chapecó/SC, Figura 26, verificou-se uma distribuição na direção do vento, em dois quadrantes, enquanto em Frederico Westphalen/RS, Figura 27, houve direção do vento predominante em um quadrante.

Figura 24 - Direção do vento em Chapecó/SC.



Fonte: Arquivos do P&D Smart Greenhouse.

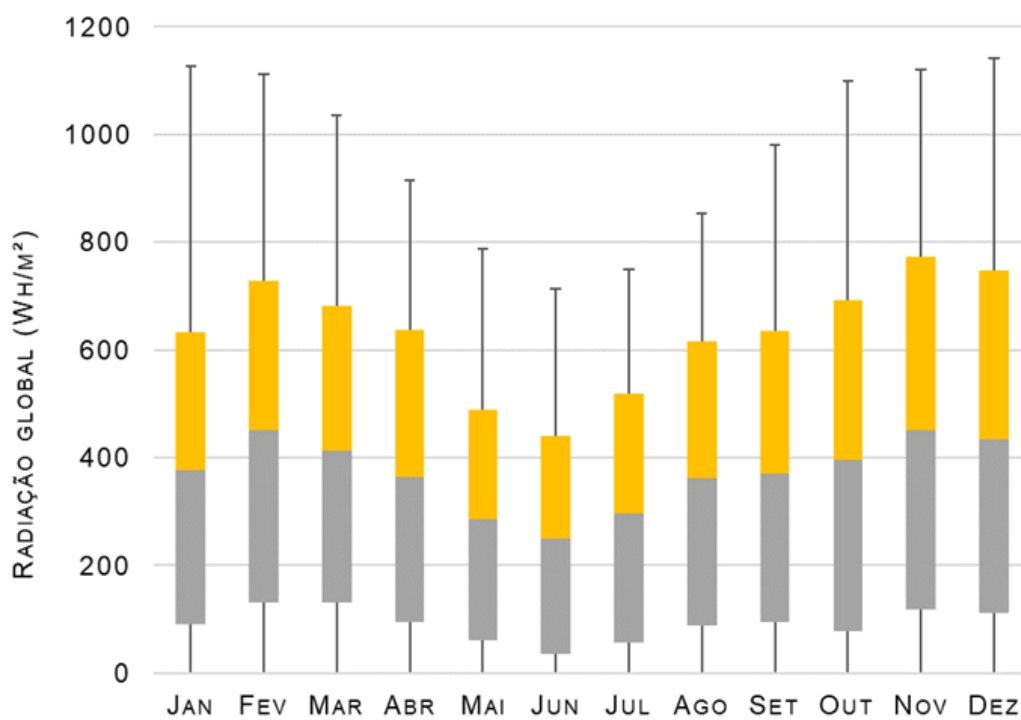
Figura 25 - Direção do vento em Frederico Westphalen/RS.



Fonte: Arquivos do P&D Smart Greenhouse.

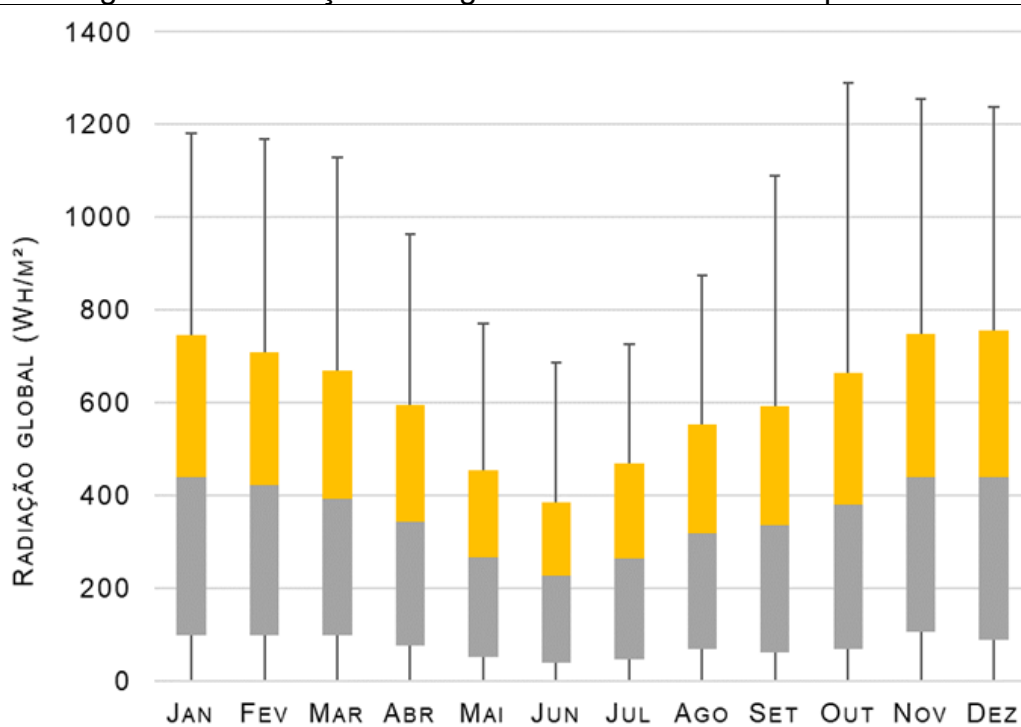
O comportamento da radiação solar (Figuras 28 e 29) nas duas cidades foi semelhante, apresentando redução nos meses de inverno. A principal diferença está nos valores máximos dos meses mais quentes, que não atingem os 1200 Wh/m² em Chapecó/SC, mas atingem cerca de 1300 Wh/m² no mês de outubro em Frederico Westphalen/RS.

Figura 26 - Radiação solar global em Chapecó/SC.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

Figura 27 - Radiação solar global em Frederico Westphalen/RS.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

4.4 MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Para a modelagem e simulação termoenergética da casa de vegetação, foram empregadas ferramentas computacionais: *software EnergyPlus*, com apoio do *software SketchUp* e do *plugin* Euclid. Estas ferramentas possibilitaram a modelagem das zonas térmicas da edificação, contemplando dimensões, orientação, tipologia construtiva (como paredes, janelas, telhados, pisos), carga térmica, entre outros parâmetros, iniciando com a definição de um arquivo climático no formato TMY (*Typical Meteorological Year*) para o local da edificação. A simulação termoenergética teve como objetivo obter dados como carga térmica anual e identificar possíveis melhorias na arquitetura da casa de vegetação.

A transmitância dos materiais da envoltória foi um parâmetro fundamental na modelagem, que possibilita a análise de cenários termoenergéticos, a serem validados com dados reais obtidos da operação da casa de vegetação. Foram estudadas as principais telas e materiais agrícolas, como aluminet, sombrite, chromatinet e clarite, aplicados à envoltória.

Ainda foram modelados os materiais, equipamentos, ventilação natural e iluminação, simulando o desempenho global da edificação e fornecendo dados, como a carga térmica anual, que orientaram ajustes arquitetônicos para otimizar o ambiente e o uso de energia, utilizando dados contidos no próprio *software*.

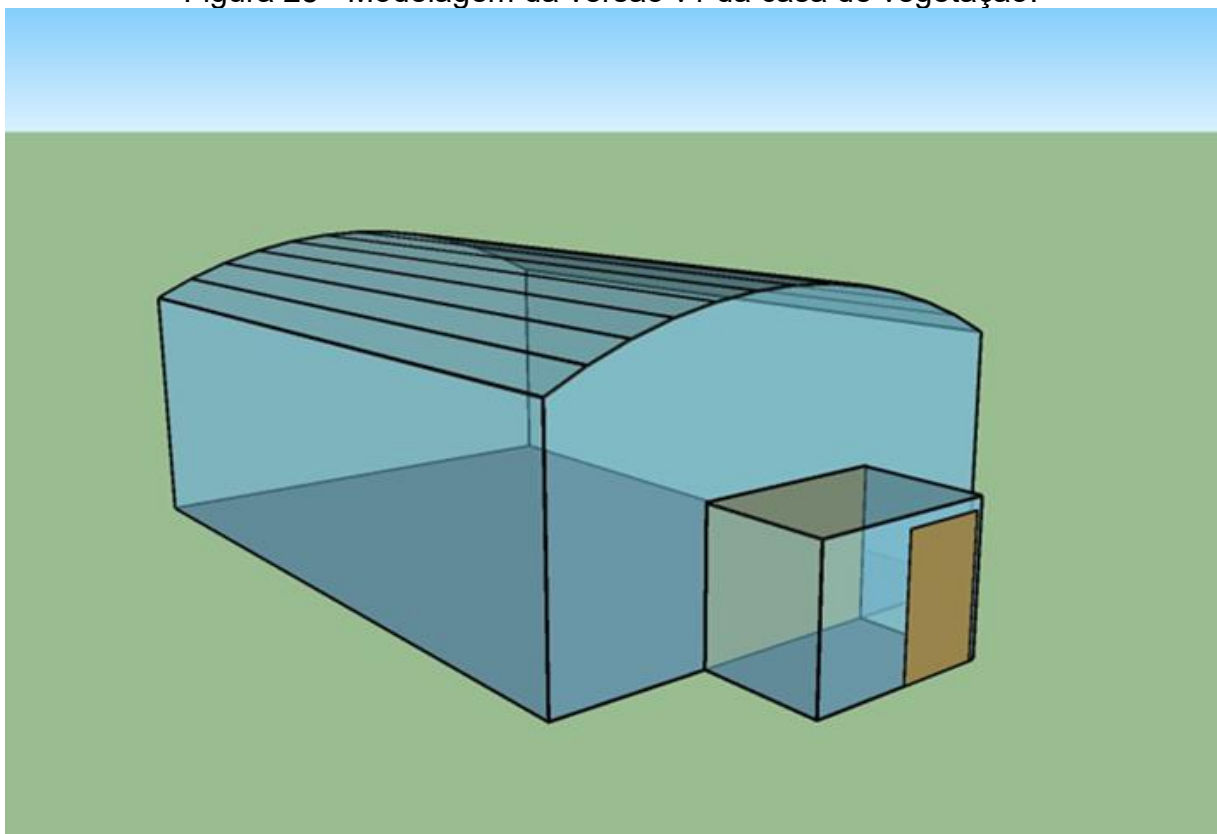
4.4.1 Modelagem

Diversas versões de simulação foram desenvolvidas, denominadas v1, v2 e v3. Na v1, indicada na Figura 30, foram incluídas análises de cortinas controladas por gradiente de temperatura e a influência da radiação nas paredes.

Utilizou-se a variável de temperatura do solo diretamente do arquivo climático disponível no *software* e o material de cobertura considerado foi o filme agrícola padrão, sem tratamentos adicionais.

Essa configuração permitiu uma simulação inicial das condições térmicas internas da estufa, servindo como base para aprimoramentos futuros.

Figura 28 - Modelagem da versão v1 da casa de vegetação.

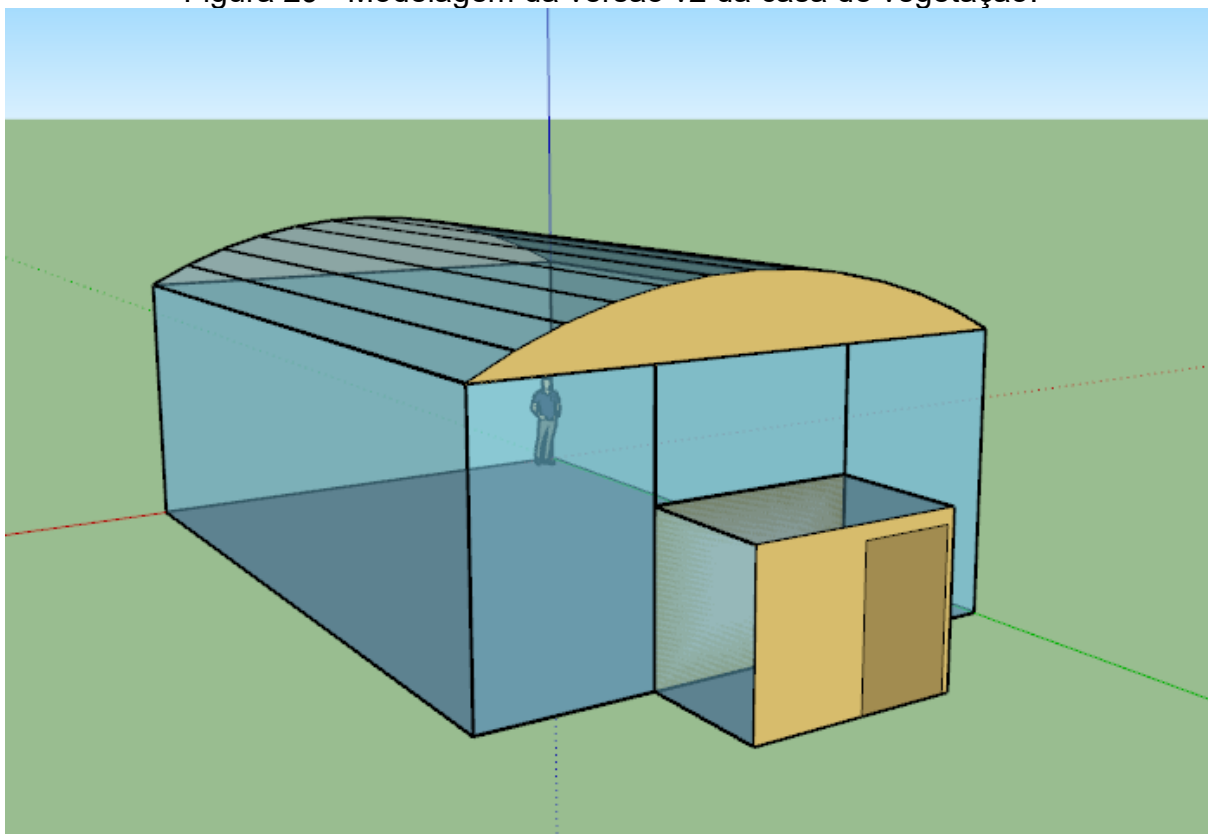


Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

Já na versão v2, Figura 31, foram incorporadas melhorias importantes para aumentar a precisão da simulação. A temperatura do solo passou a ser considerada como um perfil mensal das médias calculadas a partir dos dados climáticos, processados via Excel para melhor adequação ao *software*.

Também foram adicionadas cortinas de aluminet, controladas por gradiente de temperatura, material que foi representado por propriedades térmicas próximas, conforme a norma ABNT NBR 15220, devido à ausência deste no banco de dados do *software*. Outra mudança, foi a adoção do filme difusor na cobertura externa da estufa, que promove melhor distribuição da radiação solar.

Figura 29 - Modelagem da versão v2 da casa de vegetação.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

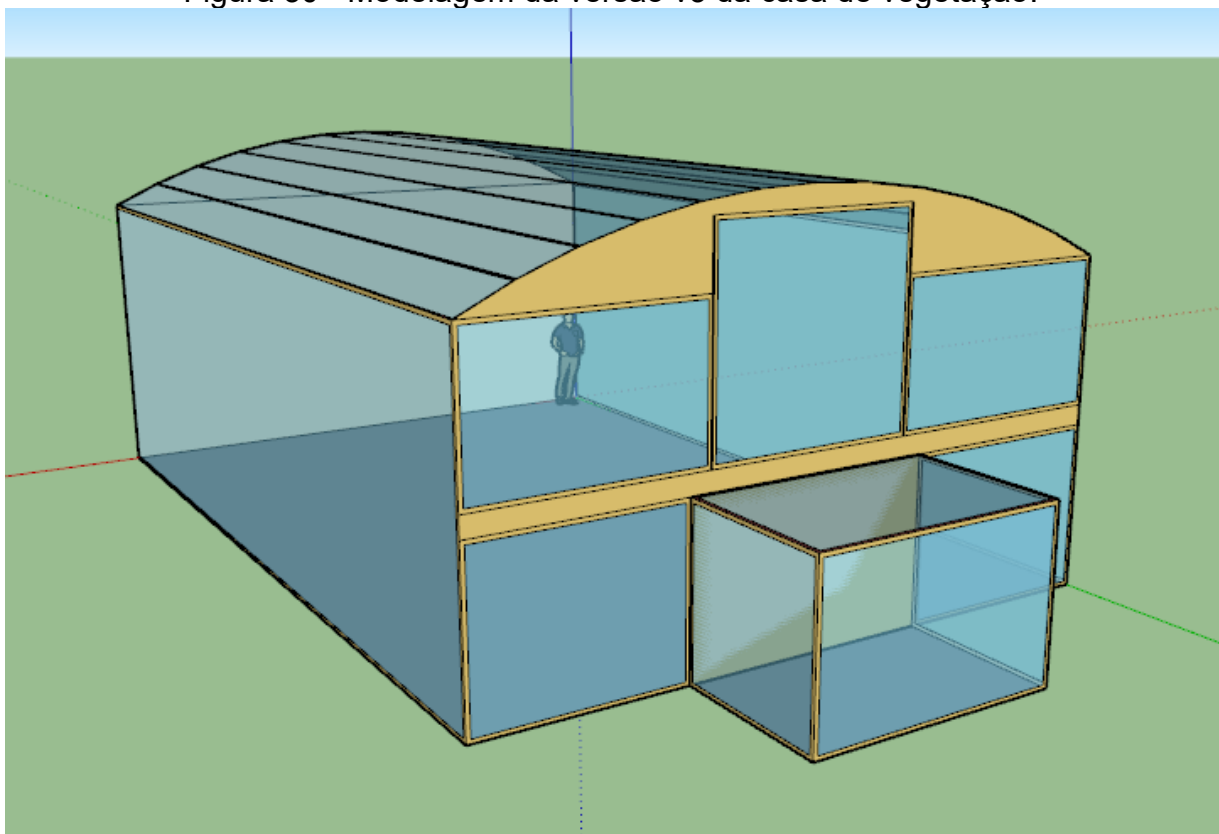
Essas alterações permitiram uma análise mais detalhada do comportamento térmico da casa de vegetação, especialmente quanto à influência da radiação solar nas paredes e ao controle térmico interno por meio das cortinas.

Na versão V3, indicada na Figura 32, a modelagem da casa de vegetação foi aprimorada com a incorporação de novos elementos e sistemas, tornando-a a mais representativa entre as três versões desenvolvidas.

Foram adicionados um controle de temperatura mais preciso, a representação do sistema de iluminação artificial, a janela central, bem como o controle automatizado das cortinas e da parede úmida, destinada ao resfriamento evaporativo.

Essas modificações visaram ampliar a fidelidade da simulação em relação ao funcionamento real da estufa, possibilitando uma análise mais detalhada do desempenho termoenergético e das condições internas para o cultivo.

Figura 30 - Modelagem da versão v3 da casa de vegetação.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

Devido às limitações do *software*, todas as paredes da casa de vegetação foram modeladas como janelas, o que constitui uma aproximação técnica adequada, permitindo que o programa reconheça as superfícies translúcidas e possibilite a aplicação do material de filme difusor. Ressalta-se que a ferramenta foi originalmente desenvolvida para a modelagem termoenergética de edificações e, neste caso, adaptada para a casa de vegetação.

4.4.2 Simulação

Foram implementadas estratégias passivas de refrigeração e umidificação na casa de vegetação, como a parede úmida e o sombreamento. Contudo, na simulação, apenas o sombreamento foi considerado, desconsiderando-se a parametrização por umidade relativa (UR), que apresentou variações nas diferentes fases de climatização. A UR tem alto impacto e por isso, a umidade relativa da estufa precisa ser alta, idealmente acima de 90%, sendo assim com um valor alto de UR, mas fixo.

O controle das cortinas e do *HVAC* foi realizado por *setpoints* de temperatura ótimas para as mudas, de 28°C a 35°C e de 18°C a 35°C, respectivamente, visando à redução da área aquecida e à manutenção das condições internas, com valores definidos para temperaturas interna e externa. Para simplificação, não foram inseridos *schedules* de ocupação, e a iluminação artificial foi modelada separadamente no *software DIALux*.

4.5 SISTEMA DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL

A definição do sistema de iluminação, destinado ao fotoperíodo das mudas, envolveu critérios relacionados à particularidade, temperatura de cor, espectro, potência, eficiência e grau de impermeabilidade das luminárias. Inicialmente, avaliou-se a utilização de fitas de LED com proteção IP65 (resistentes à água) e controle RGB, já que a solução ideal para o desenvolvimento das mudas envolveu a combinação de LEDs nas cores vermelha e azul. No entanto, não havia opções comerciais de fitas LED com potência suficiente para garantir os níveis mínimos de iluminância necessários para a fotossíntese das mudas.

Diante disso, foram simulados doze cenários distintos de iluminação, tomando como base um orçamento preliminar que orientou a estimativa do tipo, potência e quantidade de luminárias possíveis para cada casa de vegetação. As simulações consideraram diferentes combinações de altura, potência e distribuição das luminárias, todas realizadas em condições noturnas, ou seja, sem contribuição de iluminação natural.

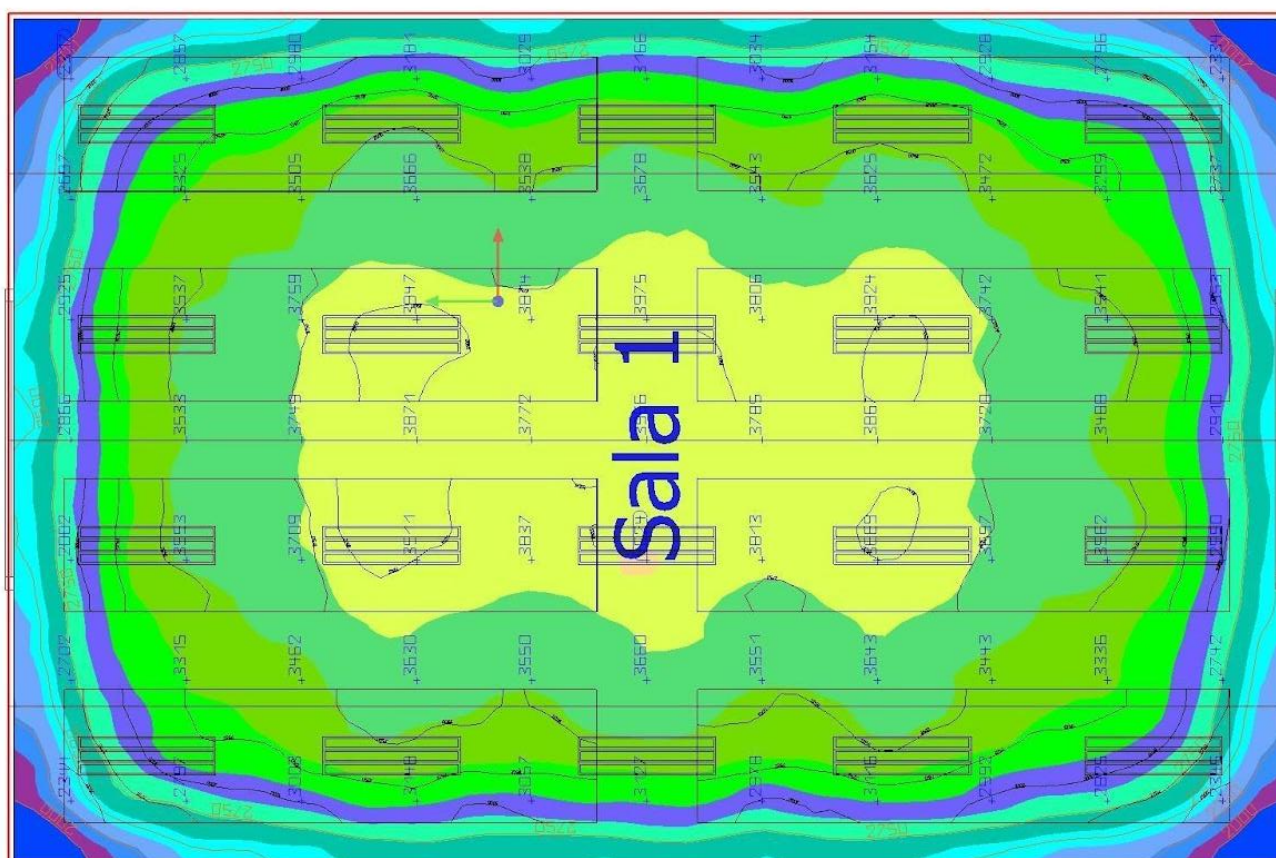
Como referência, foi selecionada uma luminária de 50 W, porém para simular potências maiores de 100 W, 150 W e 200 W, foram agrupadas em conjuntos até alcançar a potência desejada. Foi observado que, com cinco linhas de luminárias de 100 W dispostas em três colunas, a iluminância no plano das mesas (a um metro do solo) atinge cerca de 1.500 lux no centro da casa de vegetação, diminuindo para aproximadamente 1.100 lux próximo às paredes, devido à ausência de luz natural.

Com a redistribuição das mesmas cinco lâmpadas em quatro circuitos, os níveis centrais aumentam para cerca de 1.900 lux, enquanto nas extremidades a iluminância média é de 1.500 lux, evidenciando o ganho proporcionado pelo acréscimo de luminárias.

Entre os cenários analisados, optou-se pelo modelo com luminárias de 150 W, distribuídas em 5 lâmpadas e 4 circuitos, de forma a centralizá-las sobre as bancadas de apoio das mudas. Embora os resultados apresentados correspondam a luminárias de 150 W e 15.500 lúmens, as luminárias instaladas possuem 130 W, com 1,20 m de comprimento, 0,1 m de largura e fluxo luminoso de 18.850 lúmens.

Em consenso com o fornecedor e de acordo com o orçamento disponível, um último cenário foi simulado para validar essa disposição, conforme mostrado na Figura 33. Os retângulos representam as luminárias e a escala de cores, de amarelo à azul escuro, indicam o nível de luminosidade de maior para menor, respectivamente.

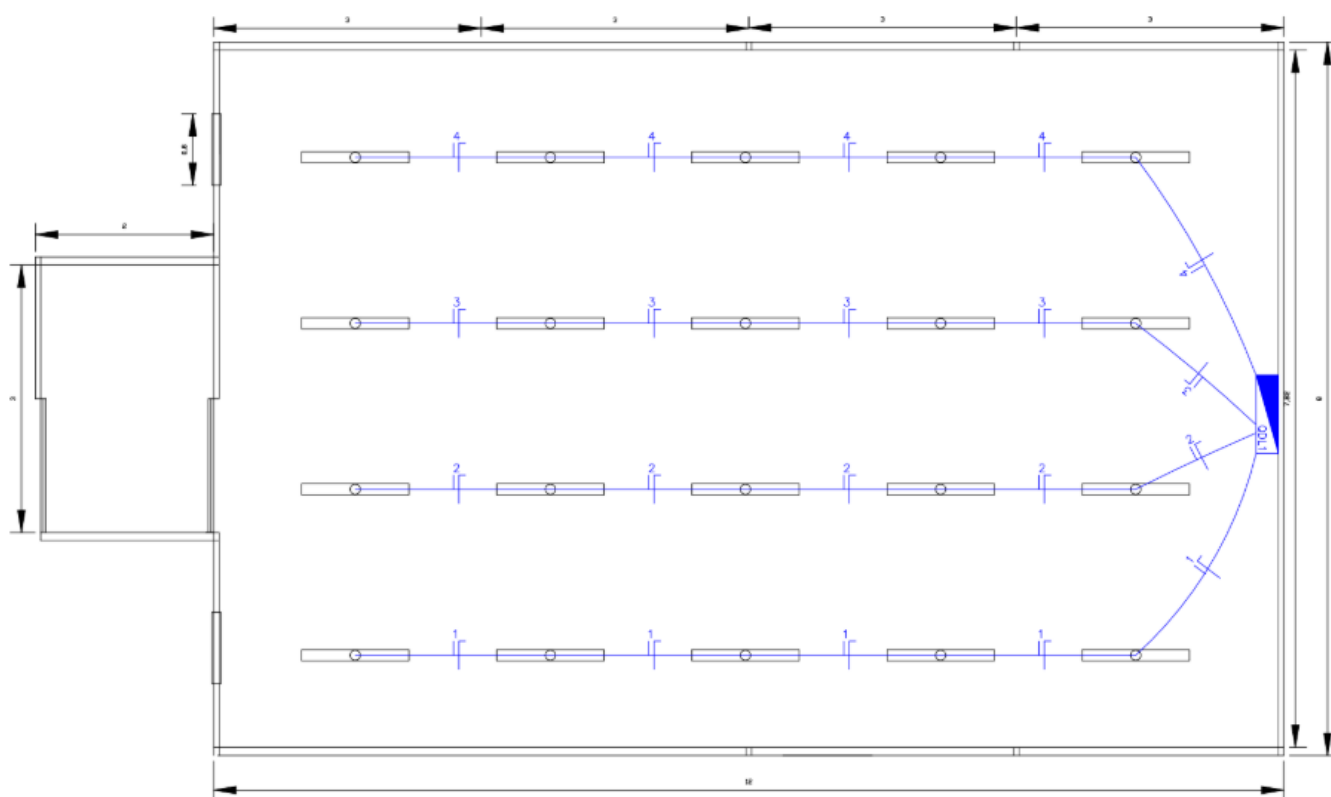
Figura 31 - Sistema de iluminação para fotoperíodo.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*

A Figura 34, indica o esquemático deste sistema de iluminação, onde para cada coluna de luminária foi representado um circuito independente, visto que o acionamento das luminárias será feito por zonas individuais. Os retângulos, novamente indicam as luminárias e o símbolo à direita em azul o quadro elétrico, com a distribuição e divisão do sistema conforme numeração indicada: quatro diferentes circuitos.

Figura 32 - Esquema elétrico do sistema de iluminação para fotoperíodo.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*

4.6 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Com base na análise das características dos sistemas que podem ser aplicados e modelados em *softwares* como SAM/NREL e *Retscreen*, a opção *off-grid* foi avaliada para suprir a demanda de energia elétrica do sistema computacional, incluindo um carregador de baterias em paralelo com o gerador fotovoltaico. No entanto, após a avaliação do desempenho das três configurações de sistemas estudadas no contexto deste projeto, o sistema fotovoltaico conectado à rede emergiu como a opção mais viável tanto tecnicamente quanto economicamente em comparação com as demais topologias. Conseqüentemente, essa configuração foi selecionada para integrar o projeto das casas de vegetação inteligentes e energeticamente eficientes.

A integração dos módulos fotovoltaicos à arquitetura da casa de vegetação foi considerada, porém, descartada devido ao impacto econômico adverso. Tal abordagem demandaria uma estrutura mais robusta e imporiam restrições na seleção de tecnologias e modelos de módulos fotovoltaicos. Parâmetros específicos de transmissividade solar seriam necessários para evitar sombreamentos no interior da casa de vegetação, enquanto as restrições em modelos e tecnologias de módulos aumentariam os custos do projeto e da instalação.

O dimensionamento do sistema foi conduzido utilizando o *software Retscreen* e o método analítico do mês crítico. O parâmetro de autonomia de energia elétrica foi considerado para otimizar a configuração técnica e econômica do sistema fotovoltaico, com um carregador de baterias de corrente alternada deve ser incorporado ao sistema para minimizar as chances de perda de carga.

Os dados de radiação solar para as localidades de Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS foram adquiridos por meio do *software SunData*, desenvolvido pelo CRESESB/CEPEL. Este programa utiliza informações disponíveis no Atlas Brasileiro de Energia Solar do LABREN/INPE. Através dos modelos de *SunData* foi possível realizar o cálculo da irradiação solar média diária mensal tanto no plano horizontal quanto no plano inclinado, por meio do SolarGIS.

A produtividade de referência (YR) é uma métrica que correlaciona a irradiação solar e a irradiância padrão em um intervalo de tempo específico, expressa em kWh/kW.dia. Os dados de irradiação solar para Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Irradiação solar de Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS.

Mês	nº dias	Irradiação solar no plano horizontal (kWh/m ² . dia)		Irradiação solar no plano inclinado (kWh/m ² . dia)		Produtividade de referência (kWh/kW.dia)	
		Santa Rosa do Sul/SC	Alpestre/RS	Santa Rosa do Sul/SC	Alpestre/RS	Santa Rosa do Sul/SC	Alpestre/RS
Jan	31	5,14	6,29	5,10	5,84	5,10	5,84
Fev	28	4,86	5,86	5,03	5,73	5,03	5,73
Mar	31	4,20	5,15	4,7	5,42	4,7	5,42
Abr	30	3,67	4,09	4,45	4,72	4,45	4,72
Mai	31	2,85	3,10	3,78	3,87	3,78	3,87
Jun	30	2,41	2,59	3,28	3,35	3,28	3,35
Jul	31	2,66	2,90	3,54	3,71	3,54	3,71
Ago	31	3,34	3,74	4,10	4,47	4,10	4,47
Set	30	3,39	4,01	3,74	4,33	3,74	4,33
Out	31	3,97	5,17	4,15	5,17	4,15	5,17
Nov	30	5,23	6,20	5,14	5,83	5,14	5,83
Dez	31	5,45	6,61	5,24	6,04	5,24	6,04
Média		3,65	4,29	4,18	4,66	4,18	4,66

Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

Para alcançar a modelagem de sistema atual, os dados de consumo foram estipulados com base na potência de aparelhos e tempo de uso nas casas de vegetação, resultando nos valores da Tabela 3, juntamente aos dados estimados de geração do primeiro ano do sistema aplicado. O sistema possui potência total de 6,37 kWp, contando com um inversor Growatt 5 kW e 14 módulos fotovoltaicos monocristalinos 450 Wp.

Tabela 3 - Estimativa de geração de energia elétrica mensal do sistema fotovoltaico.

Mês	Geração (kWh)	Consumo (kWh)
Jan	915	815
Fev	752	652
Mar	774	674
Abr	618	518
Mai	559	459
Jun	460	360
Jul	513	413
Ago	610	510
Set	656	556
Out	810	710
Nov	835	735
Dez	872	772
Média Mensal	698	598

Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

É importante ressaltar que as cargas que consomem potência neste sistema são os equipamentos essenciais para monitorar e alcançar os parâmetros estipulados. Isso inclui dispositivos como aquecedores para controle de temperatura, motores para acionamento de cortinas e forros, exaustores e sistemas para paredes úmidas, entre outros.

4.7 DEFINIÇÃO DAS CULTURAS A SEREM IMPLEMENTADAS

Para validação, foram utilizadas mudas de bananeiras da variedade Nanicão Corupá e de orquídeas da variedade *Phalaenopsis*, na *Smart and Efficient Greenhouse*, produzidas por cultivo *in vitro* e padronizadas para transplante. O intuito foi comparar crescimento e desenvolvimento das mudas durante a aclimação em dois ambientes: SGH e CGH. Foram consideradas altura, número de folhas e diâmetro do pseudocaule para avaliação do desenvolvimento

A SGH contou com suplementação luminosa, dióxido de carbono, fertirrigação diária, irrigação por microaspersão e controle climático automático via inteligência artificial.

Já a CGH usou lona agrícola, tela sombrite, irrigação programada e fertirrigação manual, com ajustes para condições nutricionais similares. Temperatura e umidade interna foram monitoradas em ambos os ambientes com *dataloggers* e sensores.

Análises morfológicas foram feitas a cada 15 dias, medindo comprimento e diâmetro do pseudocaule, número de folhas, área foliar, massa fresca e seca. Também foram realizadas análises metabólicas e mineralógicas para avaliar açúcares e nutrientes essenciais.

Avaliações fisiológicas de clorofilas e carotenóides foram feitas por métodos destrutivos e não destrutivos. Nas orquídeas, as análises morfológicas ocorreram no transplante, após 15 dias e em períodos até 60 dias, incluindo altura, diâmetro do caule, número de folhas e índice de mortalidade. Os dados foram analisados estatisticamente para comparar os tratamentos e analisar a viabilidade.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos e suas respectivas análises foram estruturados em três eixos principais: arquitetura e estratégias bioclimáticas adotadas, sistema fotovoltaico implementado e desempenho final das mudas.

5.1 ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS PASSIVAS

As estratégias passivas apresentaram interdependência intrínseca, sendo, portanto, mais apropriado abordá-las de forma integrada e sistêmica, a fim de evidenciar sua atuação conjunta no desempenho ambiental da edificação.

Com as janelas, ou aberturas, foi possível regular passivamente o microclima interno, controlando temperatura, umidade e renovação de dióxido de carbono, reduzindo a necessidade de climatização artificial. Esse sistema é apresentado na Figura 35, sendo, também, possível notar a estação meteorológica acima deste.

Figura 33 - Sistema de abertura e estação meteorológica em Alpestre/RS.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

A cortina de aluminet proporcionou sombreamento em dias de alta insolação e reduziu perdas térmicas pelas laterais e pelo forro de filme plástico, favorecendo a iluminação natural e o aquecimento uniforme da estufa. Esses sistemas, apresentados na Figura 36, integrados à automação da casa de vegetação, são acionados por motores e controlados por um sistema inteligente, que processa dados de sensores internos e da estação meteorológica.

Figura 34 - Cortina de aluminet e forro móvel.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

5.2 ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS ATIVAS

O sistema de resfriamento evaporativo com parede úmida de celulose, indicado na Figura 37, demonstrou eficácia, reduzindo a temperatura interna em até 5°C em dias com umidade relativa abaixo de 60%, conforme testes realizados anteriormente. Em Alpestre, a integração com *windcatchers* permitiu uma economia adicional de 20% no consumo de água.

Os aquecedores elétricos de 3 kW, operando em estágios variáveis (30W-3.000W), consumiram 1.621 kWh/ano em Santa Rosa do Sul, sendo que testes em agosto/2022 comprovaram sua capacidade de elevar a temperatura noturna em 8°C, embora ainda necessitem de ajustes na vedação para otimização completa.

Figura 35 - Parede úmida de celulose.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

O sistema de exaustão foi aplicado em conjunto com o sistema evaporativo, demonstrado na Figura 38. Essa integração permitiu a renovação constante do ar, potencializando o resfriamento proporcionado pela parede úmida e garantindo condições ambientais adequadas para o desenvolvimento das plantas.

Figura 36 – Exaustores.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

A simulação termoenergética das casas de vegetação localizadas em Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS permitiu avaliar diferentes cenários de operação, com ênfase nos intervalos de temperatura para acionamento dos sistemas ativos de resfriamento e aquecimento. As análises indicaram que a demanda anual de energia elétrica variou entre aproximadamente 2.200 kWh e 5.600 kWh, enquanto a necessidade específica para aquecimento situou-se entre 1.600 kWh e 4.900 kWh. A potência necessária para o sistema de aquecimento foi estimada entre 6,2 kW e 9,7 kW. Os resultados obtidos, apresentados na Tabela 4, foram fundamentais para o dimensionamento dos sistemas *HVAC*.

Tabela 4 - Resultados da simulação termo energética das casas de vegetação.

Parâmetros	Santa Rosa do Sul/SC		Alpestre/RS	
	Intervalo de temperatura		Intervalo de temperatura	
Temperatura	15°C - 35 °C	18 °C – 35 °C	15 °C – 35 °C	18 °C - 35 °C
Energia Total (kWh/ano)	2208,45	4411,76	2941,03	5567,41
Aquecimento (kWh/ano)	1621,50	3795,93	2345,87	4937,81
Potência do sistema de aquecimento (kW)	6,2	8,2	7,6	9,7

Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

Verificou-se que a demanda de resfriamento foi relativamente baixa, sugerindo que as estratégias bioclimáticas passivas e ativas implementadas são suficientes para atender às condições de conforto térmico, dispensando a necessidade de climatização artificial para resfriamento.

Por outro lado, o aquecimento da casa de vegetação exigiu suporte adicional, além das estratégias passivas, sendo utilizado um sistema elétrico composto por quatro aquecedores, conforme Figura 39. Cada equipamento possui potência ajustável em três níveis: 30 W, 1.500 W e 3.000 W, com controle de temperatura entre 0 °C e 75 °C. O sistema, com potência total de 12 kW e consumo máximo de 12 kWh, desempenhou a função de aquecer e desumidificar o ambiente interno, assegurando as condições ideais para o desenvolvimento das culturas.

Figura 37 - Sistema de aquecimento.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

No aspecto de iluminação, os LEDs de 130W (18.850 lumens) atingiram 6.757 lux no centro da estufa - bem acima dos 3.740 lux mínimos necessários para fotossíntese. A Figura 40 a seguir indica o sistema de iluminação aplicado visto no interior da estufa e as Figuras 41 e 42 a vista exterior, noturna e diurna, na estufa de Santa Rosa do Sul/SC.

Figura 38 - Sistema de iluminação instalado: vista interna.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

Figura 39 - Sistema de iluminação instalado: vista externa.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

Figura 40 – Vista externa da estufa.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

5.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede iniciaram as operações em agosto de 2022, tanto na cidade de Santa Rosa do Sul/SC (Figura 43) quanto em Alpestre/RS (Figura 44), atendendo às demandas das estufas.

Figura 41 - SFCR de Santa Rosa do Sul/SC.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*

Figura 42 - SFCR de Alpestre/SC.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*

O consumo e a geração de energia elétrica da casa de vegetação de Santa Rosa do Sul/SC foram monitorados de forma contínua durante o período de análise, pois eram essenciais para avaliar a compensação energética e a eficiência do sistema. A geração fotovoltaica está em operação desde agosto de 2022, enquanto o monitoramento do consumo iniciou em outubro do mesmo ano.

Entre outubro de 2022 e julho de 2023, o consumo variou de 415 kWh a 4000 kWh, refletindo ajustes decorrentes da fase de testes e validação do sistema, especialmente entre março e julho, quando os valores oscilaram entre 1200 kWh e 4000 kWh. A geração fotovoltaica, no mesmo período, variou de 575 kWh a 915 kWh, resultando em um déficit acumulado de 6050 kWh.

A Tabela 5 apresenta a comparação entre a estimativa anual de geração da casa de vegetação e os valores reais gerados pelo sistema, incluindo o saldo mensal. Destacam-se o *Performance Ratio* (PR), que mede a eficiência do sistema ao converter radiação solar em energia elétrica utilizável e *Performance Factor* (YF) que indica a eficácia da conversão de energia solar disponível em eletricidade útil pelo sistema fotovoltaico, ao longo de um período específico.

Tabela 5 - Estimativa e geração real de energia elétrica dos sistemas fotovoltaicos.

Mês	PR	Santa Rosa do Sul/SC		Alpestre/RS	
		Estimativa	Real	Estimativa	Real
		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/kWp)		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 *Smart Greenhouse*.

Esta análise demonstra que, embora a geração de energia do sistema fotovoltaico não tenha correspondido exatamente aos valores estimados, os resultados obtidos por meio do monitoramento via inversor se mostraram próximos das previsões. Esse resultado evidencia a adequação e a confiabilidade do método de simulação adotado.

5.4 ANÁLISE QUALITATIVA E COMPARATIVA DAS MUDAS

A análise qualitativa e comparativa das mudas de bananeira e orquídea permitiu a avaliação visual e comparativa do desenvolvimento das plantas em dois ambientes distintos: a SGH e a CGH.

A observação direta dos parâmetros morfológicos e fisiológicos, complementada por registros fotográficos, evidenciou diferenças consideráveis no vigor, sanidade e qualidade das mudas, atribuídas às condições ambientais de cada sistema.

Os resultados dessa análise são apresentados a seguir, destacando as principais diferenças entre os ambientes e seu impacto no desempenho das plantas.

5.4.1 Mudas de bananeiras

Os parâmetros morfológicos avaliados nas mudas de bananeira demonstraram superioridade relevante no ambiente SGH em comparação com CGH. Na Figura 45 é possível observar as mudas em fase de aclimação.

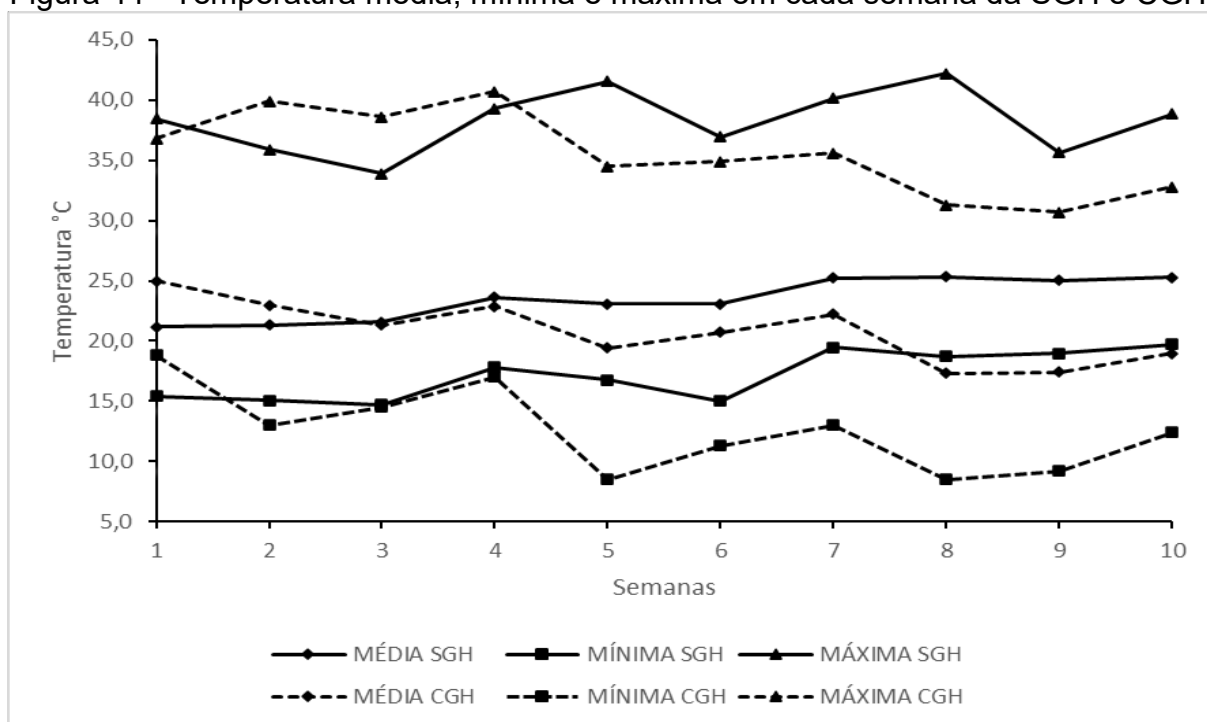
Figura 43 - Mudanças de bananeiras transplantadas em fase de aclimação.



Fonte: Arquivos do P&D Smart Greenhouse.

A Figura 46 evidencia que a SGH manteve temperaturas médias, mínimas e máximas dentro da faixa ideal para o desenvolvimento da cultura, contribuindo diretamente para o crescimento mais vigoroso das plantas.

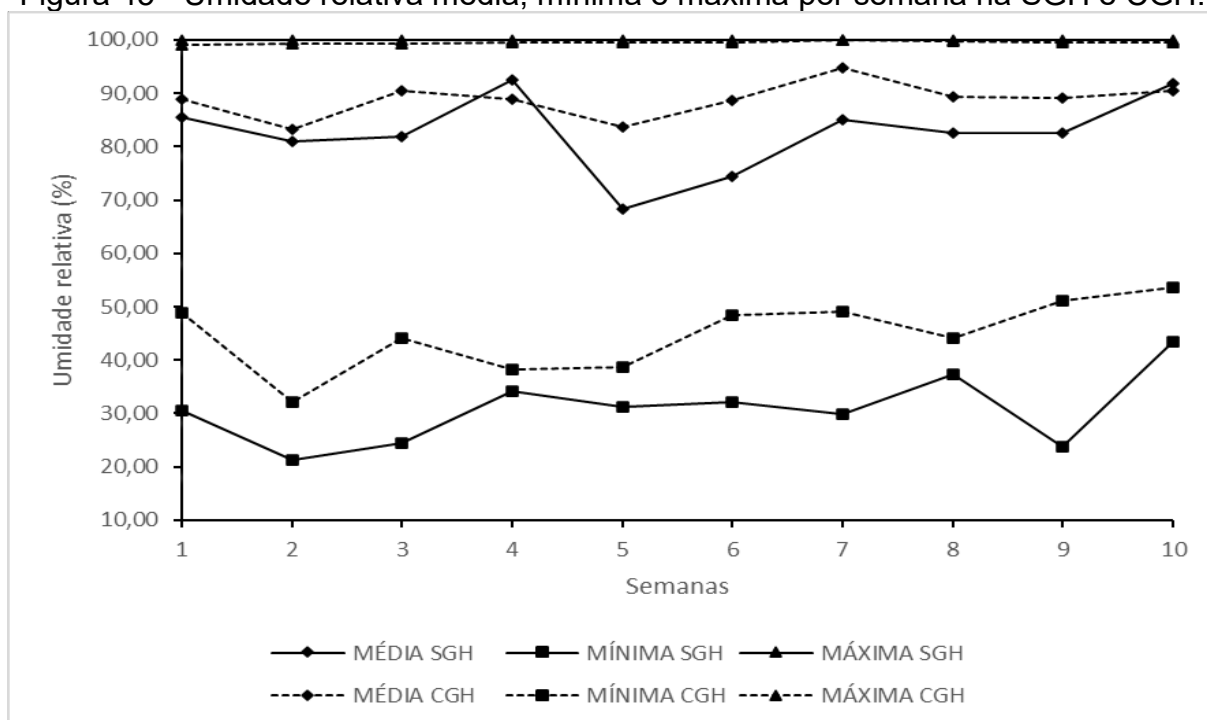
Figura 44 - Temperatura média, mínima e máxima em cada semana da SGH e CGH.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*

A umidade relativa do ar também apresentou maior estabilidade na SGH, como mostrado na Figura 47.

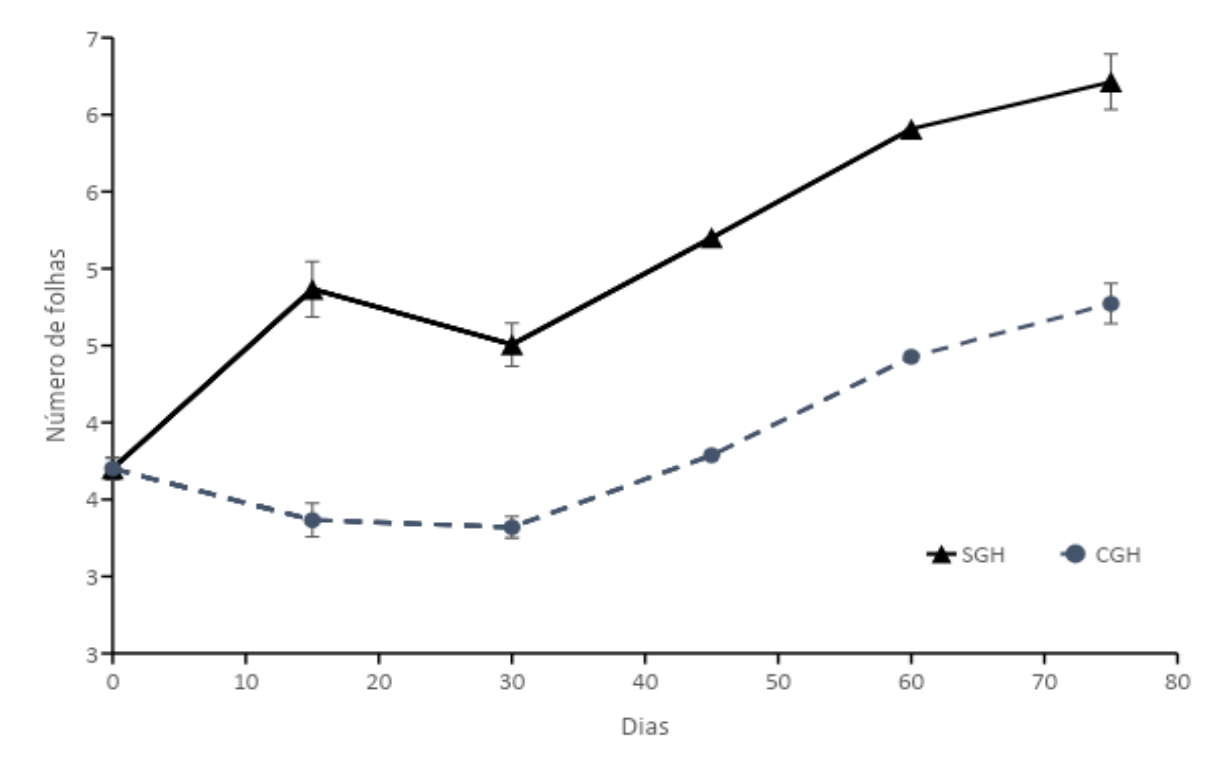
Figura 45 - Umidade relativa média, mínima e máxima por semana na SGH e CGH.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*

Observou-se redução no número de folhas nos primeiros 30 dias, conforme a Figura 48, devido à eliminação das folhas *in vitro* e posterior adaptação ao ambiente *ex vitro*. Ao final do ciclo, as mudas da SGH apresentaram, em média, 6,2 folhas, enquanto as da CGH permaneceram com 4,7 folhas.

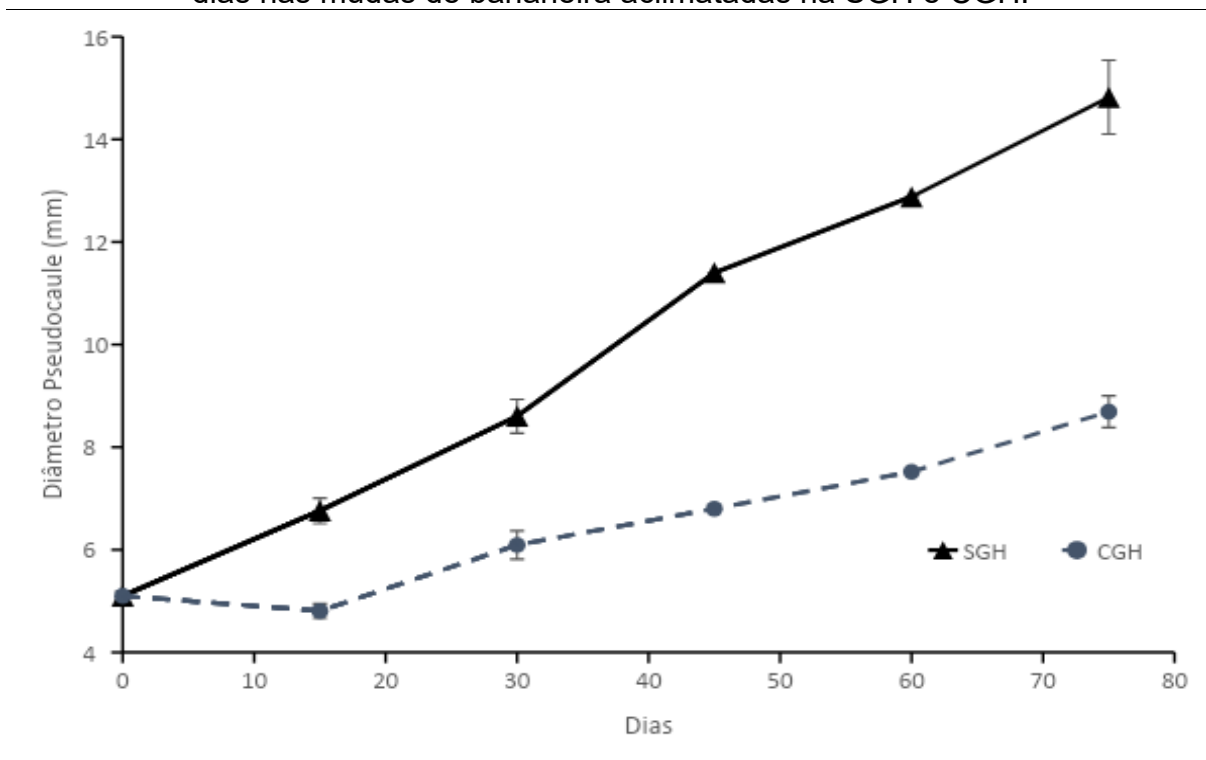
Figura 46 - Média do número de folhas avaliadas a cada 15 dias nas mudas de bananeira aclimatadas na SGH e CGH.



Fonte: Arquivos do P&D Smart Greenhouse

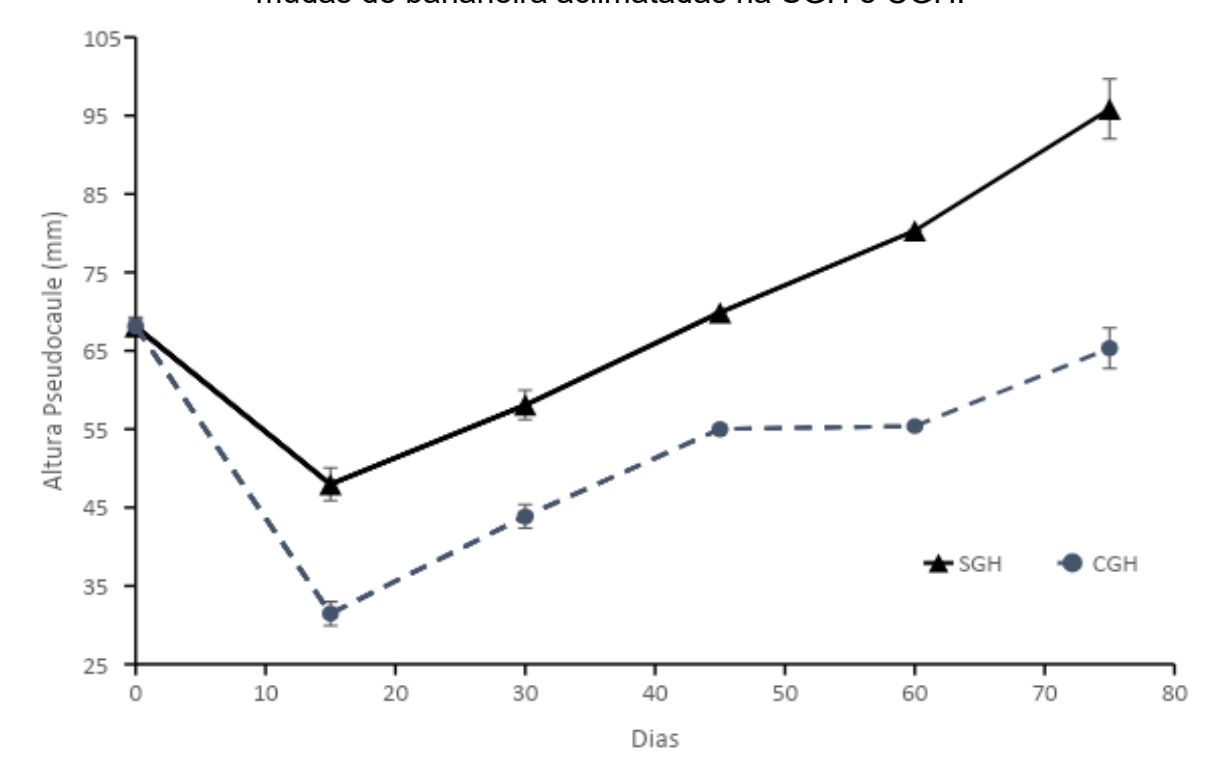
O diâmetro e a altura do pseudocaule, importantes indicadores de vigor vegetativo, foram superiores na SGH, conforme as Figuras 49 e 50. O incremento foi de aproximadamente 70,5% no diâmetro e 46,7% na altura, reforçando a maior robustez das mudas neste ambiente.

Figura 47 - Média do número do diâmetro do pseudocaule (mm) avaliado a cada 15 dias nas mudas de bananeira aclimatadas na SGH e CGH.



Fonte: Arquivos do P&D Smart Greenhouse.

Figura 48 - Média da altura do pseudocaule (mm) avaliada a cada 15 dias nas mudas de bananeira aclimatadas na SGH e CGH.



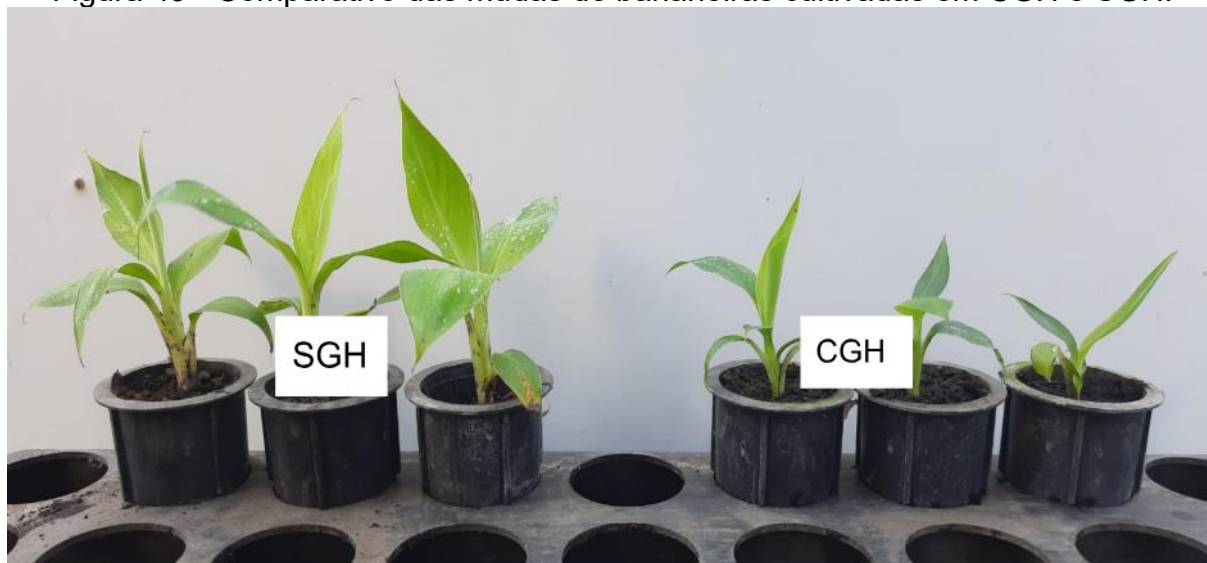
Fonte: Arquivos do P&D Smart Greenhouse

Além disso, os resultados relacionados à biomassa vegetal mostraram ganhos expressivos. A massa seca da parte aérea foi 548,3% maior, e a da raiz, 718,3% superior nas mudas da SGH. Esse desempenho é relacionado às melhores condições microclimáticas e ao enriquecimento com dióxido de carbono, que potencializou a taxa fotossintética das plantas.

As análises metabólicas indicaram maior acúmulo de carboidratos na SGH, evidenciado pelo conteúdo superior de açúcares totais, redutores e não redutores. Esse resultado está relacionado ao ambiente mais controlado, com suplementação luminosa e gestão eficiente das variáveis ambientais.

Visualmente é possível observar diferenças entre os tratamentos, principalmente quanto a altura do pseudocaule, o número e tamanho das folhas, conforme Figura 51.

Figura 49 - Comparativo das mudas de bananeiras cultivadas em CGH e SGH.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*

As plantas aclimatadas na estufa convencional apresentam porte menor, devido ao lento desenvolvimento pela falta de controle das variáveis, principalmente de temperatura, que são mais baixas neste período, umidade do ambiente e luminosidade, assim como, o fotoperíodo.

Ao completar 2 meses de aclimação foi possível definir o índice de mortalidade. No período de inverno, a mortalidade das mudas de bananeiras aclimatadas em estufa convencional foi de 26,67%, enquanto na *Smart Greenhouse* foi de 3,33%, ambas em uma população de 30 plantas.

5.4.2 Mudanças de orquídeas

As análises morfológicas das mudas de *Phalaenopsis* também demonstraram melhor desempenho na SGH. A Figura 52 apresenta as mudas no início da aclimação, evidenciando a uniformidade dos lotes.

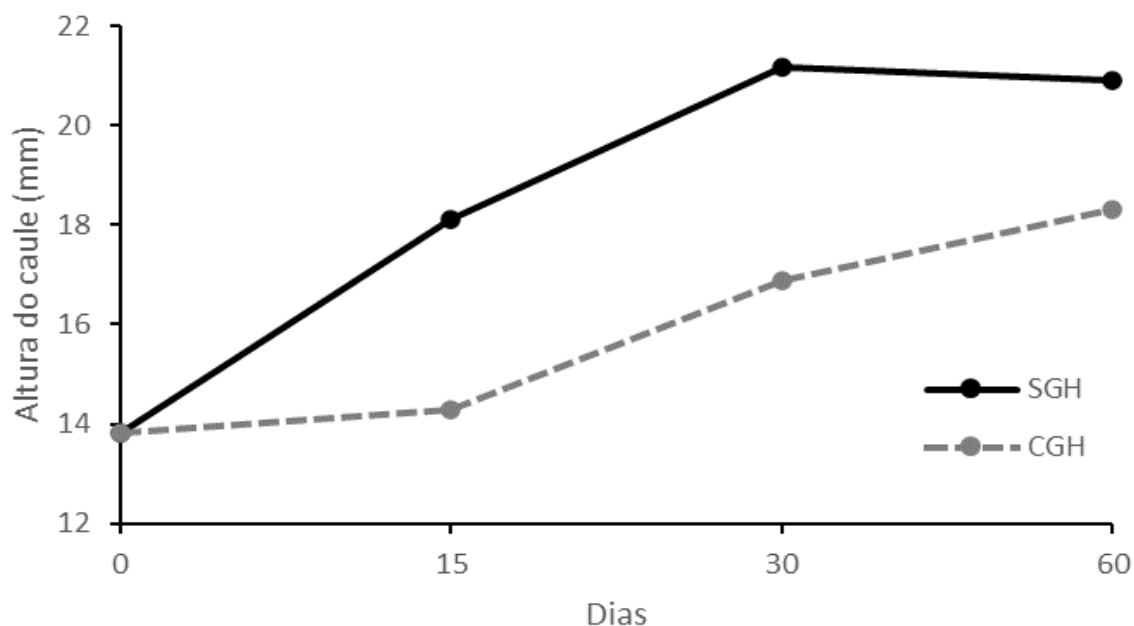
Figura 50 - Mudanças micropropagadas de *Phalaenopsis* no dia 0 de aclimação.



Fonte: Arquivos do P&D Smart Greenhouse.

Ao longo do experimento, a altura média do caule foi superior na SGH, conforme ilustrado na Figura 53.

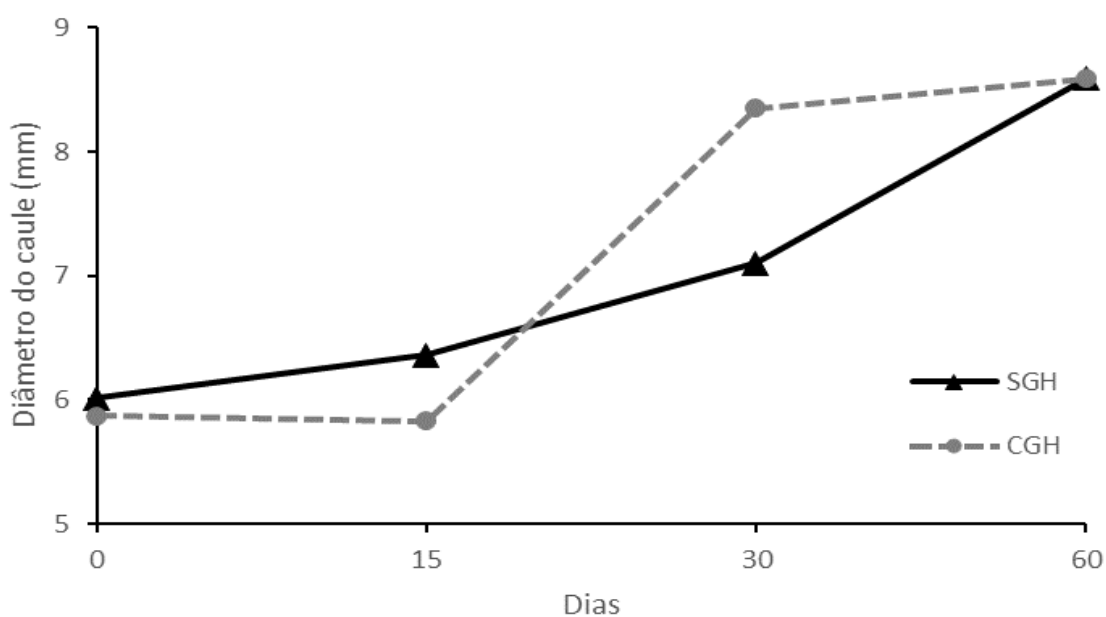
Figura 51 - Médias da altura do caule (mm) das orquídeas *Phalaenopsis* aclimatadas na SGH e CGH.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

Em relação ao diâmetro do caule, a Figura 54 indica que não houve diferença expressiva entre os tratamentos, possivelmente em decorrência do ciclo mais lento de desenvolvimento das orquídeas.

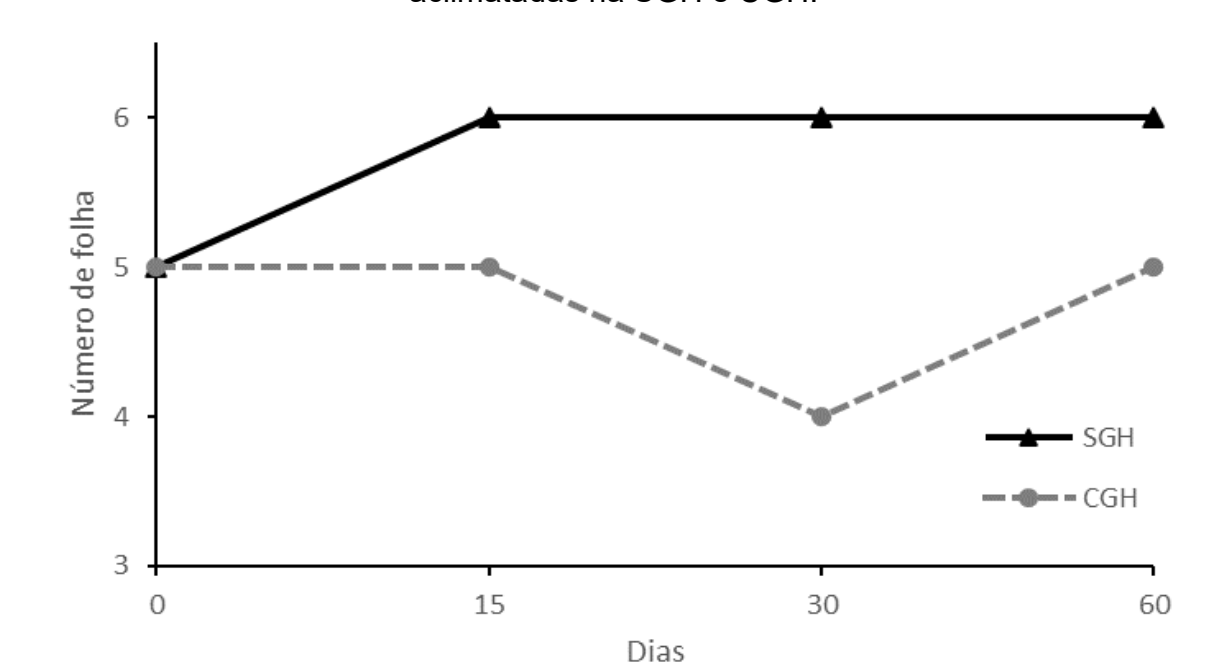
Figura 52 - Diâmetro do caule das mudas de orquídeas *Phalaenopsis* aclimatadas na SGH e CGH.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

Entretanto, quanto ao número de folhas, houve clara superioridade na SGH, com uma média de 6 folhas, frente a 5 na CGH, conforme a Figura 55.

Figura 53 - Média do número de folhas das mudas de orquídeas *Phalaenopsis* aclimatadas na SGH e CGH.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

A qualidade visual das mudas, importante parâmetro agrônômico, foi superior na SGH, como demonstrado na Figura 56. As plantas apresentaram folhas com coloração verde intensa, maior vigor e ausência de manchas, ao contrário das mudas da CGH, que apresentaram sinais de estresse, senescência e coloração arroxeada, indicativos de baixas temperaturas e condições subótimas.

Figura 54 - Comparativo das mudas de orquídeas cultivadas em CGH e SGH.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

O índice de mortalidade foi inferior na SGH (14,54%) em comparação com a CGH (25,45%), reforçando a adequação das condições ambientais promovidas pela *Smart Greenhouse*.

Como resultado, as mudas da SGH tiveram a primeira floração em 7 meses e 15 dias após o cultivo, um avanço considerável em relação à expectativa convencional de 2 a 3 anos, além de boa coloração, tamanho e baixa incidência de manchas, como registrado na Figura 57.

Figura 55 - Florescimento das primeiras mudas aclimatadas na *Smart Greenhouse* em Santa Rosa do Sul.



Fonte: Arquivos do P&D *Smart Greenhouse*.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo permitiu uma compreensão aprofundada sobre o papel das estratégias bioclimáticas e dos sistemas energéticos na criação de ambientes controlados para o cultivo de plantas de alto valor agregado. Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, foi possível integrar modelagens termoenergéticas, simulações computacionais, soluções fotovoltaicas e análises agronômicas em duas casas de vegetação inteligentes localizadas em regiões com distintas condições climáticas. Essa abordagem integrada demonstrou a relevância da arquitetura bioclimática - e da automação, no desempenho termoenergético das estufas. Tais estratégias podem ser implementadas em estufas energeticamente eficientes, desde que não comprometam o crescimento das plantas, aspecto que deve ser avaliado por meio de simulações computacionais focadas no desempenho termoenergético. Desta forma, confirma sua contribuição direta para a redução do consumo de energia e para a criação de condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento vegetal.

As análises demonstraram que a combinação de estratégias passivas e ativas, associadas ao uso de energia solar, não apenas possibilitou acentuada eficiência energética, como também influenciou positivamente o crescimento morfológico e fisiológico das mudas testadas. Observou-se que as *Smart Greenhouses* propiciaram condições microclimáticas mais estáveis e otimizadas em comparação com casas de vegetação convencionais, refletindo-se em ganhos expressivos de desempenho agronômico. As simulações e o monitoramento em tempo real comprovaram a viabilidade técnica e econômica da integração de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, além de evidenciar o papel da automação no controle climático de precisão.

Além de contribuir tecnicamente para o avanço da agricultura protegida, o projeto reafirma seu compromisso com os princípios da sustentabilidade e da inovação social. A replicabilidade do modelo, a utilização de fontes renováveis e a possibilidade de aplicação em comunidades rurais demonstram seu alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da ONU, especialmente no que se refere ao combate às mudanças climáticas, à segurança alimentar e ao uso responsável de recursos naturais. Especificamente, o projeto contribui para:

- ODS 2: Fome Zero e Agricultura Sustentável, ao aumentar a produtividade e a segurança alimentar em regiões diversas;
- ODS 6: Água Potável e Saneamento, pela gestão otimizada e eficiente dos recursos hídricos;
- ODS 7: Energia Limpa e Acessível, através da integração de fontes renováveis e da busca por maior eficiência energética;
- ODS 9: Indústria, Inovação e Infraestrutura, por representar um avanço tecnológico e de infraestrutura no setor agrícola;
- ODS 12: Consumo e Produção Responsáveis, ao promover o uso consciente de recursos e a redução de desperdícios;
- ODS 13: Ação Contra a Mudança Global do Clima, ao mitigar impactos ambientais e reduzir a pegada de carbono da produção de alimentos;

Conclui-se, portanto, que as *Smart Greenhouses* representam uma alternativa viável e estratégica para o futuro da agricultura sustentável no Brasil, especialmente em cenários que demandam maior eficiência no uso de energia e maior controle sobre as variáveis ambientais. Este trabalho reforça a importância da pesquisa multidisciplinar e da inovação tecnológica como ferramentas essenciais para transformar desafios agrícolas em oportunidades concretas de desenvolvimento econômico e social.

7 PRODUÇÕES CIENTÍFICAS E TECNOLÓGICAS DERIVADAS DO PROJETO

O desenvolvimento deste trabalho no âmbito do projeto de pesquisa *Smart Greenhouse* resultou em diversas produções acadêmicas, tecnológicas e de divulgação, demonstrando a relevância e aplicabilidade dos resultados obtidos. A seguir, destacam-se as principais contribuições:

- Artigos Científicos Publicados

RAMPINELLI, G. A. *et al.* (2024). ***Development of artificial lighting system for light supplementation in Smart Greenhouses with agrivoltaic systems.*** *Renewable Energy*, v. 231, p. 120914. (Citações: 3 | Fator de Impacto: 9,00);

BORBA, Janini Cunha de; TISCOSKI, Natalia da Silva; SCARDUELLI NETO, Valdir; RAMOS, Sérgio Forte; GRUBER, Vilson; ESTEVES, Paulo Cesar Leite; ALVES, João Bosco da Mota. **Estufas Inteligentes e Eficientes Energeticamente: uma análise descritiva da literatura.** *Revista E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial - ISSN - 1983-1838*, [S.L.], v. 15, n. 1, p. 1-12, 27 jul. 2022. SENAI ISC. <http://dx.doi.org/10.18624/etech.v15i1.1191>;

MARCELINO, Roderval *et al.* ***SMART AND EFFICIENT GREENHOUSES: a systematic literature review in the agronomic, computational, and energy scope.*** *Open Science Research VI*, [S.L.], p. 94-110, 2022. Editora Científica Digital. <http://dx.doi.org/10.37885/220910200>.

- Trabalhos em Anais de Congressos

DAMASCENO, J. P. *et al.* (2024). **Desenvolvimento de sistema de iluminação artificial para suplementação de luz visível em casas de vegetação inteligentes com sistemas agrovoltaicos.** *Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS)*;

STALTER, C. C. *et al.* (2022). **Modelagem de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Aplicados a Casas de Vegetação Inteligentes e Eficientes Energeticamente.** *Anais do 11º SICT-SUL*.

- Apresentações em Eventos

STALTER, C. C. *et al.* (2022). **Modelagem de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Aplicados a Casas de Vegetação Inteligentes**. Apresentação oral no 11º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense.

- Livros publicados

Título: **Cartilha um Modelo de Negócio para Mudanças de Bananeiras** - Subtítulo: Desenvolvendo um Plano de Negócios para Produção de Mudanças de Bananeiras. ISBN: 978-620-6-75647-7;

Título: **Cartilha um Modelo de Negócio para Orquídeas** - Subtítulo: Construindo um Plano de Negócios Eficiente para a Produção de Mudanças de Orquídeas. ISBN: 978-620-6-75648-4.

- Pré-publicações e Patentes

RAMPINELLI, G. A. *et al.* (2023). **Modeling and Performance of Energy Systems in Smart Greenhouses with Agrivoltaic Systems**. Preprint submetido à Elsevier;

Patente BR10202400681 (2024): **Uso de uma casa de vegetação inteligente e eficiente energeticamente para produção de mudas de bananeiras e orquídeas**. Depositada no INPI (08/04/2024).

- Divulgação Científica e Tecnológica

Vídeos de divulgação no canal NTEEL Solar (UFSC):

Projeto de Pesquisa *Smart Greenhouse* - Desenvolvimento e Resultados (Link: <https://www.youtube.com/watch?v=-8-ZZFFLZZY>);

Projeto de Pesquisa – Apresentação *Smart Greenhouse* (Link: <https://www.youtube.com/watch?v=1hE7D1naa-c>);

Reportagens vinculadas ao projeto (Link: https://www.youtube.com/watch?v=plA3g7qJJ_Q&ab_channel=NTEELSOLARUFSC).

8 REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 15220: desempenho térmico de edificações – Parte 3: zoneamento bioclimático Brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social.** Rio de Janeiro, 2005.

ABSOLAR - Associação Brasileira De Energia Solar Fotovoltaica (Brasil). ANEEL. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: infográfico ABSOLAR.** Infográfico ABSOLAR. 2025. Atualizado em 11/04/2025, nº 78. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 01 maio 2025.

ACHOUR, Yasmine; OUAMMI, Ahmed ; ZEJLI, Driss. **Technological progresses in modern sustainable greenhouses cultivation as the path towards precision agriculture.** Renewable And Sustainable Energy Reviews, [S.L.], v. 147, p. 111251, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.111251>.

AGURTO, Leonardo *et al.* Design and experimental study of a low-cost prefab Trombe wall to improve *indoor* temperatures in social housing in the Biobío region in Chile. **Solar Energy**, [S.L.], v. 198, n. -, p. 704-721, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.003>.

AHAMED, Md Shamim; GUO, Huiqing; TANINO, Karen. **A quasi-steady state model for predicting the heating requirements of Conventional Greenhouses in cold regions.** Information Processing In Agriculture, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 33-46, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.inpa.2017.12.003>.

AHAMED, Md Shamim; GUO, Huiqing; TANINO, Karen. **Energy saving techniques for reducing the heating cost of Conventional Greenhouses.** Biosystems Engineering, [S.L.], v. 178, p. 9-33, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.017>.

ANEEL. Ministério de Minas e Energia. **ANEEL regulamenta marco legal da Micro e Minigeração Distribuída.** 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/aneel-regulamenta-marco-legal-da-micro-e-minigeracao-distribuida>. Acesso em: 05 out. 2024b.

ANEEL. Ministério de Minas e Energia. **Micro e Minigeração Distribuída.** 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>. Acesso em: 05 out. 2024a.

BENKE, Kurt; TOMKINS, Bruce. **Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture.** Sustainability: Science, Practice and Policy, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 13-26, jan. 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054>.

BODACH, Susanne; LANG, Werner; HAMHABER, Johannes. **Climate responsive building design strategies of vernacular architecture in Nepal.** Energy And Buildings,

[S.L.], v. 81, n. -, p. 227-242, out. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.022>.

BRONCHART, Filip *et al.* **Thermodynamics of greenhouse systems for the northern latitudes: analysis, evaluation and prospects for primary energy saving.** Journal Of Environmental Management, [S.L.], v. 119, n. -, p. 121-133, abr. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.013>.

CARVALHO, Alisson Bruno Souza. **A Viabilidade De Implantação Do Sistema De Geração De Energia Elétrica Através De Painéis Fotovoltaico.** 2018. 18 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário do Norte - Uninorte, Brasil, 2018. Disponível em: https://semanaacademica.org/system/files/artigos/artigo_-_placa_fotovoltaicos.pdf. Acesso em: 17 mai. 2025.

CEASA/SC. Governo do Estado de Santa Catarina. **A banana mais doce do Brasil.** 2019. Disponível em: <https://www.ceasa.sc.gov.br/index.php/imprensa/noticias/202-a-banana-mais-doce-do-brasil>. Acesso em: 18 mai. 2025.

COLIN, Sílvio. **Uma introdução à arquitetura.** 7. ed. Rio de Janeiro: Jaguaririca, 2019. 212 p.

CUCE, Erdem; HARJUNOWIBOWO, Dewanto; CUCE, Pinar Mert. **Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: a comprehensive review.** Renewable And Sustainable Energy Reviews, [S.L.], v. 64, p. 34-59, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.077>.

CUI, Xin *et al.* **Energy Efficient Indirect Evaporative Air Cooling.** [S.I.]: Sm Sohel Murshed, 2019. 152 p. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/62339#B1>. Acesso em: 21 fev. 2024.

ÇAKIr, Uğur; ŞAHIN, Erol. **Using solar greenhouses in cold climates and evaluating optimum type according to sizing, position and location: a case study.** Computers And Electronics In Agriculture, [S.L.], v. 117, n. -, p. 245-257, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.005>.

DIAS FILHO, César Luiz. **Avaliação físico-química de frutos de bananeira (Musa sp.) cultivadas em região subtropical de Corupá-SC.** 2015. 15 f. TCC (Graduação) - Curso de Agronomia, Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/159747>. Acesso em: 18 mai. 2025.

ECHER, Rodrigo. **Análise Térmica De Parede Trombe E Paredes Verdes Em Edifício Habitacional Na Cidade De Porto Alegre.** 2021. 30 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/223629>. Acesso em: 19 abr. 2025.

EMBRAPA. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS: o que são os ods.** O que são os ODS. 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-ods/o-que-sao-os-ods>. Acesso em: 25 maio 2025.

FANWOUA, Julienne *et al.* **Supplemental LED lighting affects the dynamics of tomato fruit growth and composition.** *Scientia Horticulturae*, [S.L.], v. 256, p. 108571, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108571>

FERNANDES, João Levi Bastos *et al.* **Pre-cooling water applied to porous plates of evaporative cooling systems.** *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 52, n. 11, p. 1-8, nov. 2022. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20201015>.

GHOULEM, Marouen *et al.* **Analysis of passive draught evaporative cooling windcatcher for greenhouses in hot climatic conditions: parametric study and impact of neighbouring structures.** *Biosystems Engineering*, [S.L.], v. 197, p. 105-121, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.06.016>.

GOULART, Solange V. G.; LAMBERTS, Roberto; FIRMINO, Samanta. **Dados Climáticos para Projeto e Avaliação Energética de Edificações para 14 Cidades Brasileiras.** 2. ed. Florianópolis: Eletrobrás - Procel, 1998. 350 p. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/livros/dados_climaticos_para_projetos_e_avaliacao_energetica_de_edificacoes_para_14_cidades_brasileiras.pdf. Acesso em: 20 out. 2024.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Governo do Brasil. **Conheça o Brasil - Território: clima.** Clima. 2025. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/territorio/20644-clima.html>. Acesso em: 02 maio 2025.

IDDIO, E. *et al.* **Energy efficient operation and modeling for greenhouses: a literature review.** *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, [S.L.], v. 117, p. 109480, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2019.109480>.

IEE - Instituto de Energia e Ambiente. **Sistema Fotovoltaico: o que é e como funciona na prática.** 2024. Disponível em: <https://www.iee.usp.br/noticia/sistema-fotovoltaico-o-que-e-e-como-funciona-na-pratica/>. Acesso em: 01 maio 2025.

KERSLAKE, N.; SHUANG, S. **Asia's rise of indoor agriculture industry.** *Newbean Capital*, jan. 2016. Disponível em: https://agfundernews.com/wpcontent/uploads/2016/01/The-Rise-of-Asias-Indoor-Agriculture-Industry-WhitePaper_FinalProtected.pdf. Acesso em: 01 set. 2024.

LA NOTTE, Luca *et al.* **Hybrid and organic photovoltaics for greenhouse applications.** *Applied Energy*, [S.L.], v. 278, p. 115582, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115582>.

LAMBERTS, Roberto *et al.* **Casa Eficiente: bioclimatologia e desempenho térmico.** Florianópolis: UFSC/LABEEE, 2010. 123 p. Disponível em:

https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/livros/CasaEficiente_vol_I_WEB.pdf. Acesso em: 02 mai. 2025.

LAMBERTS, Roberto *et al.* **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras - Procel Edifica, 2019. 382 p. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/apostilas/eficiencia_energetica_na_arquitetura.pdf. Acesso em: 20 out. 2024.

LAMNATOU, Chr.; CHEMISANA, Daniel. **Solar radiation manipulations and their role in greenhouse claddings: fresnel lenses, nir- and uv-blocking materials**. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, [S.L.], v. 18, p. 271-287, fev. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.041>.

LEITE, José Artur de Sousa. **Automação em Arquitetura Bioclimática**. 2021. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, [S.I.], 2021. Disponível em: <https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/94284/1/AUTOMA%c3%87%c3%83O%20EM%20ARQUITETURA%20BIOCLIM%c3%81TICA.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2025.

LI, Tianqi; ROSKILLY, Anthony Paul; WANG, Yaodong. **Life cycle sustainability assessment of grid-connected photovoltaic power generation: a case study of northeast england**. *Applied Energy*, [S.L.], v. 227, p. 465-479, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.021>.

MANZANO-AGUGLIARO, Francisco *et al.* **Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort**. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, [S.L.], v. 49, p. 736-755, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.095>.

MASSA, Gioia D. *et al.* **Plant Productivity in Response to LED Lighting**. *Hortscience*, [S.L.], v. 43, n. 7, p. 1951-1956, dez. 2008. American Society for Horticultural Science. <http://dx.doi.org/10.21273/hortsci.43.7.1951>.

MELLO, Simone da Costa; CAMPAGNOL, Rafael (org.). **Olericultura: Cultivo Hidropônico**. Paraná: SENAR, 2016. 86 p. Disponível em: <https://www.sistemafaep.org.br/wp-content/uploads/2021/11/PR.0316-Olericultura-Cultivo-Hidroponico.pdf>. Acesso em: 02 maio 2025.

MOBTAKER, Hassan Ghasemi *et al.* **Solar energy conservation in greenhouse: thermal analysis and experimental validation**. *Renewable Energy*, [S.L.], v. 96, p. 509-519, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.079>.

MOHAGHEGHI, Afagh; MOALLEM, Mehrdad. **Robust Predictor Feedback Input Delay Compensation with Application to Daylight Harvesting Control**. *Iecon 2021 – 47Th Annual Conference Of The Ieee Industrial Electronics Society*, Toronto, On, Canadá, v. 1, n. 1, p. 1-6, 13 out. 2021. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/iecon48115.2021.9589671>.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. 2025. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br>. Acesso em: 25 maio 2025.

O AGRONÔMICO. Campinas, Sp: Instituto Agrônômico, v. 75, 2023. Boletim Técnico-Informativo do Instituto Agrônômico - Volume 75 - 2023 - Série Técnica Apta - Issn 0365-2726. Disponível em: <https://www.iac.sp.gov.br/media/publicacoes/OAgronomico2023.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2025.

OUAMMI, Ahmed *et al.* **Optimal operation scheduling for a Smart Greenhouse integrated microgrid**. Energy For Sustainable Development, [S.L.], v. 58, p. 129-137, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2020.08.001>.

PARNKLANG; Jirawath *et al.* Daytime Solar Greenhouse Plant Light Spectrum Control System. 6th ICCRES - International Conference on Control and Robotics Engineering 2021. China, v. [], n. [], p. [], 16 abr 2021. IEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9435682>.

PROJETEEE. Ministério de Minas e Energia. **Resfriamento Evaporativo**. 2025. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/projeteee/estrategia/resfriamento-evaporativo/>. Acesso em: 20 abr. 2025a.

PROJETEEE. Ministério de Minas e Energia. **Estratégias bioclimáticas: parede trombe**. Parede Trombe. 2025. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/projeteee/implementacao/parede-trombe/>. Acesso em: 20 abr. 2025b.

PROJETEEE. Ministério de Minas e Energia. **Sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR ou on-grid)**. Brasil, 2024a. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/projeteee/equipamento/sistema-fotovoltaico-conectado-a-rede-sfcr-ou-on-grid/>. Acesso em: 16 mar. 2024.

PROJETEEE. Ministério de Minas e Energia. **Sistemas fotovoltaicos não conectados à rede (off-grid)**. Brasil, 2024b. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/projeteee/equipamento/sistemas-fotovoltaicos-nao-conectados-a-rede-off-grid/>. Acesso em: 16 mar. 2024.

ROMERO, Héctor Fabián *et al.* **Estrategias Bioclimaticas Y Diseño De Un Sistema De Calefaccion Solar Para Un Edificio Publico En La Ciudad De Rio Cuarto**. In: Congresso Brasileiro De Energia Solar, 8ed, 2018, Gramado. Anais CEBENS. Gramado: CBENS, 2018. p. 1-6. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/33/33>. Acesso em: 23 nov. 2025.

PARADISO, Roberta; PASCALE, Stefania de. **Effects of Plant Size, Temperature, and Light Intensity on Flowering of *Phalaenopsis* Hybrids in Mediterranean Greenhouses**. The Scientific World Journal, [S.L.], v. 2014, n. 1, p. 1-9, 2014. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/420807>.

PARADISO, Roberta; MAGGIO, Albino; PASCALE, Stefania de. **Moderate variations of day/night temperatures affect flower induction and inflorescence development in *Phalaenopsis***. *Scientia Horticulturae*, [S.L.], v. 139, n. -, p. 102-107, maio 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2012.03.007>.

SILVA, Bruna Abrahão; SILVA, Amanda Rodrigues da; PAGIUCA, Larissa Gui. **Cultivo Protegido: em busca de mais eficiência produtiva!**. *Hortifruti Brasil*, Brasil, v. 132, n. -, p. 10-18, mar. 2014. Disponível em: https://www.cepea.org.br/hfbrasil/edicoes/132/mat_capa.pdf. Acesso em: 02 mar. De 2025.