

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL PARA SUPLEMENTAÇÃO DE LUZ VISÍVEL EM CASAS DE VEGETAÇÃO INTELIGENTES COM SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Jonathan Possenti Damasceno - jonathan.damasceno3@hotmail.com

Giuliano Arns Rampinelli

Roderval Marcelino

Chaiane Caroline Stalter

Arthur Thorstenberg Ribas Bouchardet

Gustavo Mohr

Vilson Guber

Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciência Tecnologia e Saúde

5.3. Energia solar associada ao conforto térmico em ambiente construído e arquitetura bioclimática

Resumo. *O desenvolvimento de sistemas de iluminação artificial em casas de vegetação é uma tendência na agricultura de precisão. De maneira similar, os sistemas fotovoltaicos, que apresentam confiabilidade, maturidade tecnológica, competitividade econômica e sustentabilidade, são aplicados em casas de vegetação para compensação de energia elétrica. Este trabalho é parte de um projeto de pesquisa que desenvolveu duas casas de vegetação inteligentes para cultivo protegido de mudas de banana e de orquídea. As casas de vegetação apresentam sistemas de controle, arquitetura e estratégias bioclimáticas e sistemas de energia (iluminação artificial, aquecimento artificial, resfriamento evaporativo e sistema fotovoltaico). Uma rede de sensores monitora variáveis ambientais internas e uma estação meteorológica automática monitora variáveis ambientais externas. Um sistema computacional baseado em inteligência artificial é responsável pelo controle autônomo das casas de vegetação. Neste artigo apresenta-se o desenvolvimento de um sistema de iluminação artificial para suplementação de luz visível em casas de vegetação inteligentes. O sistema de iluminação artificial foi definido a partir de modelagem e simulação em uma ferramenta computacional. O sistema proposto foi instalado em duas casas de vegetação inteligentes localizadas em Alpestre/RS e Santa Rosa do Sul/SC, no Sul do Brasil. O artigo também apresenta o desenvolvimento de métodos de estimativa de consumo de energia elétrica baseado em premissas e perfis operacionais do sistema e a medição experimental do sistema de iluminação artificial que foi realizada de acordo com o procedimento descrito em normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR15215-4). O artigo apresenta o desempenho energético do sistema agrovoltáico aplicado às casas de vegetação inteligentes.*

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

1. INTRODUÇÃO

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

A produção de mudas e plantas em ambiente controlado não é novidade, estando presente na sociedade desde a Idade Antiga (KERSLAKE E SHUANG, 2016). Neste contexto, alguns estudos envolvendo a variável de iluminação artificial são desenvolvidos, porém como pequenas hortas em ambiente externo e suplementação com luz artificial.

Desta forma, casas de vegetação, normalmente, contam com estratégias passivas e ativas de controle de iluminação. Este controle de variáveis visa aumentar o rendimento e a produtividade das culturas em todas as estações do ano (ACHOUR; OUAMMI; ZEJLI, 2021). Estratégias passivas contemplam forma e elementos de envoltória da casa de vegetação, sendo que sua orientação espacial também contribui para o aproveitamento de iluminação natural.

As estratégias de iluminação ativa contemplam a utilização de luminárias led, especialmente. A luminária de tecnologia led de três cores (vermelho, azul e verde) é comumente utilizada em casas de vegetação, pois afetam positivamente o crescimento das mudas e plantas e têm uma vida útil notavelmente longa e podem fornecer economia de energia elétrica relacionada à iluminação de até 75% ao ano (CUCE; HARJUNOWIBOWO, 2016). Além da economia de energia elétrica, estudos referentes às luminárias led de espectro controlado, demonstraram que o crescimento e o desenvolvimento da planta e o valor da produção da cultura são diretamente afetados pela iluminação. Como o estudo

realizado por Parnklang *et al.* (2021), em que se verificou que a utilização de suplementação de luz aumentou a taxa de crescimento em 12% em relação ao cultivo tradicional.

Este trabalho é parte de um projeto de pesquisa que desenvolveu casas de vegetação inteligentes para cultivo protegido de mudas de banana e de orquídea. Neste contexto apresenta-se o desenvolvimento de um sistema de iluminação artificial este que foi definido a partir de modelagem e simulação em uma ferramenta computacional. O sistema proposto foi instalado em duas casas de vegetação inteligentes localizadas em Alpestre/RS e Santa Rosa do Sul/SC, Sul do Brasil. O artigo também apresenta o desenvolvimento de métodos de estimativa de consumo de energia elétrica baseado em premissas e perfis operacionais do sistema e a medição experimental do sistema de iluminação artificial que foi realizada de acordo com o procedimento descrito na NBR15215-4. Esta norma prescreve métodos para verificação experimental das condições de iluminância e luminância de ambientes internos. O artigo apresenta o desempenho energético do sistema agrovoltaico aplicado às casas de vegetação inteligentes.

2. DESENVOLVIMENTO

No desenvolvimento são descritos os elementos e conceitos de arquitetura e estratégias bioclimáticas das casas de vegetação inteligentes, o sistema de iluminação artificial proposto, a modelagem e simulação em software, os modelos de estimativa de consumo de energia elétrica e as medições de luminosidade conforme NBR15215-4.

2.1 Arquitetura e estratégias bioclimáticas

A arquitetura e as estratégias bioclimáticas são fundamentais para garantir um ambiente adequado para o cultivo de mudas e plantas, utilizando estratégias passivos e ativos baseados nas cartas bioclimáticas de cada região Alpestre/RS e Santa Rosa Do Sul/SC e aplicadas a casa de vegetação inteligente. Então a arquitetura desempenha papel principal para controle do meio via estratégia passiva influenciando, iluminação, ventilação, umidificação, aquecimento e arrefecimento da edificação. Os aquecedores, os exaustores, as cortinas, as luminárias e os aspersores são considerados como estratégias ativas para controle de ambiente.

A casa de vegetação inteligente em perspectiva é apresentada na Fig.1.

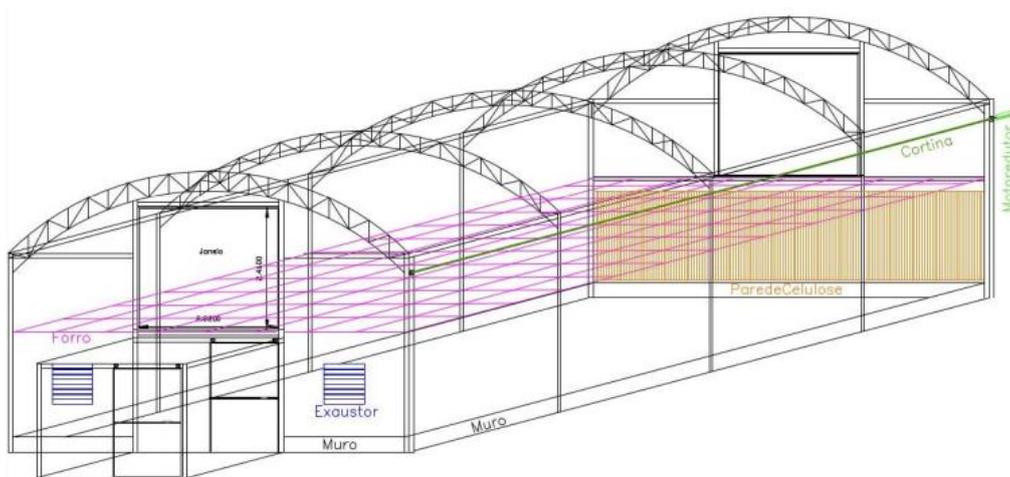


Figura 1 – Vista em perspectiva da casa de vegetação inteligente.

As casas de vegetação inteligente possuem 12 m de comprimento, 8 m de largura e 4 m de altura, conta com uma estação meteorológica automática, esta mede variáveis como: radiação solar, temperatura ambiente, umidade relativa, velocidade e direção do vento, pressão atmosférica e precipitação, variáveis que influenciam o ambiente interno. O monitoramento de todas as variáveis tanto interna como externa é realizado por meio de um sistema computacional que inclui nove sensores de temperatura ambiente e umidade relativa, além de quatro sensores de luminosidade na casa de vegetação. Ela conta também com sistema de aquecimento com quatro aquecedores de 3kW para controle de temperatura ambiente interna para os períodos de inverno.

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

2.2 Sistema de iluminação artificial

No âmbito desta casa de vegetação inteligente, especificamente, foi realizado um estudo e desenvolvimento de um sistema de iluminação artificial para suplementação de luz visível para o cultivo de mudas de banana e de orquídea. Entre os fatores considerados estão: particularidade de luminária, temperatura da cor, espectro, potência, eficiência, impermeabilidade, entre outros.

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

O acionamento do sistema de iluminação ocorre através de um sistema computacional baseado em lógica fuzzy, que toma decisões com base em premissas de projeto e no monitoramento da luminosidade interna. Sensores distribuídos pela casa de vegetação asseguram um fotoperíodo de 12h, mantendo os níveis ideais de iluminação para garantir processos ideais de como floração e folheação. Esses sensores são cruciais para fornecer suplementação de luz em faixas específicas do espectro visível. A Fig. 2 ilustra o sistema em funcionamento na casa de vegetação de Santa Rosa do Sul/SC



Figura 2 – Sistema de iluminação artificial (vista interna e externa).

2.3 Modelagem e simulação do sistema de iluminação artificial

A partir do software DiaLux foram modelados diferentes cenários variando, agrupamentos, arranjos, altura, distribuição de luminárias e potência de 100W, 150W e 200W todos com a ausência de luz natural.

A Fig. 3 apresenta o resultado da simulação em software da distribuição de luminosidade do sistema de iluminação artificial para a configuração com 20 luminárias de 150 W. O sistema de iluminação artificial da casa de vegetação inteligente é composto por 4 linhas com 5 luminárias que estão circuitos independentes.

O projeto final do sistema de iluminação artificial é ligeiramente diferente ao que foi simulado já que não foi possível adquirir equipamentos de mesma potência no mercado de luminárias, assim o sistema é composto de 20 luminárias com potência de 130 W e 18850 lúmens. Totalizando a potência de 2,6 kW.

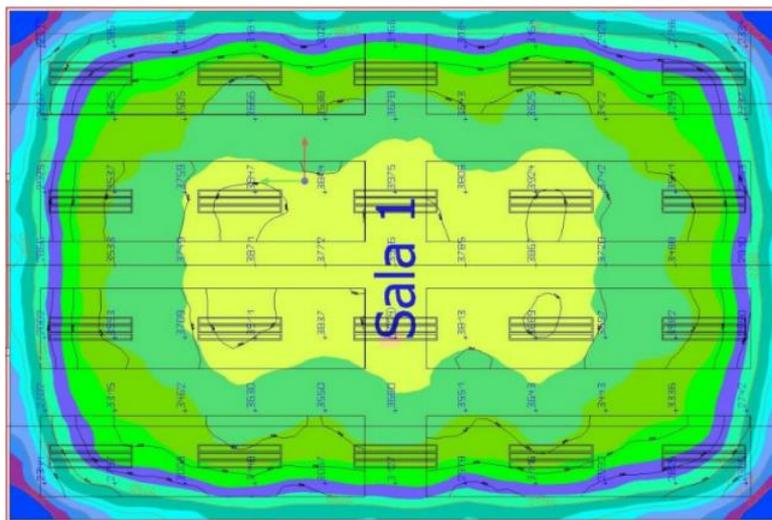


Figura 3 – Distribuição de luminosidade do sistema de iluminação artificial da configuração (4 linhas e 20 luminárias) de luminárias com 150 W no software Dialux.

2.4 Modelagem e perfil de consumo de energia elétrica

O consumo de energia elétrica na iluminação artificial da casa de vegetação é influenciado pelo acionamento do sistema, foi definido que operaria apenas quando a luz natural é inferior a 3500 lux. As plantas necessitam de 12 h de luz assim o sistema só é ativado das 6h até as 18h, aproveitando assim o máximo de períodos de iluminação natural.

Durante o período de inverno foram realizados e repetidos ensaios específicos para avaliar a correlação entre a luminosidade da casa de vegetação e a radiação solar, considerando as variáveis de luminosidade da casa de vegetação, medidas a partir dos sensores instalados no ambiente interno, e a irradiância solar global no plano horizontal.

A correlação entre a luminosidade da casa de vegetação e a radiação solar apresenta uma correlação linear com coeficiente de determinação R^2 de 0,98, portanto, evidenciando uma forte correlação linear. Entretanto, verifica-se que o modelo matemático subestima os valores de luminosidade na faixa de irradiância solar entre 0 e 300 W/m^2 . Para esta faixa de irradiância solar, a altura do Sol é menor, alterando a distribuição de iluminação natural no ambiente. Pode-se considerar, portanto, uma correlação linear entre a luminosidade e a radiação solar para valores de irradiância maiores que 300 W/m^2 (Fig. 4 - Esquerda) e uma correlação polinomial de grau dois para valores de irradiância menores que 300 W/m^2 (Fig. 4 - Direita). Os modelos matemáticos são apresentados nas Fig. 4. Para estas correlações, o coeficiente de determinação R^2 é da ordem de 0,95. Destaca-se que as correlações são válidas para a condição do ensaio.

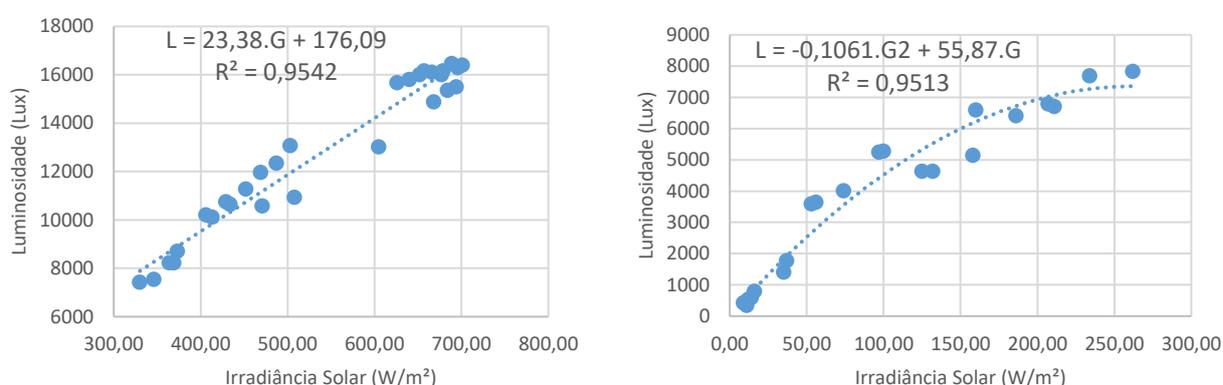


Figura 4 – Correlação linear entre a luminosidade e a radiação solar (esquerda) e polinomial de grau 2 (direita).

Para a estimativa do consumo de energia elétrica do sistema de iluminação artificial foram desenvolvidos dois métodos. Para o método 1 foram considerados dois tipos de arquivos meteorológicos, além das correlações entre luminosidade interna e radiação solar. A irradiância solar de referência para acionamento do sistema de iluminação artificial foi de 130 W/m^2 .

O número total de horas em que o sistema pode ser acionado é de 4380 h durante o ano. Em Santa Rosa do Sul/SC, o sistema de iluminação artificial aciona as luminárias em 1358 h com 31% do total enquanto em Alpestre/RS o tempo de acionamento é de 1266 h com 29% durante em um ano. A partir destes valores, é possível estimar o consumo anual de energia elétrica do sistema de iluminação artificial das casas de vegetação de Santa Rosa do Sul/SC e de Alpestre/RS (Tab. 1).

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

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

O segundo método para estimativa do consumo de energia elétrica do sistema de iluminação artificial considera a medida experimental da luminosidade e diferentes valores de set point para acionamento do sistema. No ambiente interno, distribuído de maneira uniforme, as casas de vegetação inteligentes têm módulos de sensores que medem variáveis ambientais. Cada casa de vegetação é monitorada a partir do sistema computacional de inteligência composto, entre outros, por sensores de temperatura ambiente da estufa, de luminosidade da estufa e de umidade relativa da estufa.

O ambiente interno da casa de vegetação é monitorado por nove sensores de temperatura ambiente e de umidade relativa e por quatro sensores de luminosidade. Estas variáveis são monitoradas continuamente na dimensão do tempo.

Neste estudo, considera-se o período de operação entre 6h e 18h e diferentes valores de luminosidade da estufa de set point (3500 lux, 5000 lux e 8000 lux). Para a estimativa do consumo de energia elétrica do sistema de iluminação artificial considera-se os perfis mensais da luminosidade da casa de vegetação. A Fig. 5 apresenta o perfil de consumo mensal de energia elétrica do sistema de iluminação artificial da casa de vegetação inteligente de Santa Rosa do Sul/SC. A Fig. 6 apresenta o perfil de consumo mensal de energia elétrica do sistema de iluminação artificial da casa de vegetação inteligente em Alpestre/RS.

O período de análise está compreendido entre outubro de 2022 e setembro de 2023. Este período contempla os primeiros 12 meses de operação das casas de vegetação inteligentes de Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS, Sul do Brasil. Vale destacar que cada casa de vegetação tem uma área de 96 m².

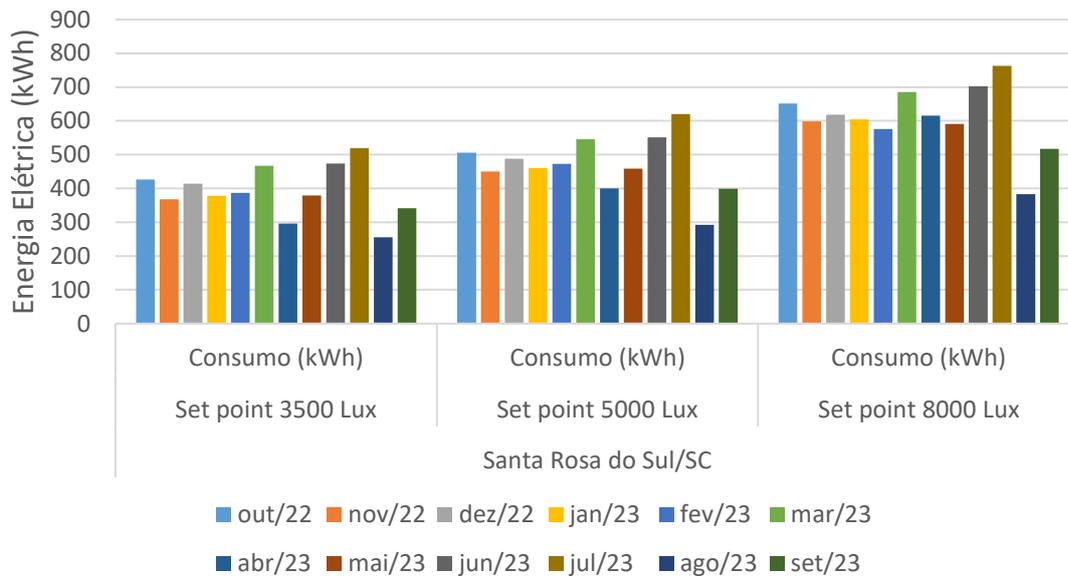


Figura 5 – Perfil de consumo de energia elétrica do sistema de iluminação artificial em Santa Rosa do Sul/SC.

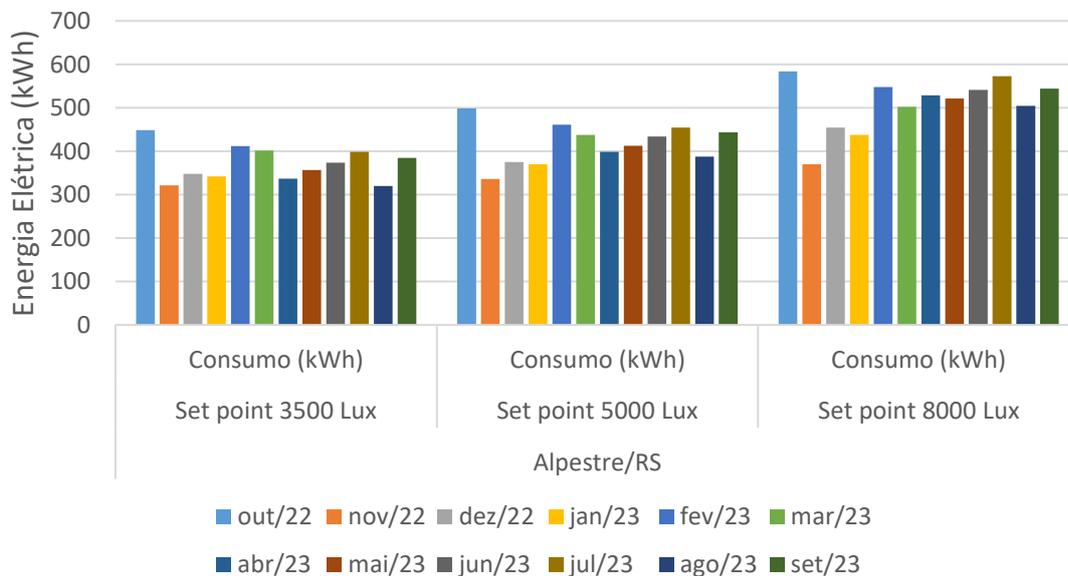


Figura 6 – Perfil de consumo de energia elétrica do sistema de iluminação artificial em Alpestre/RS.

2.5 Sistema fotovoltaico

As casas de vegetação inteligentes de Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS têm um sistema fotovoltaico aplicado para compensação de energia elétrica no âmbito da geração distribuída. A potência nominal de cada sistema fotovoltaico é de 6,37 kW_P. Estes sistemas estão aplicados às casas de vegetação no âmbito dos sistemas agrovoltaicos.

A Tab. 2 apresenta a estimativa de geração de energia elétrica mensal e a geração real de energia elétrica no primeiro ano de operação para os sistemas fotovoltaicos de Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS. Os dados de irradiação solar para as cidades de Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS foram obtidos a partir da plataforma do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB).

Tabela 2 – Estimativa e geração real de energia elétrica dos sistemas fotovoltaicos de Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS.

Potência 6,37 kW		Santa Rosa do Sul/SC		Alpestre/RS	
Mês	PR	Estimativa	Real	Estimativa	Real
		Energia (kWh)		Energia (kWh)	
Janeiro	0,792	794,73	915,60	912,91	1027,95
Fevereiro	0,788	704,83	765,90	805,45	794,45
Março	0,796	731,92	806,70	852,15	873,05
Abril	0,806	683,53	735,00	727,29	704,10
Mai	0,817	608,02	654,30	624,46	614,15
Junho	0,824	515,15	611,40	527,80	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	756,00	674,82	677,00
Outubro	0,803	655,74	781,20	819,49	785,20
Novembro	0,794	777,25	741,60	884,37	1076,75
Dezembro	0,793	817,63	832,80	945,43	1097,45
Energia Anual (kWh)		8105,03	9038,48	9100,81	9495,59
YF (kWh/kWp)		1350,84	1418,91	1516,80	1490,68
Energia Média (kWh/mês)		675,42	751,21	758,40	791,30

Os sistemas agrovoltáticos das estufas inteligentes em Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS, no sul do Brasil, estão em operação desde agosto de 2022. A partir da plataforma de monitoramento do inversor, as grandezas elétricas e térmicas são medidas e registradas em intervalos de tempo de 5 minutos. O conjunto de dados mensais é processado, organizado e submetido a uma análise de confiabilidade. Por fim, os dados são analisados tecnicamente e os resultados são compilados.

De agosto de 2022 a julho de 2023, a produtividade final dos sistemas agrovoltáticos das estufas inteligentes de Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS foi, respectivamente, 1418,91 kWh/kW_p e 1490,68 kWh/kW_p. De acordo com Pereira et. al. (2017), a produtividade final dos sistemas fotovoltaicos, respectivamente em Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS, é de 1276,04 kWh/kW_p e 1424,96 kWh/kW_p, considerando uma taxa de desempenho de 80%.

O coeficiente de variação do rendimento mensal final dos sistemas agrovoltáticos das estufas inteligentes de Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS foi de 13,29% e 25,54%, respectivamente. De agosto de 2022 a julho de 2023, o fator de capacidade médio mensal dos sistemas agrovoltáticos das estufas inteligentes de Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS foi de 16,20% e 17,14%, respectivamente.

2.6 Medições de luminosidade do sistema de iluminação artificial

A partir da modelagem e simulação do sistema de iluminação artificial no software Dialux e posterior aplicação do sistema de iluminação na casa de vegetação inteligente, foram realizadas medições a fim de atestar a intensidade luminosa no local e comparar os resultados experimentais com os resultados da simulação. Para isso, foi utilizado um luxímetro, instrumento que mede a densidade da intensidade de luz, cuja unidade de medida é lux, o qual um lux corresponde a um W/m² (COSTA, 2006).

As medições foram realizadas para 20 pontos (Fig. 7), na altura das bancadas onde ficam as mudas e plantas. O número de pontos e a distribuição dos mesmos foram seguidos de acordo com as orientações e diretrizes da NBR15215-4, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). A área total da casa de vegetação foi seccionada então em 20 áreas de dimensões diferentes a fim de manter as luminárias no centro de cada área.

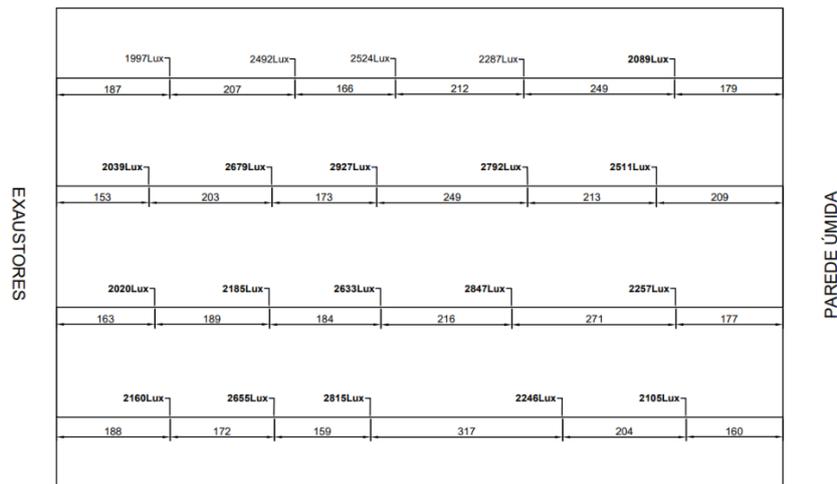


Figura 7 – Distribuição de luminárias e distâncias de cada ponto com seu devido valor de luminosidade (lux).

O processamento de dados foi realizado com o auxílio do software *Surfer*, onde as 20 medições foram exportadas e os dados compilados e processados de acordo com as coordenadas de cada ponto medido. As coordenadas foram baseadas na área da casa de vegetação com o ponto zero como vértice esquerdo da parede de exaustores.

A Fig. 8 apresenta o mapa da distribuição de intensidade luminosa a partir do método *Minimum Curvature*.

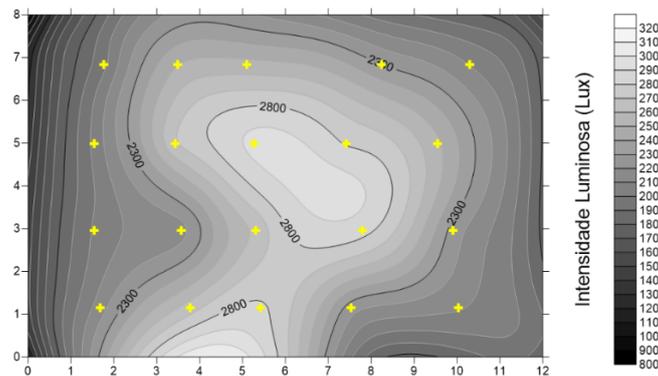


Figura 8 – Mapa da distribuição de intensidade luminosa da casa de vegetação usando o método *Minimum Curvature* com os pontos de medição demarcados.

Os mapas de curvas de nível puderam ser comparados com os resultados obtidos no software *DIALux*. O método de interpolação escolhido foi *Minimum Curvature*, *Radial Base Function* e *Inverse distance to a power*, a fim de experimentar e determinar o melhor modelo de acordo com a quantidade de pontos vizinhos utilizados na interpolação de cada método e de acordo com a percepção visual durante as medições *in loco*.

Os métodos apresentam diferenças de intensidade luminosa interpolados entre os métodos, e justamente por utilizar um maior número de vizinhos, e entrelaçá-los para interpolar novos pontos no espaço, que o método de *Minimum Curvature* foi o mais adequado, para o desenvolvimento do mapa de distribuição de intensidade luminosa. A Fig. 9 apresenta mapas de distribuição de intensidade luminosa na casa de vegetação a partir de outros métodos de interpolação.

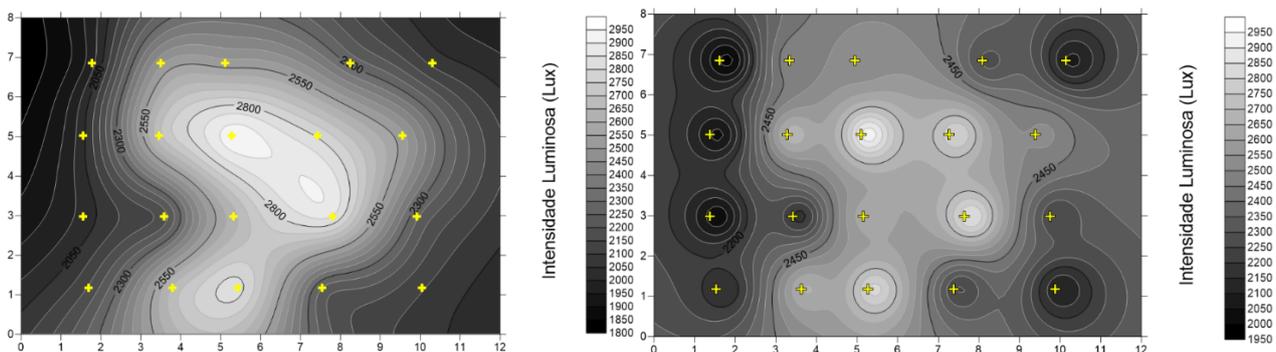


Figura 9 – Método de interpolação *Radial Base Function* (esquerda) e *Inverse distance to a power* (direita).

Como pôde ser visto nas Figs. 8 e 9, a interpolação *Minimum Curvature* é a que apresenta os resultados mais homogêneos na intensidade luminosa medida da casa de vegetação. De acordo com observações, durante o funcionamento das luminárias do sistema de iluminação, não é notado grandes discrepâncias na distribuição de iluminação. Os resultados modelados no *DIALux*, expostos na Figura 3 são diferentes dos resultados da distribuição de intensidade luminosa do *Surfer*. Nos métodos *Minimum Curvature* e *Radial Base Function*, a distribuição se mantém homogênea no centro da casa de vegetação, assim como na simulação. Os valores de Lux encontrados no método *Minimum Curvature* são menores devido a uma diferença na potência e distribuição luminosa entre as luminárias simuladas e as reais devido ao posicionamento das luminárias na etapa de instalação, que não foi simétrico e fiel à geometria projetada no software *DIALux*. Apesar das aproximações e limitações da modelagem, os resultados em software são coerentes e consolidam um importante meio para projetar sistemas de iluminação artificial.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento e a utilização de sistemas de iluminação artificial e de sistemas de climatização artificial é uma tendência na agricultura do século XXI. De maneira similar, os sistemas fotovoltaicos, que apresentam confiabilidade, maturidade tecnológica, competitividade econômica e sustentabilidade, são aplicados em casas de vegetação no conceito de sistemas agrovoltáticos. Este trabalho é parte de um projeto de pesquisa que desenvolveu duas casas de vegetação inteligentes para cultivo protegido de mudas de banana e de orquídea. As casas de vegetação apresentam sistemas de controle e automação, arquitetura e estratégias bioclimáticas, sistemas de energia e sistemas fotovoltaicos de geração distribuída. Um sistema computacional baseado em inteligência artificial é responsável pelo controle autônomo das casas de vegetação. As casas de vegetação inteligentes estão instaladas no Sul do Brasil, em Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS.

Este artigo apresentou o desenvolvimento de um sistema de iluminação artificial para suplementação de luz visível nestas casas de vegetação inteligentes. A suplementação de luz visível ocorre especificamente em uma faixa combinada de comprimento de onda azul e vermelho. O sistema de iluminação artificial foi definido a partir de modelagem e simulação na ferramenta computacional *Dialux*, que mostrou boa aproximação do que foi medido posteriormente em loco, via luxímetro e exportado graficamente, a distribuição luminosa por sua vez, mostrou diferenças, que estão relacionadas ao modo como as luminárias foram instaladas na casa de vegetação.

O presente artigo também apresentou o desempenho energético dos sistemas agrovoltáticos das casas de vegetação inteligentes. Entre agosto de 2022 e julho de 2023, a produtividade final dos sistemas agrovoltáticos das estufas inteligentes de Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS foi, respectivamente, 1418,91 kWh/kW_p e 1490,68 kWh/kW_p. O fator de capacidade médio mensal dos sistemas agrovoltáticos das estufas inteligentes de Santa Rosa do Sul/SC e Alpestre/RS foi de 16,20% e 17,14%, respectivamente.

O artigo também apresentou o desenvolvimento de métodos de estimativa de consumo de energia elétrica baseado em premissas e perfis operacionais do sistema, e a medição experimental do sistema de iluminação artificial que foi realizada de acordo com o procedimento descrito na NBR15215-4. Em Santa Rosa do Sul/SC, o balanço de energia elétrica considerando 12 meses de operação da estufa inteligente foi de 211 kWh. A estufa inteligente de Santa Rosa do Sul/SC é uma edificação de energia quase zero. Em Alpestre/RS, o balanço de energia elétrica considerando 12 meses de operação da estufa inteligente foi de 158 kWh. A estufa inteligente em Alpestre/RS é uma edificação com energia quase zero.

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abnt – associação brasileira de normas técnicas. Normativa nº NBR15215, 2004. Iluminação Natural – Parte 4: Verificação Experimental das Condições de Iluminação Interna de Edificações – Método de Medição. Rio de Janeiro, RJ.

Achour, Y.; Ouammi, A., Zejli, D., 2022. Technological progresses in modern sustainable greenhouses cultivation as the path towards precision agriculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 147, p. 11125.

- Colin, S., 2019. Uma introdução à arquitetura, 7. ed. Rio de Janeiro: Jaguaritica. 212 p. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=-DfnDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT2&dq=uma+introdu%C3%A7%C3%A3o+%C3%A0+arquitetura&ots=NFtie0b5Eu&sig=uMfIBXfdOmNivOxbRZpXDpcS50w#v=onepage&q=uma%20introdu%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A0%20arquitetura&f=false>. Acesso em: 26 set. 2022.
- Costa, G., 2006. Iluminação Econômica: cálculo e avaliação. 4. ed. Porto Alegre: Edipuc-Rs. 562.
- Cuce, E., Harjunowibowo, D., Cuce, P. M., 2016. Renewable And Sustainable Energy Saving Strategies for Greenhouse Systems: A Comprehensive Review. Renewable And Sustainable Energy Reviews, v. 64, p. 34–59.
- Jensen, M.H., 2002. Controlled Environment Agriculture in Deserts, Tropics and Temperate Regions - A World Review. International Society for Horticultural Science.
- Kerslake, N., Shuang, S., 2016. Asia's the Rise of Indoor Agriculture Industry (Vol. 1, Issue January). Newbeancapital. Disponível em: <https://agfundernews.com/wp-content/uploads/2016/01/The-Rise-of-Asias-Indoor-Agriculture-Industry-White-Paper_FinalProtected.pdf>. Acesso em: 31 maio. 2023.
- Lamberts, R., Dutra, L., Pereira, F. O. R., 2019. Eficiência Energética na Arquitetura. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/apostilas/eficiencia_energetica_na_arquitetura.pdf. Acesso em: 26 set. 2022.
- Oliveira, A. C., Leder, S. M., 2013. Traçando o perfil climático a partir do TRY: definição de estratégias bioclimáticas para projetos de arquitetura em municípios paraibanos. Caderno PROARQ20.
- Parnklang, J., 2021. Daytime Solar Greenhouse Plant Light Spectrum Control System. 6th International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE), p.135–138, 16.
- Pereira, E., Martins, F., Gonçalves, A., Costa, R., Lima, F., Rütther, R., 2017. Atlas brasileiro de energia solar. <https://doi.org/10.34024/978851700089>.
- Silva, R. R., 2018. Relações Da Irradiância Com O Crescimento E Compostos Fenólicos Em Plantas De Moringa Oleifera. 59 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Lavras, Lavras. Disponível em: <<http://repositorio.ufla.br/handle/1/29413>>. Acesso em: 17 out. 2022.
- Teixeira, M. D. L., Machado, L. E. D. R., Feil, D. L. P., Luz, P. C. V., 2022. Suplementação luminosa aplicada ao cultivo de hortaliças, Repositório UFSM.

DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL LIGHTING SYSTEM FOR LIGHT SUPPLEMENTATION IN SMART GREENHOUSES WITH AGRIVOLTAIC SYSTEMS

Abstract: *This work developed two smart greenhouses for the protected cultivation of banana and orchid seedlings. The greenhouses feature control and automation systems, bioclimatic architecture and strategies, and energy systems. A sensor network monitors indoor environmental variables, and a weather station monitors outdoor environmental variables. A computational system based on artificial intelligence is responsible for the autonomous control of the greenhouses. This article presents the development of an artificial lighting system for light supplementation in smart greenhouses. The artificial lighting system was defined from modeling and simulation in a computational tool. The proposed system was installed in two smart greenhouses in southern Brazil. The article also presents the development of methods for estimating electricity consumption based on assumptions and operational profiles of the system and the experimental measurement of the artificial lighting system performed according to the procedure described in technical standards. The article presents the energy performance of the agrivoltaic system applied to smart greenhouses. From August 2022 to July 2023, the yield final of the agrivoltaic systems of the smart greenhouses was 1418.91 kWh/kW_p and 1490.68 kWh/kW_p. The annual electricity consumption of the artificial lighting systems of the smart greenhouses ranges between 3290 kWh and 3825 kWh.*

Keywords: *Smart Greenhouse; Agrivoltaic System; Artificial Lighting System.*