

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

CHARLES PARANHOS OLIVEIRA

**AMBIENTE TÉRMICO EM PROTÓTIPOS DE INSTALAÇÕES AVÍCOLAS COM
PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

CHARLES PARANHOS OLIVEIRA

**AMBIENTE TÉRMICO EM PROTÓTIPOS DE INSTALAÇÕES AVÍCOLAS COM
PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Fernanda Campos de Sousa

Coorientadores: Fernando da Costa Baêta
Ilda de Fátima Ferreira Tinôco

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

O48a
2021
Oliveira, Charles Paranhos, 1990-
Ambiente térmico em protótipos de instalações avícolas
com painéis fotovoltaicos / Charles Paranhos Oliveira. – Viçosa,
MG, 2021.

1 dissertação eletrônica (56 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Fernanda Campos de Sousa.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2021.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.126>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Aves domésticas - Instalações - Aquecimento e
ventilação. 2. Aviários - Aquecimento e ventilação - Índices.
3. Energia solar. I. Sousa, Fernanda Campos de, 1985-
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.
III. Título.

CDD 22. ed. 636.50831

Bibliotecário(a) responsável: Alice Regina Pinto CRB6 2523

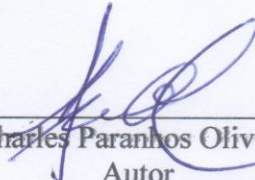
CHARLES PARANHOS OLIVEIRA

**AMBIENTE TÉRMICO EM PROTÓTIPOS DE INSTALAÇÕES AVÍCOLAS COM
PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

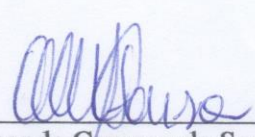
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 21 de julho de 2021.

Assentimento:



Charles Paranhos Oliveira
Autor



Fernanda Campos de Sousa
Orientadora

*Aos meus pais, Rita Darcíula e José Paranhos.
Sem vocês não seria possível chegar até aqui.*

DEDICO!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por iluminar a minha caminhada, me dando discernimento, força e coragem.

Aos meus pais, Rita Darcíula e José Paranhos, pelo amor, apoio incondicional e compreensão.

Obrigado pelos conselhos e por sempre buscarem o melhor para mim.

À Universidade Federal de Viçosa – UFV, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, por me proporcionarem esses dois anos de intenso aprendizado e de crescimento profissional.

Aos pesquisadores, professores, técnicos e alunos de pós-graduação do Núcleo de Pesquisa em Ambiente e Engenharia de Sistemas Agroindustriais - AMBIAGRO, por sempre estarem disponíveis a ajudar e pelo brilhante trabalho efetuado.

À Profa. Fernanda Campos de Sousa, pela oportunidade de ser seu orientado, pela confiança, pela orientação, pelos valiosos ensinamentos e pela amizade. Muito obrigado!

Ao Prof. Fernando Baêta e à Profa. Ilda Tinoco pela coorientação, pelos conselhos e ensinamentos repassados.

Ao Prof. Paulo e a Profa. Maria Clara, por aceitarem compor a banca. Muito obrigado pela colaboração e pela formação durante a graduação na UFVJM.

À Jocássia Silva, pela dedicação e comprometimento durante a execução do experimento.

Ao Gabriel Dallago, pelo suporte com a análise estatística e pela amizade.

Aos amigos que sempre me apoiaram quando decidi fazer pós-graduação, Drielly Marcondes, Priscila Barbosa, Alex Rodrigues e Priscila Lima.

Aos amigos e companheiros de república, Abraão, Jonathan, Alessandro, Cristofer e Diego e ao nosso mascote, Bolt. Vocês são como irmãos para mim. Obrigado pelos momentos felizes e por estarem sempre ao meu lado nos momentos difíceis.

Aos amigos que Viçosa me presenteou, Rafaella, Hiago e Bruno. Obrigado pelos conselhos, companheirismo, preocupação e por sempre me acolherem quando precisei.

À empresa The Sun Energy, pela concessão dos materiais necessários a essa pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Processo 421860/2018-9 e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

Obrigado a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

OLIVEIRA, Charles Paranhos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2021. **Ambiente térmico em protótipos de instalações avícolas com painéis fotovoltaicos.** Orientadora: Fernanda Campos de Sousa. Coorientadores: Fernando da Costa Baêta e Ilda de Fátima Ferreira Tinôco.

O Brasil possui um grande potencial de geração de energia solar fotovoltaica. A utilização dos painéis fotovoltaicos na cobertura das instalações de produção animal é uma alternativa interessante dado o alto potencial de áreas disponíveis nos telhados para a geração de energia solar. Uma das principais finalidades das coberturas das instalações é reduzir a carga de radiação sobre os animais. Portanto, a adição de um novo elemento arquitetônico na cobertura das instalações exige o entendimento do real impacto causado no ambiente térmico do interior dessas instalações. Assim, objetivou-se com essa dissertação investigar os impactos da utilização do painel fotovoltaico na cobertura de instalações de produção animal. Para isso foi desenvolvida uma revisão de literatura sobre o tema e conduzida uma pesquisa experimental para avaliar o comportamento do ambiente térmico e do conforto animal em protótipos de aviários em escala reduzida, com utilização de diferentes tipos de telha associadas a ausência e presença de painel solar fotovoltaico na cobertura. No artigo de revisão foram apresentados diversos tópicos com caracterização das instalações de produção animal e tipos de materiais utilizados em suas coberturas, as características do painel fotovoltaico e a sua utilização em coberturas, bem como o impacto que ele pode gerar no ambiente térmico das instalações. No segundo artigo, foi testado o efeito da aplicação do painel fotovoltaico na cobertura, com três tipos de telhas: cerâmica, fibrocimento e metálica, no ambiente térmico e no conforto animal. Para isso foram utilizados indicadores do ambiente térmico e do conforto animal representados por diversos índices: o índice de temperatura e umidade (ITU), o índice de temperatura de globo e umidade (ITGU) e carga térmica de radiação (CTR). Os resultados apontaram que a aplicação do painel fotovoltaico na cobertura, independentemente do tipo de telha, foi eficiente ao reduzir a temperatura do ar em cerca de 0,4 °C, o ITGU em 0,7 e a CTR em 4 W/m². Com base no ITU, a aplicação do painel fotovoltaico não causou diferenças significativas no ambiente térmico interno dos protótipos com coberturas com telhas cerâmica e metálica. No entanto, para os protótipos com cobertura de fibrocimento, a aplicação do painel fotovoltaico, mostrou-se eficiente, ao reduzir o ITU em cerca de 4,8.

Palavras-chave: Índices do Ambiente Térmico. Conforto Animal. Energia Solar.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Charles Paranhos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2021 **Thermal environment in prototypes of poultry facilities with photovoltaic panels.** Advisor: Fernanda Campos de Sousa. Co-advisors: Fernando da Costa Baêta and Ilda de Fátima Ferreira Tinôco.

Brazil has great potential for generating photovoltaic solar energy. The use of photovoltaic panels on the roof of animal production facilities is an interesting alternative given the high potential of available areas on roofs for the generation of solar energy. One of the main purposes of facility covers is to reduce the radiation load on animals. Therefore, the addition of a new architectural element to the roof of the facilities requires an understanding of the real impact caused in the thermal environment of the interior of these facilities. Thus, the objective of this dissertation was to investigate the impacts of the use of the photovoltaic panel in the coverage of animal production facilities. For this, a literature review on the subject was developed and experimental research was carried out to evaluate the behavior of the thermal environment and animal comfort in small-scale aviary prototypes, using different types of tiles associated with the absence and presence of solar panel. In the review article, several topics were presented with the characterization of animal production facilities and types of materials used in their roofs, the characteristics of the photovoltaic panel and its use in roofs, as well as the impact it can generate on the thermal environment of the facilities. In the second article, the effect of the application of the photovoltaic panel on the roof was tested, with three types of tiles: ceramic, fiber cement and metallic, in the thermal environment and in animal comfort. For this purpose, indicators of the thermal environment and animal comfort were used, represented by several indices: the temperature and humidity index (THI), the globe temperature and humidity index (BGHI) and radiation heat load (RHL). The results showed that the application of the photovoltaic panel on the roof, regardless of the type of tile, was efficient in reducing the air temperature by about 0.4 °C, the BGHI by 0.7 and the RHL by 4 W/m². Based on the THI, the application of the photovoltaic panel did not cause significant differences in the internal thermal environment of the prototypes with roofs with ceramic and metallic tiles. However, for the prototypes with fiber cement coverage, the application of the photovoltaic panel proved to be efficient, reducing the THI by about 4.8.

Keywords: Thermal Environment Indices. Animal Comfort. Solar Energy.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	9
REFERÊNCIAS	11
CAPÍTULO 1	12
UTILIZAÇÃO DE PAINEL FOTOVOLTAICO EM INSTALAÇÕES PARA PRODUÇÃO ANIMAL EM REGIÕES DE CLIMA QUENTE: UMA REVISÃO	12
1.1 INTRODUÇÃO.....	13
1.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	14
1.3 DESENVOLVIMENTO.....	14
1.3.1 Caracterização das instalações para produção animal.....	14
1.3.1.1 Sistemas de acondicionamento térmico de instalações rurais	15
1.3.1.2 Materiais de cobertura para instalações agrícolas	16
1.3.2 Sistemas fotovoltaicos	18
1.3.3 Painel fotovoltaico como elemento arquitetônico	20
1.3.4 Ambiente térmico de instalações com painel fotovoltaico na cobertura.....	22
1.3.5 Uso de painéis fotovoltaicos na agropecuária	24
1.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	24
1.5. REFERÊNCIAS	25
CAPÍTULO 2	29
AMBIENTE TÉRMICO E CONFORTO ANIMAL DE PROTÓTIPOS DE AVIÁRIO COM PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO SOBRE A COBERTURA	29
2.1 INTRODUÇÃO.....	30
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	32
2.2.1 Efeito do painel solar fotovoltaico sobre o ambiente térmico dos protótipos	33
2.2.2 Efeito do painel fotovoltaico no conforto térmico animal.....	34
2.2.3 Análises Estatísticas	36
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37

2.3.1 Ambiente térmico dos protótipos com presença e ausência do painel fotovoltaico.....	37
2.3.1.1 Temperatura no interior dos protótipos	37
2.3.1.2 Temperaturas superficiais da cobertura dos protótipos	40
2.3.2 Conforto térmico dos protótipos com presença e ausência do painel fotovoltaico	44
2.3.2.1 Índice de temperatura e umidade (ITU)	44
2.3.2.2 Índice de temperatura de globo negro e umidade (ITGU).....	47
2.3.2.3 Carga térmica de radiação (CTR).....	49
2.4 CONCLUSÃO.....	51
2.5 REFERÊNCIAS	52
CONCLUSÕES GERAIS	55

INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil se destaca como um dos principais produtores e exportadores de proteína animal, sendo o maior exportador de carne de frango e o segundo maior produtor, atrás apenas dos Estados Unidos (ABPA, 2020). Esse resultado se deve aos significativos avanços em genética, manejo e nutrição na avicultura e também aos recentes avanços nos estudos em ambiência das instalações, visando a sua adequação para atender ao conforto térmico e ao bem-estar dos animais. Essas adequações têm garantido maior resposta produtiva dos animais, permitindo que eles expressem seu máximo potencial genético.

A produção de frangos de corte no Brasil é realizada majoritariamente em aviários orientados no sentido Leste-Oeste. Assim, observa-se um grande potencial das áreas de cobertura para serem utilizadas para a geração de energia elétrica a partir da energia solar. Essa alternativa vem ganhando destaque entre os produtores de frango de corte, pois possibilita autonomia energética da instalação, que na maior parte do tempo, demanda grande quantidade de energia para manter os sistemas de condicionamento térmico em funcionamento.

A cobertura das instalações de produção animal desempenha um papel fundamental no seu ambiente térmico por, entre outros, reduzir a incidência de radiação em seu interior (BAÊTA; SOUZA, 2010; SAMPAIO; CARDOSO; SOUZA, 2011). A eficiência térmica da cobertura depende do tipo de material utilizado, do estado de uso do material, das associações com diferentes tipos de forro e da conjugação com outras modificações arquitetônicas (BAÊTA; SOUZA, 2010; TINÔCO, 2001). Desse modo, a aplicação do painel fotovoltaico à cobertura, atua como um agente que interage com o telhado e pode impactar o ambiente térmico das instalações.

No estabelecimento dos painéis na cobertura deve-se considerar a sua inclinação, que normalmente corresponde a inclinação da latitude local, a direção, normalmente deve ser voltado para Norte, para aumentar a interceptação de radiação solar e a eficiência do módulo (CRONEMBERGER; CAAMAÑO-MARTÍN; SÁNCHEZ, 2012). Outro fator importante é a distância entre o telhado e o painel. Essa distância está diretamente relacionada com a temperatura de operação do módulo. Quanto mais próximo do telhado menor a dissipação de calor na parte inferior do painel, o que prejudica a geração de energia (XING; ZHOU; FENG, 2014).

Alguns estudos apontam uma vantagem indireta da aplicação do painel fotovoltaico à cobertura sobre o ambiente térmico das instalações (ABUSEIF; GOU, 2018; AWAN et al.,

2020; KAPSALIS; KARAMANIS, 2015). De modo geral, com o aumento da distância entre o telhado e o painel fotovoltaico, observa-se uma redução do fluxo de calor da parte superior do painel para a parte inferior do telhado, o que pode causar efeitos significativos na temperatura do ambiente interno das instalações (KAPSALIS; KARAMANIS, 2015). A redução da temperatura do ar no interior de estábulos com cobertura metálica associada ao painel fotovoltaico foi observada por Bilčík et al. (2021), na Europa Central, durante o verão, além de obter um balanço energético positivo com a geração de energia elétrica a partir da solar.

Diante disso, objetivou-se com essa dissertação investigar os efeitos da utilização de painéis fotovoltaicos sobre coberturas nas condições térmicas internas de instalações animais. Para avaliar o comportamento do ambiente térmico, com influência direta sobre o conforto animal, foram utilizados protótipos de aviários em escala reduzida, com três tipos de cobertura, cerâmica, fibrocimento e metálica, com e sem painel solar fotovoltaico sobre as mesmas.

Os resultados deste estudo são demonstrados em dois capítulos, intitulados:

- Utilização de painel fotovoltaico em instalações para produção animal em regiões de clima quente: uma revisão.
- Ambiente térmico e conforto animal de protótipos de aviário com painel solar fotovoltaico sobre a cobertura.

REFERÊNCIAS

- ABPA. Associação Brasileira de Proteína Animal. **Relatório Anual de Atividades 2019**. Associação Brasileira de Proteína Animal, 160p, 2020.
- ABUSEIF, M.; GOU, Z. A Review of Roofing Methods: Construction Features, Heat Reduction, Payback Period and Climatic Responsiveness. **Energies**, v. 11, n. 11, p. 3196, 18 nov. 2018.
- AWAN, A. B. et al. Comparative Analysis of Ground-Mounted vs. Rooftop Photovoltaic Systems Optimized for Interrow Distance between Parallel Arrays. **Energies**, v. 13, n. 14, p. 3639, 15 jul. 2020.
- BAÊTA, F.; SOUZA, C. **Ambiência em Edificações Rurais**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2010.
- BILČÍK, M.; BOŽIKOVÁ, M.; ČIMO, J. Influence of Roof Installation of PV Modules on the Microclimate Conditions of Cattle Breeding Objects. **Applied Sciences**, v. 11, n. 5, p. 2140, 28 fev. 2021.
- CRONEMBERGER, J.; CAAMAÑO-MARTÍN, E.; SÁNCHEZ, S. V. Assessing the solar irradiation potential for solar photovoltaic applications in buildings at low latitudes – Making the case for Brazil. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 264–272, 1 dez. 2012.
- KAPSALIS, V.; KARAMANIS, D. On the effect of roof added photovoltaics on building's energy demand. **Energy and Buildings**, v. 108, p. 195–204, 1 dez. 2015.
- SAMPAIO, C. A. DE P.; CARDOSO, C. O.; SOUZA, G. P. DE. Temperaturas superficiais de telhas e sua relação com o ambiente térmico. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 2, p. 230–236, abr. 2011.
- TINÔCO, I. Avicultura Industrial: Novos Conceitos de Materiais, Concepções e Técnicas Construtivas Disponíveis para Galpões Avícolas Brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência Avícola**, v. 3, n. 1, p. 01–26, jan. 2001.
- XING, W.; ZHOU, J.; FENG, Z. Effects of mounting geometries on photovoltaic module performance using CFD and single-diode model. **Solar Energy**, v. 103, p. 541–549, 1 maio 2014.

CAPÍTULO 1

UTILIZAÇÃO DE PAINEL FOTOVOLTAICO EM INSTALAÇÕES PARA PRODUÇÃO ANIMAL EM REGIÕES DE CLIMA QUENTE: UMA REVISÃO

RESUMO: O Brasil possui um grande potencial de geração de energia solar fotovoltaica. A utilização dos painéis fotovoltaicos na cobertura das instalações de produção animal é uma alternativa interessante dado o alto potencial de áreas disponíveis nos telhados para geração de energia. Diante disso, com essa revisão objetiva-se apresentar uma abordagem sobre a instalação dos painéis fotovoltaicos na cobertura de instalações de produção animal e sobre os impactos gerados no seu ambiente térmico. Nas instalações, a principal finalidade das coberturas é a redução da carga de radiação sobre os animais. Entretanto, ao adicionar um novo elemento arquitetônico na cobertura das instalações, torna-se necessário o entendimento do real impacto gerado no ambiente térmico do interior dessas instalações. Uma vez que esse ambiente sofre influência direta dos materiais que compõe a cobertura. Portanto, deve-se considerar também o tipo de material utilizado nas coberturas, sendo os mais comuns, telha de cerâmica, telha de fibrocimento e telha metálica. A aplicação de placas fotovoltaicas, insere um novo elemento à cobertura dessas instalações o que pode impactar significativamente o ambiente térmico. Pois fluxo de calor em coberturas com a aplicação de placas fotovoltaicas tende a ser reduzido.

Palavras-chave: Energia solar, ambiência, ambiente térmico.

USE OF PHOTOVOLTAIC PANEL IN FACILITIES FOR ANIMAL PRODUCTION IN HOT CLIMATE REGIONS: A REVIEW

ABSTRACT: Brazil has great potential for generating photovoltaic solar energy. The use of photovoltaic panels on the roof of animal production facilities is an interesting alternative given the high potential of available areas on roofs for energy generation. Therefore, this review aims to present an approach on the installation of photovoltaic panels on the roof of animal production facilities and on the impacts generated in their thermal environment. In facilities, the main purpose of the covers is to reduce the radiation load on the animals. However, when adding a new architectural element to the roof of the facilities, it is necessary to understand the real impact generated in the thermal environment of the interior of these

facilities. Since this environment is directly influenced by the materials that make up the roof. Therefore, one should also consider the type of material used in the roofs, the most common being ceramic tile, fiber cement tile and metallic tile. The application of photovoltaic panels adds a new element to the coverage of these facilities, which can significantly impact the thermal environment. Because the heat flow in roofs with the application of photovoltaic plates tends to be reduced.

Keywords: Solar energy, ambience, thermal environment.

1.1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui um clima predominantemente tropical com elevados níveis de radiação solar durante a maior parte do ano, o que favorece o uso de energia solar fotovoltaica na maioria dos setores produtivos (PORTOLAN DOS SANTOS; RÜTHER, 2014). Com esse facilitador, o país ainda tem muito a crescer no cenário mundial, especialmente nos próximos anos, devido aos incentivos fiscais para o desenvolvimento de energia elétrica via fontes renováveis, dado o compromisso assumido pelo país no Acordo de Paris (ONU, 2015).

O crescimento do setor de geração de energia renovável deve-se principalmente à conversão de energia solar fotovoltaica em energia elétrica. Isso já é observado nas diversas áreas do agronegócio (SENAR, 2017). A geração de energia elétrica por células fotovoltaicas vem se tornando uma realidade, especialmente nas granjas de produção animal, visando diminuir os custos com energia elétrica e acima de tudo garantir maior autonomia energética das instalações. Questão essa que se torna ainda mais relevante dada à maior necessidade de energia demandada pelos equipamentos utilizados no condicionamento térmico das instalações, para manter os animais dentro da faixa de termoneutralidade e manifestar seu máximo potencial produtivo (BAÊTA; SOUZA, 2010; CAMPOS et al., 2017; TINÔCO, 2001).

O sombreamento é uma das principais formas de propiciar melhores condições de conforto térmico aos animais, principalmente nas horas mais quentes do dia. O sombreamento adequado reduz consideravelmente a carga térmica de radiação solar incidente sobre o animal (BAÊTA; SOUZA, 2010; CARNEIRO et al., 2015; SAMPAIO; CARDOSO; SOUZA, 2011). A maior parte da radiação térmica total no interior das instalações, cerca de 54%, provém dos telhados (SANTOS et al., 2005), em decorrência dos materiais que são utilizados na cobertura (FURTADO; AZEVEDO; TINÔCO, 2003).

Com o crescente uso de painéis solares fotovoltaicos, muitos projetistas e produtores optam por alocar esses painéis sobre o telhado da instalação, otimizando a captação de radiação solar e fazendo melhor aproveitamento de área disponível (PORTOLAN DOS SANTOS; RÜTHER, 2014). Contudo, essa prática é realizada até então sem se conhecer os efeitos desse material no ambiente térmico da instalação.

O uso do painel solar fotovoltaico como elemento arquitetônico é atualmente um desafio para engenheiros e arquitetos. Os projetos precisam incorporar esse elemento de forma a não elevar o custo da obra, além de apresentar design arrojado e resultar em máxima eficiência energética do sistema fotovoltaico. Estudos nesse sentido têm sido desenvolvidos principalmente para a arquitetura urbana (GONCALVES; VAN HOOFF; SAELENS, 2020; PENG; HUANG; WU, 2011; SHUKLA; SUDHAKAR; BARENDAR, 2017).

Diante de todo o exposto, objetiva-se com essa revisão de literatura apresentar uma abordagem sobre o funcionamento do sistema fotovoltaico aplicado à cobertura de construções agroindustriais, as técnicas de instalação e o impacto que a adição desses materiais na cobertura pode gerar no ambiente térmico e na eficiência do sistema produtivo.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

A revisão foi elaborada com base em uma pesquisa de artigos publicados na plataforma SCOPUS. Foram buscados os termos: *Livestock*; *Photovoltaic panel*; *Bapv*; *Environmental performance* e *Poultry*. Além disso, para complementar as definições e os conceitos foram incluídos outros materiais bibliográficos como livros, boletins, normas e sites de órgãos governamentais.

1.3 DESENVOLVIMENTO

1.3.1 Caracterização das instalações para produção animal

No Brasil as instalações para produção animal são predominantemente orientadas com a cumeeira no sentido Leste-Oeste, com o objetivo de diminuir a quantidade de radiação solar que incida diretamente no interior da instalação (BAÊTA; SOUZA, 2010; TINÔCO, 2001). Os telhados normalmente são projetados em duas águas, com as faces voltadas para o Norte e para Sul. Essa estrutura apresenta grande potencial para geração de energia, o que pode contribuir com maior sustentabilidade para a produção animal.

A produção animal, nos países de clima quente, é em parte realizada em sistemas intensivos, com utilização de instalações de produção que em certos períodos precisam ser climatizadas devido às elevadas temperaturas (DAMASCENO et al., 2010). Isso se deve à necessidade de manter as instalações de produção animal dentro da zona de termoneutralidade diante da variação térmica ambiental. A zona de termoneutralidade se caracteriza pela faixa de temperatura ambiental onde o animal mantém a temperatura do núcleo corporal constante com reduzidos mecanismos termorregulatórios, o que permite que ele manifeste o seu máximo potencial produtivo (BAÊTA; SOUZA, 2010).

Os sistemas de condicionamento térmico artificial podem ter ventilação com pressão positiva ou pressão negativa (DAMASCENO et al., 2010; PAULINO et al., 2019). Ambos demandam grande quantidade de energia elétrica para manter o funcionamento dos ventiladores e/ou exaustores a fim de manter os animais dentro das faixas de termoneutralidade.

1.3.1.1 Sistemas de condicionamento térmico de instalações rurais

Os sistemas de condicionamento térmico artificial com pressão positiva são utilizados em instalações predominantemente abertas, com presença de forro em polipropileno e cortinas, que permanecem abertas durante as horas mais quentes do dia e fechadas durante a noite. Nesse sistema, são utilizados ventiladores ao longo da instalação, causando a movimentação do ar através da mesma (BAÊTA; SOUZA, 2010). Para que esse sistema funcione adequadamente, é necessário dimensionar corretamente os ventiladores de acordo com as exigências térmicas dos animais e com o clima da região, e ainda considerar o balanço térmico da instalação.

Em sistemas de condicionamento artificial por pressão negativa, a instalação é predominantemente fechada por meio de cortinas e forro. Nesse tipo de sistema são utilizados exaustores em uma das extremidades do galpão e uma abertura na extremidade oposta, onde se encontra um sistema de nebulização ou painel poroso umedecido. Ambos devem ser corretamente dimensionados para atender ao volume de ar movimentado ao longo da instalação e adequada umidificação do mesmo.

Neste sistema, o ar ao entrar na instalação através do material poroso umedecido ou passar por um sistema de nebulização, de forma praticamente adiabática, aumenta sua umidade e cai sua temperatura, promovendo o chamado resfriamento evaporativo do mesmo. Esse sistema, permite a adoção de maior densidade de alojamento animal, o que

consequentemente garante maior produtividade, além de conferir um ambiente térmico com condições mais homogêneas e com maior conforto térmico (OSORIO et al., 2016).

1.3.1.2 Materiais de cobertura para instalações agrícolas

A cobertura das instalações para produção animal, dentre outras funções, durante o dia deve diminuir a carga de radiação solar que chega até os animais. Essa redução pode chegar a cerca de 30% da carga térmica de radiação do ambiente externo (BAÊTA; SOUZA, 2010). A taxa de redução da carga de radiação irá variar de acordo com o tipo de material utilizado nas coberturas.

Para verificar as condições do microclima interno, mensurar as variáveis ambientais (temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do ar e radiação) se tornam indispensáveis na definição de estratégias adotadas para melhorar o ambiente térmico das instalações. Essas variáveis podem ser associadas em equações, que retornam valores que indicam se o animal está em conforto térmico ou não, além de oferecer parâmetros adequados para a avaliação do microclima.

Dentre os índices de conforto térmico animal, o índice mais utilizado é o Índice de Temperatura de Globo Negro (ITGU) desenvolvido por Buffington et al. (1981), que associa a temperatura do ar, a umidade relativa do ar e a temperatura de globo negro (CARNEIRO et al., 2015; DAMASCENO et al., 2016; SAMPAIO; CARDOSO; SOUZA, 2011). A temperatura de globo negro representa a temperatura no interior de um corpo negro opaco, que pode ser definido como um corpo que absorve toda a radiação ao seu redor. Outros índices também são amplamente utilizados como o Índice de Temperatura e Umidade (ITU), que relaciona a temperatura do ar e o a umidade relativa do ar. Em estudos sobre propriedades térmicas de materiais para cobertura é comum utilizar a Carga Térmica de Radiação (CTR), que associa a temperatura de globo negro, a temperatura do ar e a velocidade do ar (DAMASCENO et al., 2016; TINÔCO, 2001). A CTR pode ser obtida por meio de uma relação entre a constante de Stephan-Boltzmann e a temperatura média radiante. Esses índices associados apresentam uma boa interpretação do que ocorre no ambiente térmico de uma instalação, além de serem amplamente utilizados para avaliação de diferentes materiais de cobertura (BAÊTA; SOUZA, 2010; BILČÍK; BOŽIKOVÁ; ČIMO, 2021; CARNEIRO et al., 2015; DAMASCENO et al., 2016; SAMPAIO; CARDOSO; SOUZA, 2011).

Predominantemente, no Brasil, são utilizadas as telhas cerâmicas, metálicas e de fibrocimento, nas coberturas de instalações de produção animal. Diversos estudos relatam a

diferença de eficiência entre elas, quando novas ou usadas (FIORELLI et al., 2010; SAMPAIO; CARDOSO; SOUZA, 2011; SEVEGNANI; GHELFI FILHO; SILVA, 1994; TINÔCO, 2001). A eficiência global do sistema de cobertura vai depender do tipo de telha, do tratamento sobre a mesma e da presença ou não de forro (BAÊTA; SOUZA, 2010). No geral, os três materiais podem ser utilizados em instalações para produção animal, desde que se considere outras características da construção, como: altura de pé direito, orientação, eficiência das aberturas, presença de lanternim, bem como outras modificações conjugadas.

Em um estudo conduzido durante o inverno na cidade de Dracena – SP no Brasil, Fiorelli et al. (2010) estudaram o comportamento térmico de telha cerâmica, telha de material reciclado (tetra pak) e telha de fibrocimento em protótipos em escala reduzida. A CTR foi utilizada como indicador do ambiente térmico e para a avaliação dos materiais testados. Os resultados apontaram uma menor CTR nos protótipos com cobertura de telha cerâmica em relação aos protótipos com telhas de fibrocimento, que obtiveram os maiores valores. Já as os protótipos com cobertura de material reciclado, obtiveram valores menores em relação às telhas de fibrocimento e maiores em relação às telhas de cerâmica.

Lima et al. (2009) avaliaram o ambiente térmico de três galpões avícolas com cobertura de telha cerâmica, telha de alumínio e telha de fibrocimento. O experimento foi realizado durante o verão na região de Belém – PA no Brasil. Para a avaliação do ambiente térmico foi utilizando o ITGU, ITU e a Temperatura Efetiva (TE). Os resultados apontaram que para o ITU não houve diferenças significativas entre os diferentes tipos de telhas, no entanto, para os valores de ITGU e TE, foi verificado que nos galpões com cobertura de telha cerâmica e de alumínio, esses valores foram inferiores aos encontrados no galpão com cobertura de telha de fibrocimento.

Em outro estudo, realizado durante o verão no Centro-Oeste do Brasil, Silva et al. (2015) avaliaram o efeito da utilização de telha cerâmica, telha de alumínio e telha de fibra vegetal asfáltica em protótipos de aviários em escala reduzida. Utilizaram como indicadores do ambiente térmico o ITGU e a CTR, sendo utilizada a efetividade com base no ITGU para a classificação da eficiência do material de cobertura. Observaram que os menores valores para ITGU e CTR foram nos protótipos com telha de cerâmica com efetividade de $1,07 \pm 0,07$, seguido pelos protótipos com telha de alumínio com efetividade de $1,00 \pm 0,00$. Já os maiores valores calculados de ITGU e CTR foram observados para a telha de fibra vegetal asfáltica com efetividade de $0,96 \pm 0,12$.

Sevegnani et al. (1994) avaliaram seis tipos diferentes de materiais para a cobertura de abrigos individuais em condições de verão na cidade de Piracicaba – SP no Brasil. Para a

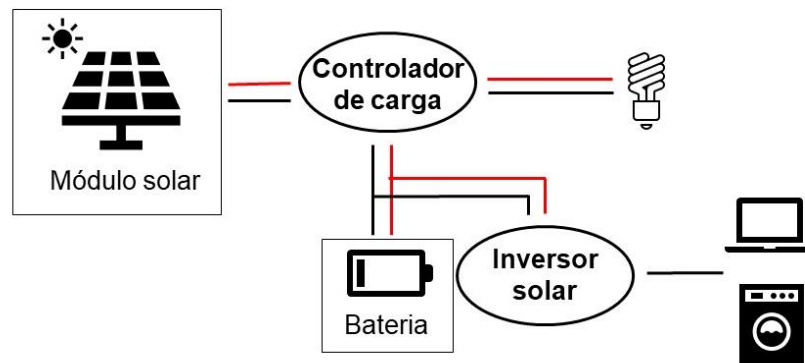
avaliação do ambiente térmico e dos materiais de cobertura os autores utilizaram o ITGU e a CTR. Foi observado que nos abrigos de telha cerâmica, de alumínio e telhas térmicas, ocorreram os menores valores calculados para ITGU e CTR, sendo os resultados considerados semelhantes estatisticamente. Tais resultados foram justificados pela porosidade da telha cerâmica e pela capacidade reflexiva das telhas de alumínio e térmica. Os maiores valores calculados de ITGU e CTR foram observados para as telhas de fibra de vidro, telhas de zinco e telhas de cimento amianto, respectivamente, sendo as telhas de zinco e de cimento amianto recomendadas para instalações com pé direito acima de 4 m.

Uma alternativa simples de amenizar os efeitos da radiação nas instalações é a alteração do coeficiente de absorção por meio da pintura da cobertura, principalmente durante o verão (BAÊTA; SOUZA, 2010). Neste sentido, Sampaio et al. (2011) avaliariam três diferentes tipos de telhas como cobertura de protótipos em escala reduzida nas condições de verão e inverno na cidade de Lages – SC no Brasil. Os materiais testados foram: telha cerâmica, telha de fibrocimento com pintura branca na parte superior e telha de aço galvanizado. Foi observado que as telhas cerâmicas e de fibrocimento pintadas de branco tiveram comportamento térmico semelhante, com valores calculados de ITGU, ITU e CTR inferiores aos observados nas telhas de aço galvanizado. Resultados semelhantes foram encontrados por Fonseca et al. (2011), que compararam a utilização de telha de fibrocimento, telha de fibrocimento pintada de branco na parte superior e telha de aço galvanizado como coberturas para abrigos individuais, durante os meses de março a maio em Goiás. Os resultados apontaram que a pintura na parte superior da telha de fibrocimento, promoveu um melhor desempenho térmico do material com redução nos valores calculados de ITGU e CTR, sendo a telha de aço galvanizado com os maiores valores de ITGU e CTR.

1.3.2 Sistemas fotovoltaicos

Um sistema fotovoltaico padrão (Figura 1) é composto basicamente por módulo solar, controlador de carga, inversor e bateria, quando se deseja estocar parte da energia (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017).

Figura 1 - Sistema padrão de energia fotovoltaica



Fonte: Adaptado de Sampaio, González (2017).

Os módulos fotovoltaicos são confeccionados com materiais distintos sobrepostos, sendo a parte superior composta por uma camada de vidro com baixa refletividade, seguido de material encapsulante, células fotovoltaicas, material encapsulante, e na parte inferior um filme plástico branco, que possui a finalidade de proteção, além de isolamento térmico. Esses materiais são reunidos e emoldurados, se tornando um corpo único, não móvel, o que confere ao módulo, maior resistência às intempéries.

As células fotovoltaicas conferem ao sistema o que é chamado de efeito fotovoltaico, ao converter a radiação solar em energia (HOSENUZZAMAN et al., 2015). Essas células são confeccionadas em materiais semicondutores que possuem uma banda de condução, uma banda vazia (*gap*) e uma banda de valência. O efeito fotovoltaico consiste no estímulo do elétron na camada de valência permitindo ao elétron a passagem pelo *gap* e a chegada à banda de condução (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017).

Existe no mercado uma infinidade de tecnologias de células fotovoltaicas (Tabela 1) que normalmente são classificadas em três tipos de geração: de primeira geração, segunda geração e terceira geração (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017). As de primeira geração se baseiam na utilização de silício cristalino (c-Si) e são totalmente comerciais quando comparadas a outras tecnologias. As de segunda geração são de tecnologias fotovoltaicas de filme fino, que utilizam silício amorfo e silício micro amorfo ou telureto de cádmio. As células de terceira geração são tecnologias fotovoltaicas orgânicas que se encontram ainda em desenvolvimento.

Tabela 1 – Relação das gerações de células fotovoltaicas, classificação de seus materiais e eficiência

Geração	Material	Eficiência de conversão (%)	Resistência à radiação	Confiabilidade	Custo
I	Silício monocristalino	24,7	Muito bom	Ótimo	Bom
	Silício policristalino	19,8	Muito bom	ótimo	bom
II	Silício Amorfo	14,5	Muito bom	Muito bom	Ótimo
	Poli-Silício	16	Muito bom	Bom	Ótimo
III	Orgânico	2	-	Muito bom	Ótimo
	Carbono	3,3	-	Bom	Ótimo

Fonte: Adaptado de Hosenuzzaman et al. (2015).

No mercado estão disponíveis as tecnologias de primeira e segunda geração. As tecnologias de primeira geração, baseadas em silício cristalino, dominam o mercado de módulos fotovoltaicos, representando no ano de 2015, 93% da produção total (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017). Isso se deve, ao avanço tecnológico obtido para silício cristalino ao longo dos anos, o que reduziu de forma considerável o valor de mercado em comparação com as outras tecnologias. A tecnologia de filme fino perdeu espaço no mercado ao longo do tempo devido a sua baixa eficiência em comparação com silício cristalino (HOSENUZZAMAN et al., 2015).

1.3.3 Painel fotovoltaico como elemento arquitetônico

O aproveitamento das áreas de telhado, apresenta um grande potencial para geração de energia fotovoltaica. A utilização dessas áreas vem sendo bastante exploradas na arquitetura urbana a fim de maximizar a geração de energia limpa, além de oferecer economia a longo prazo aos consumidores.

Na arquitetura, essa utilização de painéis solares em construções é conhecida pelas siglas em inglês BAPV (*Building applied photovoltaic*) e BIPV (*Building integrated photovoltaic*). O BIPV é a integração do módulo fotovoltaico ao edifício substituindo algum componente construtivo, podendo ser paredes, janelas ou telhados (BALJIT; CHAN; SOPIAN, 2016; YADAV; PANDA, 2020). Como nesse caso o BIPV substitui o material construtivo, essa integração pode oferecer uma economia no custo total da obra, visto que, a construção é projetada de modo a integrar o módulo fotovoltaico como elemento construtivo (REDDY et al., 2020). O BAPV é a aplicação do módulo fotovoltaico a um edifício já

construído, sendo assim, ele não substitui um elemento construtivo e é amplamente utilizado nas coberturas e em aplicações de *retrofits* (SANTOS; RÜTHER, 2012).

Atualmente existe uma infinidade de produtos para aplicações em BIPV e BAPV. Os produtos para BIPV podem ser leves e flexíveis, transparentes e semitransparentes ou telhas fotovoltaicas, sendo classificados em produtos de telha BIPV, módulo BIPV e vidros de células solares BIPV (SHUKLA; SUDHAKAR; BAREDAR, 2016, 2017). Recentemente a Eternit lançou para o mercado brasileiro a primeira telha solar, confeccionada em concreto e células de silício cristalino (ROSA, 2019).

Produtos para BAPV, no geral, apresentam vantagens em relação aos produtos para BIPV (Tabela 2). Isso se deve ao fato de que as tecnologias para BAPV são mais consolidadas no mercado e as tecnologias para BIPV ainda se encontram em pleno desenvolvimento tecnológico. As vantagens estão em grande parte relacionadas com a duração dos módulos fotovoltaicos, a confiabilidade, a eficiência e o valor de mercado. Os autores de um estudo na Malásia, avaliando modelos BIPV e BAPV em um mesmo edifício, observaram uma ligeira vantagem do BAPV em relação à configuração de instalação para diferentes tecnologias de células fotovoltaicas (KUMAR; SUDHAKAR; SAMYKANO, 2019). Esses autores observaram que houve um maior rendimento nas tecnologias BAPV com uma diferença no fator de rendimento de 4,36 kWh/kWp para as tecnologias em silício cristalino, 2,4498 kWh/kWp para seleneto de cobre, índio e gálio (CIS) e 1,8315 para telureto de cádmio.

Tabela 2 – Comparação entre a aplicação (BAPV) e integração (BIPV) da tecnologia fotovoltaica a edifícios

BAPV	BIPV
Relativamente comum em todo o mundo e, portanto, com muita infraestrutura.	O mercado é menor, as tecnologias ainda estão em desenvolvimento e não possuem preço competitivo com painéis convencionais.
A eficiência dos painéis tem aumentado constantemente, enquanto o preço diminui.	A Infraestrutura e os padrões necessários ainda não foram estabelecidos, demandando mais estudos para se desenvolver.
Duráveis e funcionam com capacidade nominal até 25 a 30 anos.	Algumas formas de sistemas fotovoltaicos amorfo são usadas na construção, a produtividade do sistema fotovoltaico pode diminuir em até 10 anos, vida útil menor que o painel convencional.
Padrões da indústria bastante desenvolvidos e bem conhecidos por instaladores profissionais.	Esteticamente agradável podendo ser perfeitamente integrado ao edifício para dar uma aparência elegante e moderna.
De fácil instalação sobre um telhado, sem exigências de reforma estrutural.	Pode substituir quase todos os materiais construtivos e, assim, reduzir a longo prazo os custos de um edifício por meio de economia de custos operacionais e redução de energia.
Grande, retangular, visualmente desagradável.	
As opções de posicionamento são geralmente limitadas sobre um telhado ou montado no solo.	

Fonte: Adaptado de Shukla et al. (2017).

1.3.4 Ambiente térmico de instalações com painel fotovoltaico na cobertura

A aplicação de módulos fotovoltaicos em coberturas de instalações pode ser considerada como modificação arquitetônica. Essa modificação, por adicionar outro material sobre a cobertura, durante o dia, gera uma redução do fluxo de calor da parte superior para a parte inferior, o que pode gerar redução da temperatura do ambiente interno (DOMINGUEZ; KLEISSL; LUVALL, 2011). A temperatura do ar interno é diretamente influenciada pela cobertura e o tipo de material empregado, pois ela representa a primeira barreira de interceptação da radiação solar. O sombreamento conferido pela cobertura, reduz consideravelmente a carga de radiação recebida no interior da instalação, principalmente nas horas mais quentes do dia (CARNEIRO et al., 2015).

Estudos apontaram que ao adicionar módulos fotovoltaicos à cobertura, o desempenho energético do edifício é modificado, requerendo menor carga de resfriamento durante as épocas mais quentes do ano (ABUSEIF; GOU, 2018; AWAN et al., 2020; KAPSALIS; KARAMANIS, 2015). A carga de resfriamento é definida como a quantidade de calor que

precisa ser removida do ambiente. Essa carga de resfriamento foi diminuída em 17% durante a época mais quente do ano, e uma carga de aquecimento de 6,7% foi requerida no período mais frio do ano, em um edifício com o sistema BAPV em comparação com a ausência dos módulos fotovoltaicos (KAPSALIS; KARAMANIS, 2015). Quando considerado o valor anual de exigências de carga de resfriamento e aquecimento, a partir da demanda total ponderada, as cargas foram diminuídas em 3,2% (KAPSALIS; KARAMANIS, 2015).

Em estudo realizado na Califórnia, os autores observaram redução nas temperaturas superficiais internas da cobertura de um edifício com a aplicação de módulos fotovoltaicos em duas inclinações distintas (plano e inclinação de 4,4° Sul) e sem a aplicação. Esse estudo apontou uma diferença de temperatura superficial interna da cobertura onde apresentava o BAPV em relação à cobertura exposta (DOMINGUEZ; KLEISSL; LUVALL, 2011). Os autores efetuaram a modelagem térmica do perfil com os módulos fotovoltaicos e sem os módulos. Foi verificada redução de cerca de 63% do fluxo de calor na região com painel inclinado, em comparação com a região sem painel fotovoltaico (DOMINGUEZ; KLEISSL; LUVALL, 2011). Quando se estendeu a análise para o ano todo, foi observada redução na carga de resfriamento de cerca de 5,91 kWh/m², o que representa um ganho líquido de 4% no consumo de energia pelo edifício. Esses resultados apontam uma vantagem indireta em aplicar módulos fotovoltaicos à cobertura, uma vez que, a quantidade de calor a ser removido do edifício foi menor quando comparado com a cobertura sem a presença dos módulos fotovoltaicos. Isso representa menor gasto de energia para resfriar os ambientes durante os períodos quentes do ano para proporcionar condições microclimáticas de conforto térmico.

Nesse sentido, pesquisas para a avaliação do ambiente térmico de instalações com a aplicação fotovoltaica à cobertura foram efetuadas (BILČÍK; BOŽIKOVÁ; ČIMO, 2021; BONIFACIUS; EKASIWI, 2013). A redução da temperatura do ar foi observada em um estudo na Europa Central (BILČÍK; BOŽIKOVÁ; ČIMO, 2021), onde foi analisado um estábulo com cobertura metálica com a presença de módulos fotovoltaicos e comparado a um estábulo sem a presença dos módulos. Esses autores encontraram uma diferença de temperatura do ar de cerca de 1,2 °C nas horas mais quentes do dia. Além disso eles utilizaram o ITU para a avaliação do ambiente térmico e apresentaram a relação entre ITU e temperatura do ar para a presença e ausência dos módulos fotovoltaicos, a diferença média de ITU para ambas as coberturas foi de 2,8.

1.3.5 Uso de painéis fotovoltaicos na agropecuária

Um sistema que se encontra em expansão, são os sistemas agrivoltaicos (ENEL GREEN POWER, 2019). Nesses sistemas, são associadas a produção de energia fotovoltaica com a produção agrícola com diversas culturas (PASCARIS et al., 2021; TOUIL et al., 2021). Recentemente, os sistemas agrivoltaicos estão sendo aplicados à produção animal para produção de sombras em pastagens para diminuir a carga térmica de radiação que chega aos animais.

Em um estudo comparativo no Brasil, Maia et al. (2020) avaliou o comportamento de ovelhas pela preferência da sombra gerada por malhas (80% de sombreamento) e painéis fotovoltaico instalados no pasto, observou-se que nos horários do dia de maior radiação os animais preferiram as sombras geradas pelo sistema fotovoltaico em 70 % do tempo. Para a avaliação do conforto térmico, os autores utilizaram a CTR como critério e observaram redução de aproximadamente 40 W/m² para a sombra sob os painéis fotovoltaicos em comparação com a malhas.

Para vacas leiteiras, em um estudo efetuado por Sharpe et al. (2021), avaliando sistemas solares fotovoltaicos como alternativa de sombreamento durante o verão americano, analisaram o comportamento das vacas distribuídas em locais com utilização de sombreamento por meio de painel fotovoltaico com outro grupo sem o sombreamento. Os resultados mostraram que não houve aumento da produção de leite, porém as vacas que tiveram acesso às sombras, apresentaram temperaturas corporais menores no momento da ordenha e frequência de respiração menores (SHARPE et al., 2021). Para estimar o percentual do tempo e identificar em que momentos as vacas permaneceram sob a sombra, os autores utilizaram o ITU do ambiente externo como critério e observaram estresse térmico moderado com valores entre 73,3 e 77,4 durante o dia, sendo observado maior uso das sombras pelas vacas nesses momentos. De modo geral, as vacas utilizaram a sombra projetada pelo sistema agrivoltaico, durante 41 % do dia, o uso foi maior nos dias em que ocorreram os maiores valores de ITU e radiação solar.

1.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação de painéis fotovoltaico em galpões de produção animal é uma realidade que tende a aumentar devido à necessidade se obter maior sustentabilidade na produção, além de autonomia energética. Dessa forma, é necessário o conhecimento do funcionamento do

sistema para selecionar a melhor forma de instalação a fim de maximizar a geração de energia.

As coberturas das instalações de produção animal, são responsáveis pela diminuição da carga de radiação que chega até os animais, oferecendo um ambiente mais adequado para a produção em termos de conforto térmico e bem-estar animal. A aplicação de placas fotovoltaicas, insere um novo elemento à cobertura dessas instalações o que pode impactar significativamente o ambiente térmico.

Vários trabalhos apresentados nessa revisão evidenciaram que o fluxo de calor em coberturas com a aplicação de placas fotovoltaicas tende a ser reduzido. Isso representa um menor consumo de energia para manter o acondicionamento térmico ideal no interior das instalações de produção animal. Isso ocorre devido à diminuição da radiação térmica que é emitida pelos materiais de cobertura, que conseqüentemente melhora as condições térmicas no interior das instalações.

As pesquisas que relacionam a utilização de painéis fotovoltaicos com a produção animal são escassas, sendo necessários mais estudos avaliando o impacto dessa aplicação no ambiente térmico com a associação de diferentes materiais de cobertura e seu impacto na produtividade animal. Além do mais, tornam-se necessários estudos do ponto de vista econômico analisando o custo-benefício a curto e longo prazo.

1.5. REFERÊNCIAS

ABUSEIF, M.; GOU, Z. A Review of Roofing Methods: Construction Features, Heat Reduction, Payback Period and Climatic Responsiveness. **Energies**, v. 11, n. 11, p. 3196, 18 nov. 2018.

AWAN, A. B. et al. Comparative Analysis of Ground-Mounted vs. Rooftop Photovoltaic Systems Optimized for Interrow Distance between Parallel Arrays. **Energies**, v. 13, n. 14, p. 3639, 15 jul. 2020.

BAÊTA, F.; SOUZA, C. **Ambiência em Edificações Rurais**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2010.

BALJIT, S. S. S.; CHAN, H.-Y.; SOPIAN, K. Review of building integrated applications of photovoltaic and solar thermal systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 677–689, 20 nov. 2016.

BILČÍK, M.; BOŽIKOVÁ, M.; ČIMO, J. Influence of Roof Installation of PV Modules on the Microclimate Conditions of Cattle Breeding Objects. **Applied Sciences**, v. 11, n. 5, p. 2140, 28 fev. 2021.

BONIFACIUS, N.; EKASIWI, S. N. N. Small scale experiment: Thermal Performance Comparison Between Fiber-Cement Roof and Photovoltaic Roof in Malang, Indonesia. **MAKARA Journal of Technology Series**, v. 16, n. 2, p. 99–102, 25 abr. 2013.

BUFFINGTON, D. E. et al. Black Globe-Humidity Index (BGHI) as Comfort Equation for Dairy Cows. **Transactions of the ASAE**, v. 24, n. 3, p. 0711–0714, 1981.

CAMPOS, P. H. R. F. et al. Physiological responses of growing pigs to high ambient temperature and/or inflammatory challenges. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 46, n. 6, p. 537–544, 1 jun. 2017.

CARNEIRO, T. A. et al. Condicionamento térmico primário de instalações rurais por meio de diferentes tipos de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 11, p. 1086–1092, 1 nov. 2015.

DAMASCENO, F. A. et al. Concepções arquitetônicas das instalações utilizadas para a produção avícola visando o conforto térmico em climas tropicais e subtropicais. **Pubvet**, v. 4, p. Art. 986-991, 2010.

DAMASCENO, F. A. et al. Evaluación térmica de tejas ecológicas en modelos físicos de galpones avícolas. **DYNA**, v. 83, n. 197, p. 114, 30 jun. 2016.

DOMINGUEZ, A.; KLEISSL, J.; LUVALL, J. C. Effects of solar photovoltaic panels on roof heat transfer. **Solar Energy**, v. 85, n. 9, p. 2244–2255, 1 set. 2011.

ENEL GREEN POWER. **Agrivoltaico: um novo modelo de utilização do solo à sombra dos parques fotovoltaicos | Enel Green Power**. Disponível em: <<https://www.enelgreenpower.com/pt/historias/articles/2019/04/novo-modelo-solo-fotovoltaicos>>. Acesso em: 20 jun. 2021.

FIORELLI, J. et al. Influência de diferentes materiais de cobertura no conforto térmico de instalações para frangos de corte no oeste paulista. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 5, p. 986–992, out. 2010.

FONSECA, P. C. DE F.; ALMEIDA, E. A. DE; PASSINI, R. Thermal comfort indices in individual shelters for dairy calves with different types of roofs. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 6, p. 1044–1051, dez. 2011.

FURTADO, D. A.; AZEVEDO, P. V. DE; TINÔCO, I. DE F. F. Análise do conforto térmico em galpões avícolas com diferentes sistemas de acondicionamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 559–564, dez. 2003.

GONCALVES, J. E.; VAN HOOFF, T.; SAELENS, D. A physics-based high-resolution BIPV model for building performance simulations. **Solar Energy**, v. 204, n. May, p. 585–599, jul. 2020.

HOSENUZZAMAN, M. et al. Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 284–297, 1 jan. 2015.

KAPSALIS, V.; KARAMANIS, D. On the effect of roof added photovoltaics on building's energy demand. **Energy and Buildings**, v. 108, p. 195–204, 1 dez. 2015.

KUMAR, N. M.; SUDHAKAR, K.; SAMYKANO, M. Performance comparison of BAPV and BIPV systems with c-Si, CIS and CdTe photovoltaic technologies under tropical weather conditions. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 13, p. 100374, 1 mar. 2019.

LIMA, K. R. DE S. et al. Avaliação do ambiente térmico interno em galpões de frango de corte com diferentes materiais de cobertura na Mesorregião Metropolitana de Belém. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 51, n. 1, p. 37–50, 2009.

MAIA, A. S. C. et al. Photovoltaic panels as shading resources for livestock. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, p. 120551, jun. 2020.

ONU. **Adoção do acordo paris Convenção Quadro sobre Mudança do Clima**, 2015.

OSORIO, H. R. et al. Thermal environment in two broiler barns during the first three weeks of age. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 3, p. 256–262, 1 mar. 2016.

PASCARIS, A. S. et al. Integrating solar energy with agriculture: Industry perspectives on the market, community, and socio-political dimensions of agrivoltaics. **Energy Research & Social Science**, v. 75, p. 102023, 1 maio 2021.

PAULINO, M. T. F. et al. Criação de frangos de corte e acondicionamento térmico em suas instalações: Revisão. **Pubvet**, v. 13, n. 2, p. 1–14, fev. 2019.

PENG, C.; HUANG, Y.; WU, Z. Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 12, p. 3592–3598, dez. 2011.

PORTOLAN DOS SANTOS, Í.; RÜTHER, R. Limitations in solar module azimuth and tilt angles in building integrated photovoltaics at low latitude tropical sites in Brazil. **Renewable Energy**, v. 63, p. 116–124, 1 mar. 2014.

REDDY, P. et al. Status of BIPV and BAPV System for Less Energy-Hungry Building in India—A Review. **Applied Sciences**, v. 10, n. 7, p. 2337, 29 mar. 2020.

ROSA, M. **1ª telha solar fotovoltaica do país será lançada pela Eternit**. Disponível em: <<https://ciclovivo.com.br/arq-urb/arquitetura/1a-telha-solar-fotovoltaica-eternit/>>. Acesso em: 20 jun. 2021.

SAMPAIO, C. A. DE P.; CARDOSO, C. O.; SOUZA, G. P. DE. Temperaturas superficiais de telhas e sua relação com o ambiente térmico. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 2, p. 230–236, abr. 2011.

SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 590–601, 1 jul. 2017.

SANTOS, Í. P. DOS; RÜTHER, R. The potential of building-integrated (BIPV) and building-applied photovoltaics (BAPV) in single-family, urban residences at low latitudes in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 50, p. 290–297, 1 jul. 2012.

SANTOS, P. A. et al. Ambiente térmico no interior de modelos de galpões avícolas em escala reduzida com ventilação natural e artificial dos telhados. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 575–584, dez. 2005.

SENAR. **Uso de energia solar tem forte expansão no agronegócio**. Disponível em: <<http://www2.senar.com.br/Noticias/Detalhe/11697>>. Acesso em: 20 jun. 2021.

SEVEGNANI, K. B.; GHELFI FILHO, H.; SILVA, I. J. O. DA. Comparação de vários materiais de cobertura através de índices de conforto térmico. **Scientia Agrícola**, v. 51, n. 1, p. 1–7, abr. 1994.

SHARPE, K. T. et al. Evaluation of solar photovoltaic systems to shade cows in a pasture-based dairy herd. **Journal of Dairy Science**, v. 104, n. 3, p. 2794–2806, 1 mar. 2021.

SHUKLA, A. K.; SUDHAKAR, K.; BAREDAR, P. A comprehensive review on design of building integrated photovoltaic system. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 99–110, 15 set. 2016.

SHUKLA, A. K.; SUDHAKAR, K.; BAREDAR, P. Recent advancement in BIPV product technologies: A review. **Energy and Buildings**, v. 140, p. 188–195, 1 abr. 2017.

SILVA, M. G. DA et al. Desempenho térmico de tipos de cobertura no interior de modelos reduzido de galpões avícolas. **Energia na agricultura**, v. 30, n. 3, p. 269, 5 nov. 2015.

TINÔCO, I. Avicultura Industrial: Novos Conceitos de Materiais, Concepções e Técnicas Construtivas Disponíveis para Galpões Avícolas Brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência Avícola**, v. 3, n. 1, p. 01–26, jan. 2001.

TOUIL, S. et al. Shading effect of photovoltaic panels on horticulture crops production: a mini review. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 20, n. 2, p. 281–296, 26 jun. 2021.

YADAV, S.; PANDA, S. K. Thermal performance of BIPV system by considering periodic nature of insolation and optimum tilt-angle of PV panel. **Renewable Energy**, v. 150, p. 136–146, maio 2020.

CAPÍTULO 2

AMBIENTE TÉRMICO E CONFORTO ANIMAL DE PROTÓTIPOS DE AVIÁRIO COM PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO SOBRE A COBERTURA

RESUMO: As áreas sobre os telhados das instalações de produção animal, apresentam grande potencial de geração de energia solar. No entanto, o impacto que a adição de um novo material à cobertura pode causar ao ambiente térmico da instalação ainda é pouco estudado. Assim, objetivou-se com esse trabalho investigar o efeito da aplicação de painéis fotovoltaicos na cobertura de protótipos, em escala reduzida de aviários, sobre o ambiente térmico e sobre a condição de conforto animal no interior dos protótipos. Para isso, foram utilizados seis protótipos de aviários em escala reduzida, na escala 1:5. Eles foram equipados com três tipos de telhas (cerâmica, fibrocimento e metálica) com e sem painel fotovoltaico. O efeito da aplicação do painel fotovoltaico foi verificado por meio da avaliação da temperatura do ar, da temperatura superficial das coberturas, do índice de temperatura e umidade (ITU), do índice de temperatura de globo negro e umidade (ITGU) e da carga térmica de radiação (CTR). Os resultados apontaram que a aplicação do painel fotovoltaico na cobertura, independentemente do tipo de telha, foi eficiente ao reduzir a temperatura do ar em cerca de 0,4 °C, o ITGU em cerca de 0,7 e a CTR em cerca de 4 W/m². Já para o ITU só foi observada redução de 4,8 na cobertura de fibrocimento.

Palavras-chave: ambiência, energia solar, índices do ambiente térmico.

THERMAL ENVIRONMENT AND ANIMAL COMFORT OF AVIARY PROTOTYPES WITH PHOTOVOLTAIC SOLAR PANEL OVER THE ROOF

ABSTRACT: The areas on the roofs of animal production facilities have great potential for generating solar energy. However, the impact that the addition of a new material to the roof can have on the installation's thermal environment is still poorly studied. Thus, the objective of this work was to investigate the effect of the application of photovoltaic panels in the coverage of prototypes, in reduced scale of aviaries, on the thermal environment and on the animal comfort condition inside the prototypes. For this, six prototypes of aviaries on a reduced scale were used, in a 1:5 scale. They were equipped with three types of tiles (ceramic, fiber cement and metal) with and without a photovoltaic panel. The effect of applying the

photovoltaic panel was verified by evaluating the air temperature, the surface temperature of the roofs, the temperature and humidity index (THI), the black globe temperature index and humidity (BGHI) and the thermal load radiation (RHL). The results showed that the application of the photovoltaic panel on the roof, regardless of the type of tile, was efficient in reducing the air temperature by about 0.4 °C, the BGHI by about 0.7 and the RHL by about 4 W /m². As for THI, there was only a 4.8 reduction in fiber cement coverage.

Keywords: ambience, solar energy, thermal environment indices.

2.1 INTRODUÇÃO

As áreas de telhados das instalações utilizadas para o confinamento de animais na agroindústria de produção animal, bem como os aviários para produção de frangos de corte, possuem alto potencial de geração de energia fotovoltaica. Isso devido à alta incidência de radiação solar, dada a orientação das instalações, e à possibilidade de melhor aproveitamento dessa área até então disponível. Por isso, a utilização dos painéis fotovoltaicos na cobertura das instalações vem se tornando cada vez mais presente na realidade dos produtores brasileiros e tende a aumentar em decorrência da necessidade de tornar os sistemas de produção animal mais sustentáveis e autônomos energeticamente. Além disso, a utilização de energias renováveis tende a aumentar em todos os setores, devido ao compromisso assumido pelo país no Acordo de Paris, que deve gerar incentivos fiscais para o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis (ONU, 2015).

A aplicação de painéis fotovoltaicos em edifícios, consiste na associação dos módulos fotovoltaicos aos elementos construtivos da estrutura, sendo mais comumente aplicados aos telhados (SANTOS; RÜTHER, 2012). Essa aplicação, pode gerar impactos no ambiente térmico da instalação e afetar um dos principais objetivos da cobertura, que é reduzir a radiação que chega até o interior da construção, a fim de manter a faixa de conforto térmico animal dentro do que é considerado ideal. O sombreamento conferido e a radiação térmica total que chega no interior das instalações dependem principalmente dos materiais que são utilizados na cobertura da construção (SANTOS et al., 2005; TINÔCO, 2001). Já existem alguns estudos sobre os efeitos do uso de painéis fotovoltaicos, posicionados na cobertura, sobre as cargas de resfriamento e aquecimento do último andar de edifícios urbanos (AWAN et al., 2020; KAPSALIS; KARAMANIS, 2015) sendo verificada uma redução considerável

nas exigências de cargas de resfriamento (ABUSEIF; GOU, 2018). Redução essa atribuída ao menor fluxo de calor da parte externa para a interna da cobertura (DOMINGUEZ; KLEISSL; LUVALL, 2011). Tal fato representa uma grande vantagem para os sistemas de produção animal brasileiros, principalmente no verão, quando demandam grande quantidade de energia para manter os sistemas de ventilação em funcionamento a fim de manter o conforto térmico animal na instalação.

A demanda de ventilação nos aviários, se deve principalmente pela necessidade de redução da temperatura do ar interno, pois os animais de produção são homeotérmicos, ou seja, têm a capacidade de manter a temperatura do seu núcleo corporal dentro de um limite estreito de temperatura, que permite às funções vitais permanecerem ativas (BAËTA; SOUZA, 2010). Assim, quando a temperatura do ambiente atinge valores caracterizados como estressores, superiores ou inferiores aos limites estabelecidos como conforto térmico, os processos fisiológicos que aumentam ou diminuem a temperatura corporal interna do animal são ativados, o que resulta em pior desempenho produtivo.

Para avaliar o grau de conforto térmico em instalações de produção animal, normalmente são utilizados índices do ambiente térmico. Eles indicam de forma satisfatória a sensação térmica do animal alojado na construção e podem ser utilizados na avaliação da eficiência térmica de materiais de coberturas (BILČÍK; BOŽIKOVÁ; ČIMO, 2021; CARNEIRO et al., 2015; DAMASCENO et al., 2016; TINÔCO, 2001). Esses índices relacionam as variáveis ambientais e consideram as trocas de calor animal-ambiente, sendo um ótimo indicador da condição térmica do animal. Nesse sentido, os autores de um estudo realizado na Europa Central observaram uma redução de 2,8 no índice de temperatura e umidade de protótipos em escala reduzida e estábulos em condições reais com cobertura metálica associada a aplicação de módulos fotovoltaicos à cobertura (BILČÍK; BOŽIKOVÁ; ČIMO, 2021). Em outro estudo realizado no Brasil, utilizando os módulos fotovoltaicos como alternativa de sombreamento para ovelhas e cordeiros, foi observada uma redução 40 W/m² na carga térmica de radiação em relação à utilização de malha com 80% de sombreamento (MAIA et al., 2020). Esse estudo também demonstrou que as ovelhas e os cordeiros preferiram em 70% do tempo a sombra gerada pelos módulos fotovoltaicos.

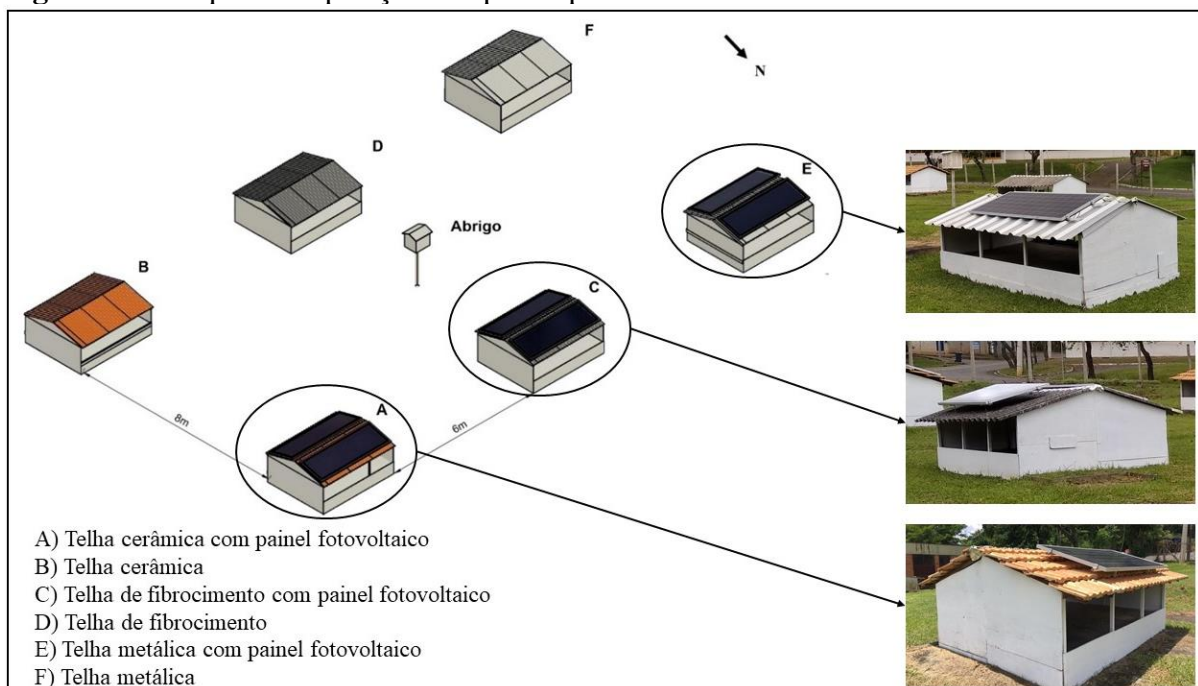
Diante do exposto, com esse trabalho buscou-se investigar o efeito da aplicação de painéis fotovoltaicos posicionados sobre a cobertura de protótipos de aviários em escala reduzida com relação ao ambiente térmico e a condição de conforto térmico animal.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada em seis protótipos de aviários presentes nas dependências do Núcleo de Pesquisa em Ambiente e Engenharia de Sistemas Agroindustriais (AMBIAGRO), do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV) em Viçosa MG. Os protótipos estão localizados nas seguintes coordenadas, latitude 20° 45' Sul e longitude 45° 52' Oeste, com altitude média de 712 m. O clima da região, segundo a classificação *Koppen*, é *Cwa*, clima subtropical com inverno seco e frio e verão quente e úmido. O experimento foi conduzido durante a época mais quente do ano, durante os meses de novembro e dezembro de 2020.

Os seis protótipos utilizados foram confeccionados em escala reduzida de um aviário comercial de frangos de corte, utilizando o conceito de similitude na escala 1:5 (JENTZSCH et al., 2011; MURPHY, 1950). Todos os protótipos possuem as mesmas dimensões de 2,5 m de largura, 3,2 m de comprimento e 0,6 m de pé direito. Foram posicionados em área plana, gramada, distribuídos em duas linhas, com a cumeeira orientada no sentido Leste-Oeste. Os protótipos foram alocados com 6 m de distância entre eles, no sentido longitudinal e 8 m de distância entre as linhas (Figura 1).

Figura 1 – Croqui da disposição dos protótipos e dos tratamentos.



Fonte: Autor.

Os protótipos utilizados representam instalações avícolas híbridas com sistema de ventilação natural pelas laterais nas faces Norte/Sul que permanecem predominantemente abertas. As faces Leste/Oeste, que representam os oitões da instalação, foram fechadas com placas de compensado de 0,01 m de espessura. O telhado é composto por duas águas com inclinação de 30%. A estrutura de sustentação dos protótipos é modular, a cada 0,80 m com pilares de seção quadrada de 0,03 x 0,03 m. O piso é constituído por placas de compensado de 0,01 m, a 0,40 m do solo e sustentado por vigas de madeira, no sentido transversal, com seção retangular de 0,03 x 0,05 m. A estrutura do telhado é de madeira, composta por duas vigas no sentido longitudinal, com seção retangular de 0,03 x 0,05 m, posicionadas nas laterais e uma viga cumeeira com seção retangular de 0,04 x 0,10 m.

Os tratamentos foram constituídos por utilização de três diferentes combinações de materiais de cobertura com ausência e presença de painel fotovoltaico. Os tipos de telha utilizados foram: telha cerâmica romana, telhas de fibrocimento onduladas, com 5,0 mm de espessura e telha metálica em formato trapezoidal, com 0,4 mm de espessura. Três dos seis protótipos foram equipados com dois painéis fotovoltaicos com células de silício policristalino, sendo um em cada água do telhado, nas dimensões de 2 m de comprimento e 1 m de largura, cobrindo 53% do telhado. Os painéis foram posicionados a 0,1 m da cobertura nas telhas cerâmica e fibrocimento e 0,05 m na telha metálica, todos inclinados para as faces Norte e Sul, essas distâncias foram escolhidas considerando-se o padrão de instalação comercial para cada tipo de telha.

2.2.1 Efeito do painel solar fotovoltaico sobre o ambiente térmico dos protótipos

Para a análise do ambiente térmico dos protótipos foram monitorados no interior dos protótipos os dados contínuos referentes à temperatura do ar (°C). Os dados de temperatura foram coletados continuamente e registrados em intervalos de 15 minutos, por meio de um *datalogger* da marca HOBBO, modelo U14, com resolução de $\pm 0,3$ °C (temperatura) e $\pm 2,5\%$ (umidade), instalados no centro geométrico de cada protótipo.

Para a avaliação do conforto térmico, os valores de temperatura do ar observados, foram comparados com as faixas de termoneutralidade presentes na literatura, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Faixa de termoneutralidade para frangos de corte.

Semana de vida	1 (°C)	2 (°C)	3 (°C)	4 (°C)
Termoneutralidade	31,3 * 32 -35 **	26,3 – 27,1 * 29 – 32 **	22,5 – 23,2 * 26 – 29 **	23 – 26 **

Fonte: *Cassuce et al. (2013); **Abreu e Abreu (2011).

Para a análise térmica dos materiais de cobertura dos protótipos, a temperatura superficial interna da telha (TSI) foi determinada por meio de um termômetro de infravermelho, marca *Fluke*, modelo 62MAX+, com precisão de ± 1 °C, de acordo com metodologia proposta por Eckelkamp et al. (2016). Os dados de temperaturas superficiais foram coletados diariamente em intervalos de três horas, entre às 6:00 e às 18:00 horas, durante todo o período experimental.

As imagens termográficas foram obtidas por uma câmera termográfica portátil com acoplamento em celular da marca Flir, modelo FLIR ONE Pro, com faixa de medição de -20 a 400 °C e precisão de $\pm 3,0$ °C, sendo as imagens obtidas às 12:00 (horário de maior intensidade da radiação solar) e 15:00 horas (horário mais críticos no interior dos protótipos).

2.2.2 Efeito do painel fotovoltaico no conforto térmico animal

Os efeitos da presença do painel solar fotovoltaico na condição de conforto térmico animal foram avaliados por meio da determinação de índices relacionados ao ambiente térmico da instalação e à condição de conforto do animal, representados nas Equações 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

O ITU foi estimado segundo o modelo desenvolvido por Thom (1959), com base na Equação 1.

$$\text{ITU} = T_s + 0,36T_o + 41,5 \quad (1)$$

Em que: T_s , temperatura de bulbo seco, °C; e T_o , temperatura de ponto de orvalho, °C.

Foi determinado o ITGU, desenvolvido por Buffington et al. (1981), que incorpora todos os fatores climáticos de forma indireta (temperatura, umidade relativa, velocidade do ar e radiação) em um único valor que foi estimado pela Equação 2.

$$ITGU = T_g + 0,36 T_o + 41,5 \quad (2)$$

Em que: T_g , Temperatura de globo negro, °C; e T_o , temperatura de ponto de orvalho, °C.

As trocas radiantes ao nível dos animais foram quantificadas pela CTR (Equação 3), com cálculo baseado na temperatura radiante média (TRM), representado pela Equação 4 (KELLY; BOND; ITTNER, 1950).

$$CTR = \sigma TRM^4 \quad (3)$$

Em que: σ , a constante de Stephan-Boltzmann, $W/(m^2 K^4)$; e TRM, K.

$$TRM = 100 \left(2,51 \sqrt{V} (T_g - T_s) + \left(\frac{T_g}{100} \right)^4 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

Em que: V é a velocidade do ar, m/s; T_g , a temperatura de globo negro, K; e T_s , a temperatura de bulbo seco (temperatura do ar), K.

Para a avaliação do conforto térmico animal, os valores calculados de ITU e ITGU, foram comparados com as faixas de conforto disponíveis na literatura, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Faixas de conforto para frangos de corte da primeira à quarta semana de vida.

Semana de vida	Faixa de conforto	
	ITU	ITGU
1	12,4 - 80	81,3
2	68,4 - 76	74,9
3	64,5 - 72	69,8
4	60,5 - 68	69,8
Fonte	Silva et al. (2004)	Oliveira et al. (2006)

Para a composição dos índices, foram monitorados no interior dos protótipos umidade relativa do ar (%), temperatura de globo negro (°C) e velocidade do ar (m/s). Os dados de umidade relativa do ar foram coletados continuamente e registrados em intervalos de 15 minutos, por meio de um *datalogger* da marca HOBO, modelo U14, com resolução de $\pm 0,3$ °C (temperatura) e $\pm 2,5\%$ (umidade), instalados no centro geométrico de cada protótipo.

Para a determinação da temperatura de globo negro foram utilizados sensores tipo Hobo, modelo UX100-003, com faixa de medição de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, precisão de $\pm 0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, alocados no interior de globos de plástico do tipo policloreto de vinila (PVC) com 15 cm de diâmetro, com dupla pintura em tinta fosca na cor preta. Os globos com os hobos foram instalados no centro geométrico de cada protótipo e no interior do abrigo meteorológico.

A velocidade do ar foi mensurada por meio de um anemômetro de fio quente, da marca Instrutherm, modelo TAFR200, com precisão de $\pm 3\%$. Os dados de velocidade do ar foram coletados no interior do protótipo, nas faces Norte e Sul, diariamente em intervalos de três horas, entre às 6:00 e às 18:00 horas, durante todo o período experimental.

2.2.3 Análises Estatísticas

As análises estatísticas foram conduzidas utilizando o programa R (R CORE TEAM, 2021) e considerando o nível de significância estatística $\alpha < 0,05$ para todos os testes. O modelo estatístico de efeito misto apresentado na Equação 6 foi utilizado nas análises, considerando as medidas repetidas no tempo.

$$Y_{jkmn} = \mu + D_j + H_{kj} + T_{mj} + P_{nj} + (HT)_{kmj} + (HP)_{knj} + (TP)_{mnj} + (HTP)_{kmnj} + \epsilon_{jkmn} \quad (6)$$

Em que: μ representa a média geral, D_j representa o efeito aleatório do j -ésimo dia $\sim N(0, \sigma^2)$, H_{kj} representa o efeito da k -ésima hora (6, 9, 12, 15 e 18), T_{mj} representa o efeito da m -ésima telha (cerâmica, fibrocimento e metálica), P_{nj} representa o efeito do n -ésimo painel (presente e ausente), $(HT)_{kmj}$ representa a interação entre hora e telha, $(HP)_{knj}$ representa a interação entre hora e painel, $(TP)_{mnj}$ representa a interação entre telha e painel, $(HTP)_{kmnj}$ representa a interação entre hora, telha e painel e ϵ_{jkmn} representa o erro experimental $\sim N(0, \sigma^2)$.

Seguindo os procedimentos gráficos descritos por Pinheiro e Bates (2000) os resíduos foram analisados para avaliar o atendimento das pressuposições de normalidade, homoscedasticidade e independência. Ainda seguindo os procedimentos descritos por Pinheiro e Bates (2000) as estimativas do efeito aleatório também foram avaliadas quanto ao atendimento à normalidade e independência. Observado não homoscedasticidade, a estrutura da matriz de covariância foi então modelada por meio de um modelo de variância permitindo diferentes variâncias em cada nível de estratificação. Hora, telha, painel, dia e dia \times hora foram avaliados como variáveis de estratificação. O critério de informação de Akaike (AIC)

foi utilizado como critério de seleção do modelo que melhor se ajustasse aos dados. Médias marginais foram comparadas para efeitos estatisticamente significativos, sendo adotado o ajuste de Bonferroni para comparações múltiplas.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Ambiente térmico dos protótipos com presença e ausência do painel fotovoltaico

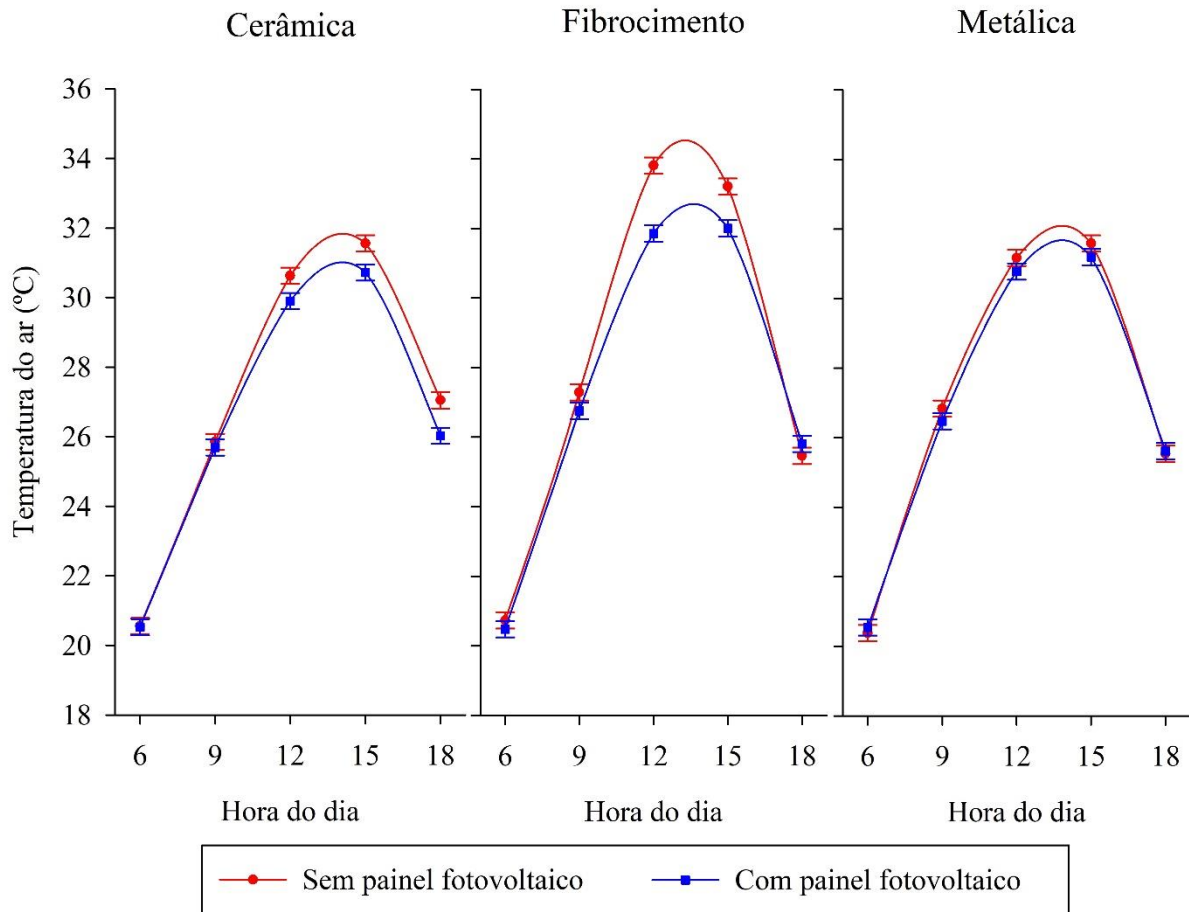
2.3.1.1 Temperatura no interior dos protótipos

Pelos resultados da análise de variância, foi verificado que para a temperatura do ar não houve interação entre o fator painel fotovoltaico e os fatores telha e hora, sendo a comparação entre ausência e presença do painel fotovoltaico significativa (*p*-valor 0,006). Assim, independentemente do tipo de telha e do horário, as médias marginais foram de $27,4 \pm 0,2$ °C para a ausência do painel fotovoltaico e de $27,0 \pm 0,2$ °C para a presença do painel fotovoltaico, o que representa uma redução de cerca de 0,4 °C na aplicação do painel fotovoltaico em relação às coberturas convencionais. Essa diferença se deve ao fato de que a presença do painel fotovoltaico na cobertura aumenta a camada isolante (painel, lacuna de ar, telha) do telhado e diminui o fluxo de calor do ambiente externo para o interno, podendo afetar a temperatura interna do ambiente (DOMINGUEZ; KLEISSL; LUVALL, 2011).

Foi verificado na análise de variância que ocorreu interação entre o tipo de telha e a hora (*p*-valor <0,001), sendo a telha de fibrocimento estatisticamente diferente das telhas de cerâmica e metálica. Esse resultado pode ser explicado devido as telhas de cerâmica serem materiais com maior eficiência no isolamento térmico quando comparadas as telhas de fibrocimento e metálicas (SAMPAIO; CARDOSO; SOUZA, 2011; SANTOS et al., 2002). Além disso, as telhas metálicas são altamente reflexivas em relação às telhas de fibrocimento e cerâmicas (SEVEGNANI; GHELFI FILHO; SILVA, 1994). Essas diferenças foram observadas principalmente às 12:00 e 15:00 horas, momento em que os valores da temperatura externa são maiores devido a ocorrência da maior intensidade de radiação solar sobre a cobertura dos protótipos.

O comportamento dos valores de temperatura do ar no interior dos protótipos com telha cerâmica, fibrocimento e metálica, com presença e ausência de painel fotovoltaico na cobertura, são apresentados na Figura 2.

Figura 2 - Comportamento dos valores de temperatura do ar no interior dos protótipos com os três tipos de telhas (cerâmica, fibrocimento e metálica) com a ausência e a presença do painel fotovoltaico



Fonte: Autor.

Observa-se que a temperatura do ar para todos os tipos de telhas analisadas, foram maiores nos momentos mais quentes do dia, entre às 12:00 e às 15:00 horas, principalmente nos casos dos telhados sem a aplicação do painel fotovoltaico. Nos protótipos com telha de cerâmica o valor médio de temperatura do ar às 12:00 horas foi de 30,6 °C e às 15:00 horas foi de 31,6 °C, enquanto nos protótipos com telha cerâmica e painel fotovoltaico esses valores foram 29,9 e 30,7 °C, respectivamente. Sendo as diferenças nos valores de temperatura do ar entre os protótipos com ausência e presença de painel fotovoltaico de cerca de 0,7 °C às 12:00 horas e cerca de 0,8 °C às 15:00 horas. Nos protótipos com telha de cerâmica ocorreu uma particularidade, em relação aos demais tipos de telhas testadas, onde às 18:00 horas houve uma diferença de cerca de 1,0 °C entre a ausência e a presença do painel fotovoltaico, o que pode ser atribuído à sombra gerada pelo painel fotovoltaico, que proporcionou aumento da sua inércia térmica.

Os maiores valores de temperatura do ar foram encontrados no protótipo com telha de fibrocimento, onde foram registrados os valores de 33,8 e 33,2 °C, às 12:00 e às 15:00 horas, respectivamente. Na associação da telha de fibrocimento com painel fotovoltaico, esses valores foram de 31,9 e 32,0 °C, respectivamente. Logo, as diferenças entre os valores de temperatura do ar nos protótipos com telha de fibrocimento com ausência e presença do painel fotovoltaico foram cerca de 2,0 °C às 12:00 horas e cerca de 1,2 °C às 15:00 horas. Esses valores corroboram com os valores encontrados por Bonifacius e Ekasiwi (2013) que ao comparar uma cobertura de fibrocimento com cobertura fotovoltaica em protótipos, na Indonésia, observaram redução na faixa de 1,1 a 1,2 °C na temperatura do ar, nos horários mais quentes do dia.

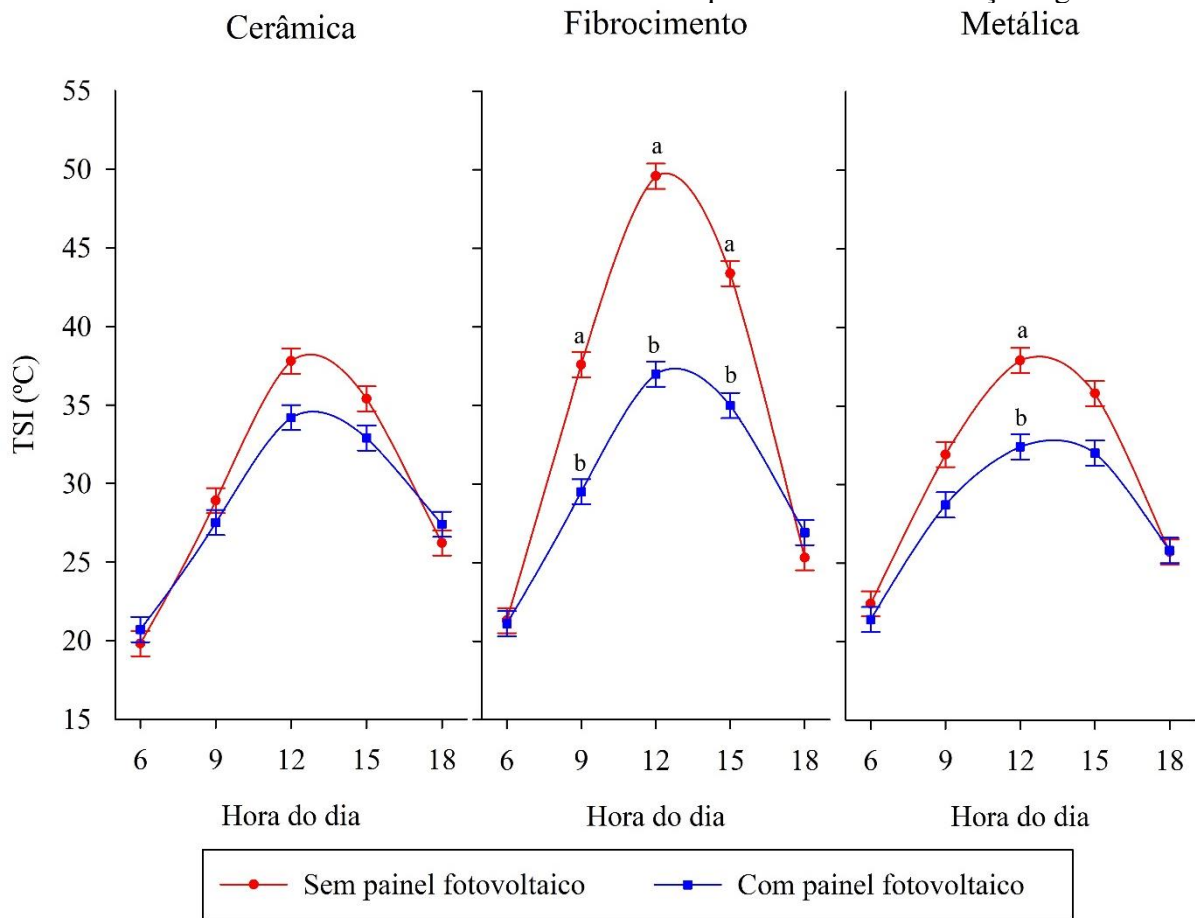
Nos protótipos com telha metálica a temperatura do ar às 12:00 horas foi de 31,2 °C e às 15:00 horas chegou a 31,6 °C, nos protótipos com telha metálica e painel fotovoltaico esses valores foram 30,8 e 31,2 °C, respectivamente. Nos protótipos com coberturas metálicas, as diferenças nos valores de temperatura do ar, entre a ausência e a presença do painel fotovoltaico às 12:00 e às 15:00 horas foram as mesmas, sendo observada uma redução de cerca de 0,4 °C nos protótipos com presença do painel fotovoltaico. No entanto, Bilčík, Božiková e Čimo, (2021) estudando o efeito de painel fotovoltaico em associação com a telha metálica em protótipos de estábulo totalmente fechados nas laterais em MDF e estábulos reais em condições da Europa Central, observaram redução de cerca de 1,2 °C onde havia aplicação dos painéis fotovoltaicos. Em nosso estudo, foi encontrado um valor três vezes menor para a cobertura metálica (0,4 °C), isso pode ser atribuído ao fato dos protótipos do presente estudo possuírem as fachadas laterais abertas, o que favorece a ventilação natural e a renovação do ar, deixando o ambiente interno mais susceptível às condições externas.

Na avaliação do conforto térmico, todos os tratamentos estiveram acima da faixa termoneutra que é de 23 a 26 °C para frangos de corte na quarta semana de vida nos horários mais quentes do dia (ABREU; ABREU, 2011). A aplicação do painel fotovoltaico na cobertura não foi suficiente para reduzir a temperatura ambiente interna e manter o microclima dentro da faixa de conforto. No entanto, ao considerar a segunda semana de vida das aves que demandam aquecimento, a aplicação do painel fotovoltaico sobre a telha de fibrocimento foi suficiente em reduzir a temperatura do ambiente interno para a faixa do termoneutro que é de 31,5 a 35 °C (ABREU; ABREU, 2011; CASSUCE et al., 2013).

2.3.1.2 Temperaturas superficiais da cobertura dos protótipos

O comportamento dos valores de temperatura superficial interna das telhas e a análise de variância para os três tipos de telhas, com e sem painel fotovoltaico, são apresentados na Figura 3.

Figura 3 – Comportamento dos valores de temperatura superficial interna (TSI) das telhas e desdobramento da interação entre a ausência e a presença do painel fotovoltaico para os três tipos de telhas analisadas dentro das horas. As letras diferentes indicam que os valores são estatisticamente diferentes e a ausência da letra indica que não houve diferenças significativas



Fonte: Autor.

Os valores das temperaturas superficiais internas das telhas para a ausência e a presença do painel fotovoltaico apresentaram comportamentos semelhantes para os três tipos de telhas (Figura 3). Contudo, verifica-se que ocorreu uma maior redução da temperatura superficial interna nas telhas de fibrocimento, quando comparados a ausência e a presença dos painéis fotovoltaicos. Sendo às 9:00 horas observados valores médios de $37,6 \pm 0,8$ °C na cobertura sem painel e $29,5 \pm 0,8$ °C na cobertura com painel (p -valor $<0,001$), às 12:00 horas foram

observados valores médios de $49,6 \pm 0,8$ °C na cobertura sem painel e $37,0 \pm 0,8$ °C na cobertura com painel (p -valor $<0,001$) e às 15:00 horas foram observados valores médios de $43,4 \pm 0,8$ °C na cobertura sem painel e $35,0 \pm 0,8$ °C na cobertura com painel (p -valor $<0,001$). Assim as diferenças entre os valores das temperaturas superficiais internas das coberturas de fibrocimento com e sem painel foram de cerca de 8,0, 12,6 e 8,4 °C, para as 9:00, 12:00 e 15:00 horas, respectivamente.

Nas coberturas metálicas, foi verificado (Figura 3) que a temperatura superficial interna foi significativamente maior na cobertura sem painel fotovoltaico às 12:00 horas, com valor médio de $37,9 \pm 0,8$ °C, quando comparada a cobertura com o painel fotovoltaico com valor médio de $32,0 \pm 0,8$ °C (p -valor = 0,003), o que representa uma redução de cerca de 5,5 °C. Já nas telhas de cerâmica não foram verificadas diferenças significativas nos valores de temperatura superficial interna das coberturas com ausência e presença de painel fotovoltaico. Embora pelo gráfico pode-se verificar uma redução em torno de 3,0 °C. Isso pode ser em decorrência da característica isolante da telha cerâmica, por ser considerada um isolante térmico de alta eficiência, principalmente em comparação com os demais materiais testados (SAMPAIO; CARDOSO; SOUZA, 2011).

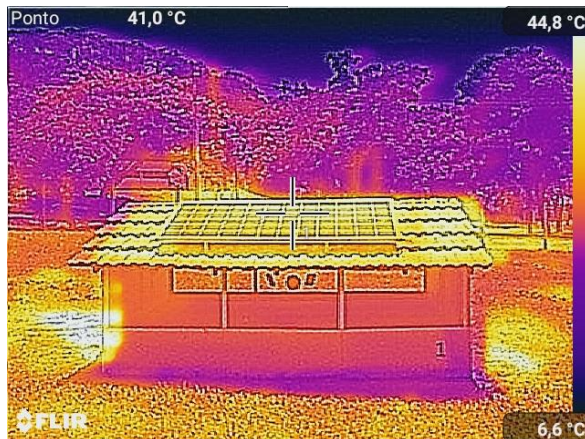
Nossos resultados corroboram com os encontrados por Dominguez, Kleissl e Luvall (2011), que verificou uma redução da temperatura superficial interna da cobertura quando houve a associação do painel fotovoltaico à cobertura de um edifício em condições climáticas da Califórnia, nos Estados Unidos. Os autores efetuaram a modelagem térmica do perfil com os módulos fotovoltaicos e sem os módulos. Na região com painel inclinado foi verificada redução de cerca de 63% do fluxo de calor e uma redução nas cargas de resfriamento em comparação com a região sem painel fotovoltaico (DOMINGUEZ; KLEISL; LUVALL, 2011). Isso pode representar menor gasto de energia para resfriar os aviários do Brasil durante os períodos quentes do ano, que demandam ventilação durante todo o dia para proporcionar condições microclimáticas de conforto térmico aos animais e garantir que expressem seu máximo potencial genético.

Na Figura 4 e 5 são apresentadas as imagens termográficas dos protótipos com os diferentes tipos de telhas e com presença e ausência dos painéis fotovoltaicos, às 12:00 e 15:00 horas, respectivamente. Pelas imagens pode-se verificar que as temperaturas superficiais externas foram relativamente elevadas, sendo o maior valor observado na telha de fibrocimento às 12:00 horas com 56,5 °C (Figura 4d), a telha de cerâmica com 45,7 °C (Figura 4b) e a telha metálica com 26,2 °C (Figura 4f). Essa elevada temperatura superficial na telha de fibrocimento pode ser explicada pela maior absorção da radiação solar em relação à telha

cerâmica e metálica e a baixa temperatura superficial da telha metálica pode ser justificada pela sua alta capacidade reflexiva (SEVEGNANI; GHELFI FILHO; SILVA, 1994).

Figura 4 – Termografia infravermelha dos protótipos às 12:00 horas: a) telha cerâmica com painel fotovoltaico; b) telha cerâmica; c) telha de fibrocimento com painel fotovoltaico; d) telha de fibrocimento; e) telha metálica com painel fotovoltaico; f) telha metálica

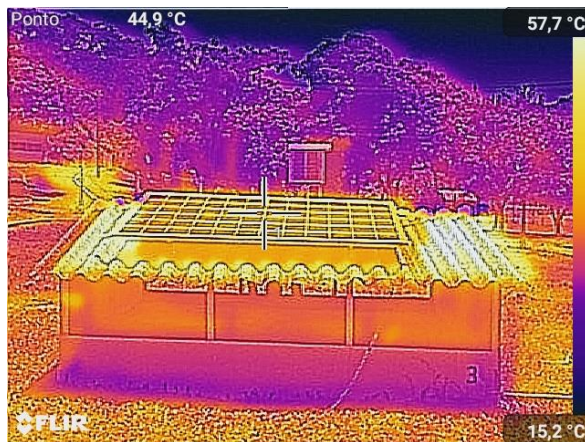
a)



b)



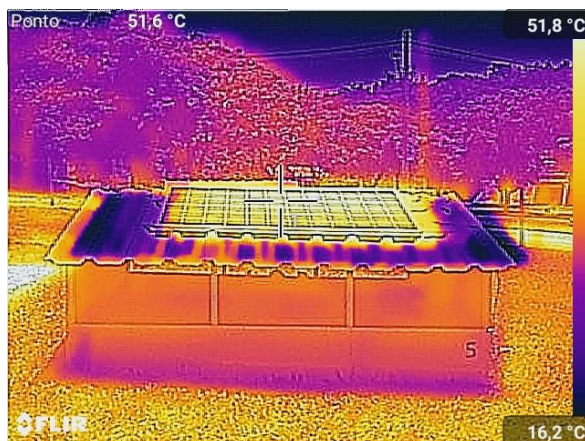
c)



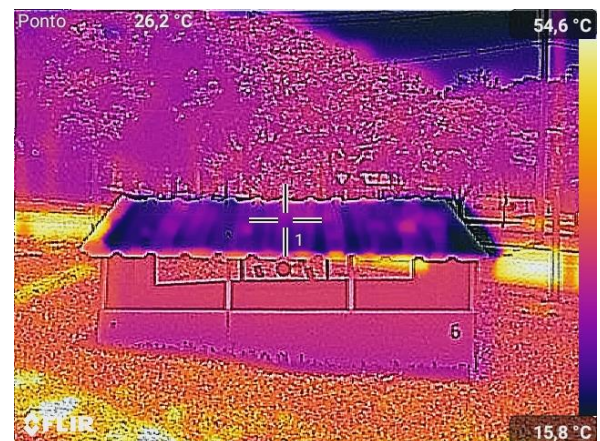
d)



e)

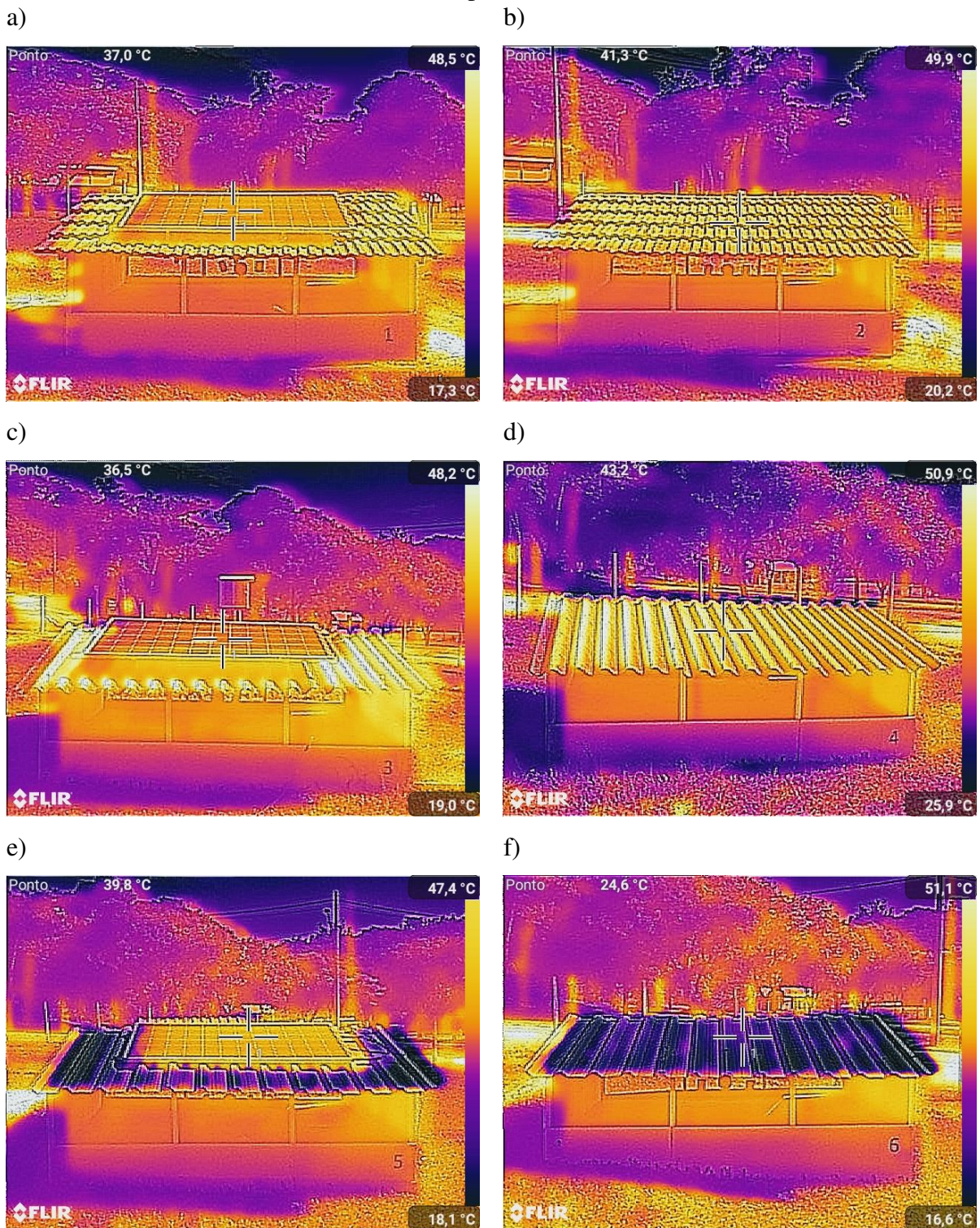


f)



Fonte: Autor.

Figura 5 – Termografia infravermelha dos protótipos às 15:00 horas: a) telha cerâmica com painel fotovoltaico; b) telha cerâmica; c) telha de fibrocimento com painel fotovoltaico; d) telha de fibrocimento; e) telha metálica com painel fotovoltaico; f) telha metálica



Fonte: Autor.

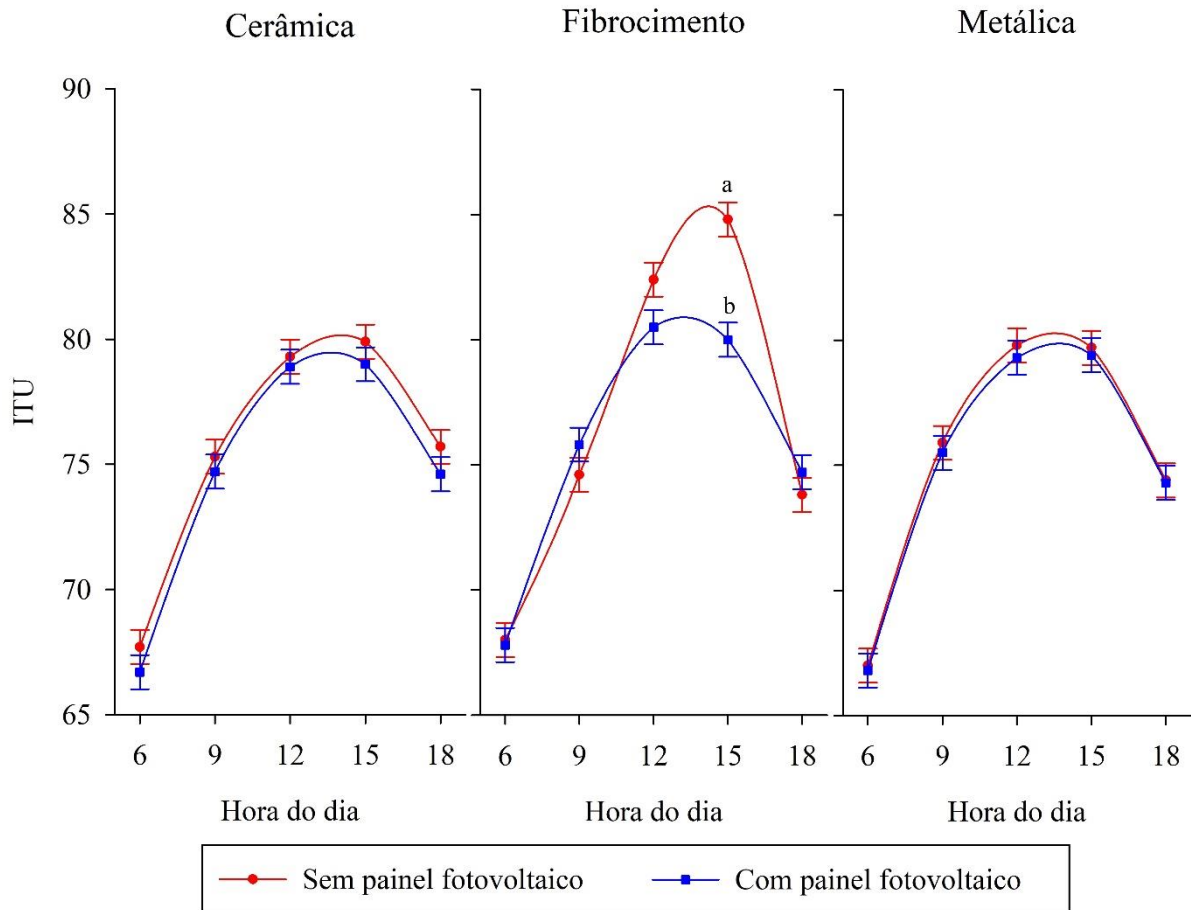
Observa-se que as temperaturas na superfície do painel fotovoltaico sobre a cobertura metálica, foram ligeiramente superiores (Figura 4 e 5) em relação às demais coberturas com a presença do painel fotovoltaico. Sendo o maior valor registrado às 12:00 horas, apresentando o valor de 51,6 °C (Figura 4e), já na cobertura de cerâmica a temperatura superficial do painel foi de 41,0 °C (Figura 4a) e na cobertura de fibrocimento de 44,9 °C (Figura 4c). A temperatura da superfície do painel sobre a telha metálica foi ligeiramente maior, devido à proximidade do painel à telha (lacuna de ar de 5 cm), que reduz as trocas de calor por convecção (XING; ZHOU; FENG, 2014), o que pode ter contribuído para reduzir o resfriamento da parte inferior do painel e a aumentar a temperatura de operação, além de poder diminuir a eficiência na geração de energia. Neste caso, pressupõe-se que a altura ideal para o seu pleno funcionamento seja cerca de 10 cm (XING; ZHOU; FENG, 2014).

2.3.2 Conforto térmico dos protótipos com presença e ausência do painel fotovoltaico

2.3.2.1 Índice de temperatura e umidade (ITU)

O comportamento dos valores de ITU e os resultados da análise de variância para os protótipos com os três tipos de telhas testadas, com e sem o painel fotovoltaico, são apresentados na Figura 6. Observa-se que os maiores valores de ITU foram observados nos momentos mais quentes do dia, entre às 12:00 e 15:00 horas.

Figura 6 – Comportamento do índice de temperatura e umidade (ITU) e desdobramento da interação entre a ausência e presença do painel fotovoltaico para os três tipos de telha analisadas dentro das horas. As letras diferentes indicam que os valores são estatisticamente diferentes e a ausência de letra indica que não houve diferenças significativas



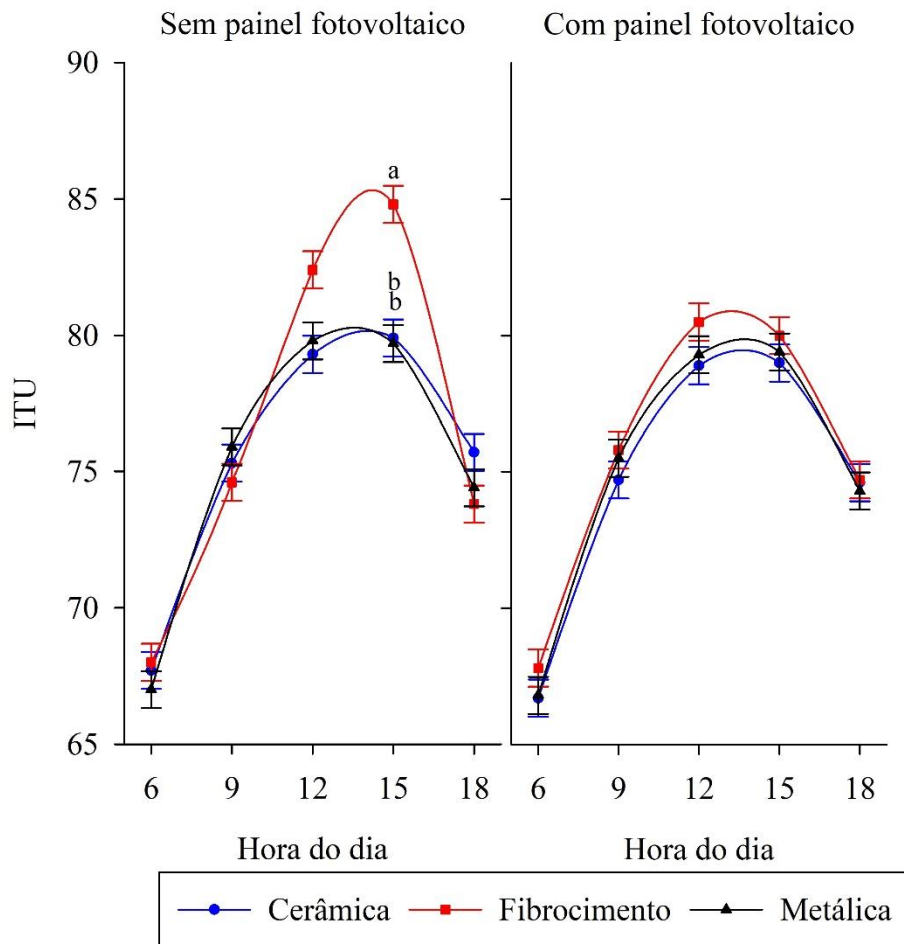
Fonte: Autor.

Pela análise de variância, verificou-se que houve diferenças significativas dos valores de ITU nos protótipos de telha de fibrocimento, comparando a ausência e a presença do painel fotovoltaico (Figura 6). Os maiores valores de ITU foram encontrados nos protótipos com cobertura em fibrocimento, onde às 15:00 horas calculou-se $84,8 \pm 0,7$ que diferiu significativamente ($p\text{-valor} < 0,001$) da telha de fibrocimento com painel fotovoltaico, com ITU de $80 \pm 0,7$, sendo a diferença nesse horário cerca de 4,8. Nos protótipos com coberturas de cerâmica e metálica não houve diferenças significativas entre a ausência e a presença de painel fotovoltaico. No entanto, Bilčík, Božíková e Čimo (2021) observou uma redução de 2,8 no valor do ITU entre telhas metálicas e telha metálica associada a painel fotovoltaico em protótipos com fechamento em MDF. Confrontando os resultados, a constatação contrária no presente estudo provavelmente deveu-se a ocorrência da ventilação natural nos protótipos que

favoreceu a renovação do ar e tornou o ambiente interno dos protótipos mais vulnerável às mesmas condições externas.

Como houve interação entre os valores de ITU nos protótipos com e sem painel fotovoltaico o desdobramento dessa interação é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Comportamento do índice de temperatura e umidade (ITU) e desdobramento da interação entre os três tipos de telha analisadas dentro das horas, com e sem painel fotovoltaico. As letras diferentes são estatisticamente diferentes, com a ausência de letra não houve diferenças significativas



Fonte: Autor.

Observa-se pela Figura 7, que nos protótipos com a ausência do painel fotovoltaico o valor calculado de ITU para o protótipo com telha de fibrocimento às 15:00 horas diferiu estatisticamente dos protótipos com telhas de cerâmica e metálica (p -valor <0,001). A aplicação do painel fotovoltaico foi eficiente para reduzir o ITU no protótipo com cobertura de fibrocimento pois os valores observados nos protótipos com a presença do painel fotovoltaico foram os mesmos para os três tipos de telhas analisados.

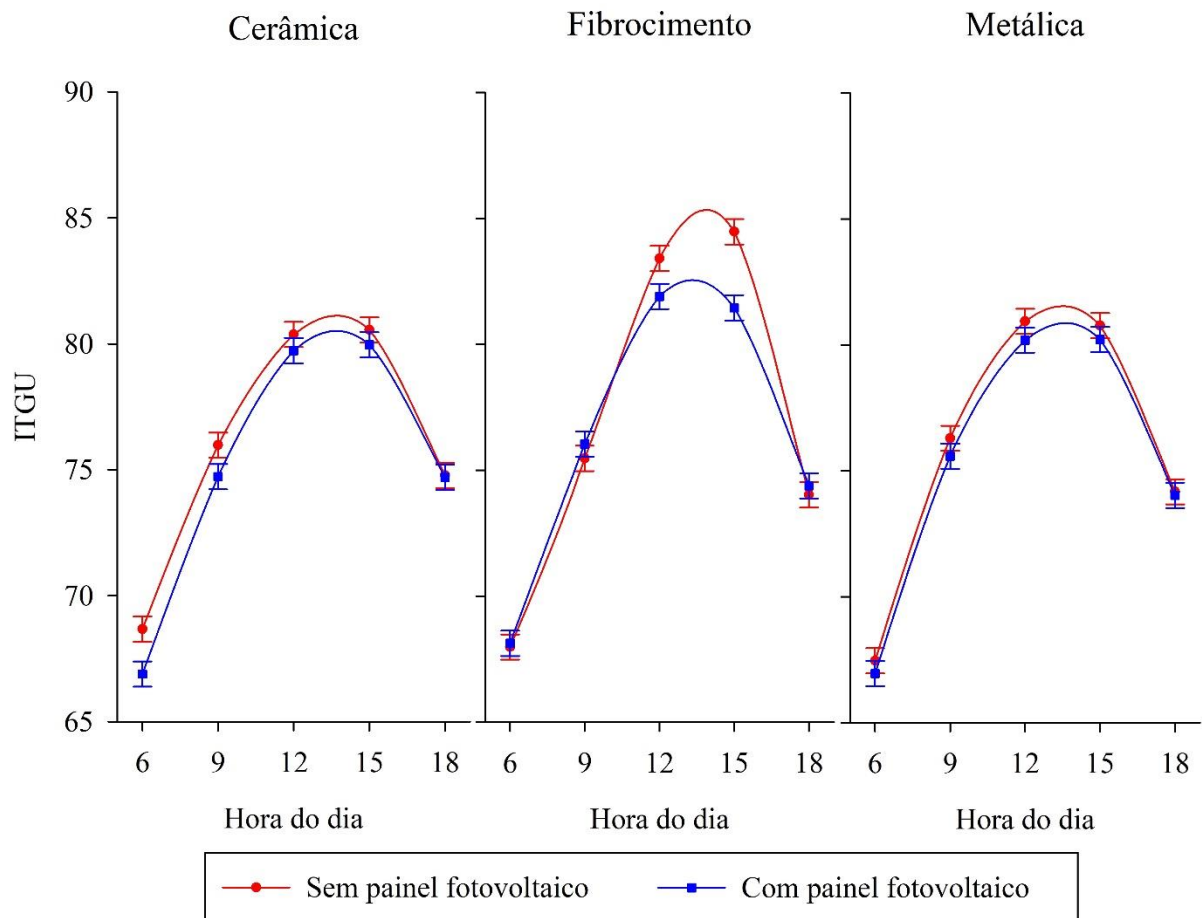
As faixas de conforto térmico de ITU para frangos de corte são de 72,4 a 80 na primeira semana, 68,4 a 76 na segunda semana, 64,5 a 72 na terceira semana e para fase adulta de 60,5 a 68 (SILVA et al., 2004). Dessa forma, dentre os tratamentos analisados, nos protótipos com cobertura de fibrocimento foram observados valores de ITU que representam condição de estresse por calor, para a primeira semana de vida de frangos de corte. Já para a fase adulta, em todos os protótipos, nas horas mais quentes do dia, foram observados valores de ITU que caracterizam condição de estresse por calor.

2.3.2.2 Índice de temperatura de globo negro e umidade (ITGU)

Pela análise de variância, os valores de ITGU foram significativamente menores nos protótipos com aplicação do painel fotovoltaico, apresentando comportamentos semelhantes independentemente do tipo de telha e do horário. Assim os valores das médias marginais confundidas entre tipo de telha e horários, foram $76,4 \pm 0,3$ para a ausência de painel fotovoltaico e $75,7 \pm 0,3$ para a presença do painel fotovoltaico, com uma redução no valor do ITGU de cerca de 0,7 (*p*-valor = 0,001). Os valores de ITGU apresentaram interação entre tipo de telha e hora (*p*-valor <0,001). Sendo os valores calculados de ITGU nos protótipos com telha de fibrocimento nos horários de 12:00 e 15:00 horas, significativamente maiores em relação aos protótipos com telha metálica e cerâmica nos mesmos horários.

O comportamento dos valores de ITGU para os três tipos de telhas analisadas (cerâmica, fibrocimento e metálica) com e sem painel fotovoltaico são apresentados na Figura 8.

Figura 8 - Comportamento do índice de temperatura de globo negro e úmida (ITGU) para os três tipos de telha, com a presença e ausência do painel fotovoltaico para as telhas de cerâmica, fibrocimento e metálica



Fonte: Autor.

Para o protótipo com telhado de cerâmica os valores calculados de ITGU foram 80,3 e 80,5 às 12:00 e às 15:00 horas. Nos protótipos com associação da telha cerâmica com painel fotovoltaico os valores calculados de ITGU foram 79,7 às 12:00 horas e 79,9 às 15:00 horas. Assim, observa-se redução cerca de 0,6 no ITGU para ambos os horários.

Os maiores valores calculados de ITGU (Figura 8) foram observados no protótipo com cobertura de fibrocimento, sendo 83,4 às 12:00 horas e 84,4 às 15:00 horas. Na associação da telha de fibrocimento com o painel fotovoltaico, os valores calculados de ITGU nos protótipos foram 81,9 às 12:00 horas e 81,4 às 15:00 horas. Assim, as diferenças observadas entre a ausência e a presença do painel fotovoltaico nos protótipos com cobertura de fibrocimento foram cerca de 1,5 às 12:00 horas e cerca de 3,0 às 15:00 horas.

Nos protótipos com cobertura metálica os valores calculados de ITGU foram 80,9 às 12:00 horas e 80,7 às 15 horas, quando associado ao painel fotovoltaico esses valores foram

80,1 e 80,2, respectivamente. Nos protótipos com esse tipo de telha a aplicação do painel fotovoltaico resultou em uma redução cerca de 0,75 às 12:00 horas e cerca de 0,60 às 15 horas.

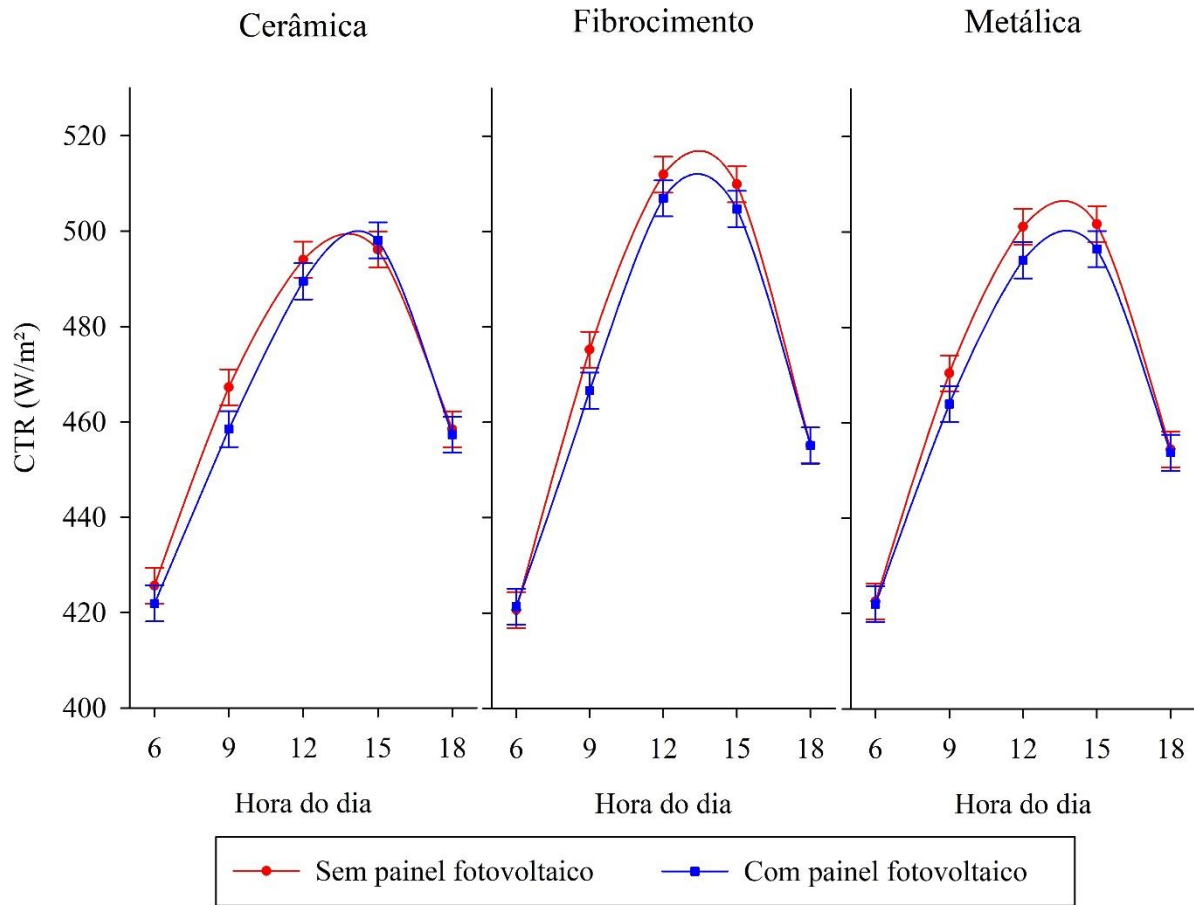
Esses elevados valores de ITGU verificados nas horas mais quentes do dia (Figura 8), indicam que o ambiente térmico de todos os protótipos analisados apresentou valores acima do limite tolerável para frangos de corte, com faixa ideal de 69 a 77 (MEDEIROS et al., 2005; OLIVEIRA et al., 2006; QUEIROZ et al., 2017). Elevados valores de ITGU, reduzem o consumo de ração e o ganho de peso em frangos de corte, causando prejuízos principalmente em partes nobres como o peito (OLIVEIRA et al., 2006).

2.3.2.3 Carga térmica de radiação (CTR)

Na análise de variância para a CTR, verificou-se que o comportamento dos valores foi semelhante para os três tipos de telha, na comparação entre a ausência e a presença do painel fotovoltaico, sendo a CTR significativamente menor nos protótipos equipados com painel fotovoltaico nas coberturas. Assim, os valores médios de CTR para a ausência e presença de painel fotovoltaico foram de $471 \pm 1,5$ e $467 \pm 1,5$ W/m² respectivamente, representando uma diferença de cerca de 4 W/m² (*p*-valor = 0,01). Isso se deve principalmente ao sombreamento promovido pelos materiais utilizados sobre as coberturas (BAÊTA; SOUZA, 2010; CARNEIRO et al., 2015; FURTADO; AZEVEDO; TINÔCO, 2003; SAMPAIO; CARDOSO; SOUZA, 2011). Foi verificado que houve interação entre os tipos de telha e o horário (*p*-valor = 0,006), sendo a telha de fibrocimento significativamente maior que a telha cerâmica às 12:00 horas, não diferindo da telha metálica.

O comportamento dos valores de CTR nos protótipos com os três tipos de telha, com e sem painel fotovoltaico, são apresentados na Figura 9.

Figura 9 - Comportamento da carga térmica de radiação (CTR) para os protótipos com os três tipos de telha (cerâmica, fibrocimento e metálica) com e sem o painel fotovoltaico



Fonte: Autor.

Nos protótipos com cobertura de cerâmica, os maiores valores de CTR foram observados nos horários mais quentes do dia, sendo de 494,00 W/m² às 12:00 horas e 496,11 W/m² às 15:00 horas, já na associação da telha cerâmica com o painel fotovoltaico esses valores foram de 489,49 W/m² e 498,04 W/m², para às 12:00 e 15:00 horas, respectivamente. Observa-se uma redução de cerca de 4,5 W/m² na aplicação do painel fotovoltaico. Nas coberturas de cerâmica, o ambiente do protótipo com painel fotovoltaico apresentou uma CTR ligeiramente maior que no convencional às 15:00 horas, isso pode ser explicado pela capacidade da telha de cerâmica de reter calor e liberá-lo lentamente no ambiente (SAMPAIO; CARDOSO; SOUZA, 2011).

Os maiores valores de CTR foram observados na cobertura de fibrocimento com ausência do painel fotovoltaico nas horas mais quentes do dia, sendo 511,94 W/m² às 12:00 horas e 509,90 W/m² às 15:00 horas. Na associação da telha de fibrocimento com o painel fotovoltaico esses valores foram 506,96 W/m² e 504,74 W/m², respectivamente. Foi

observada uma diferença de cerca de $5,0 \text{ W/m}^2$ às 12:00 horas e cerca de $5,2 \text{ W/m}^2$ às 15 horas.

Para a cobertura com telhas metálicas, a CTR foi de $501,12 \text{ W/m}^2$ às 12:00 horas e $501,67 \text{ W/m}^2$ às 15:00 horas, enquanto na cobertura metálica com painel fotovoltaico foi de $494,11 \text{ W/m}^2$ e $496,45 \text{ W/m}^2$, respectivamente. Sendo as diferenças de cerca de $7,0 \text{ W/m}^2$ às 12:00 horas e cerca de $5,2 \text{ W/m}^2$ às 15:00 horas.

De modo geral, foi observado nos dados apresentados que a aplicação de painel fotovoltaico à cobertura dos protótipos confere uma redução da temperatura do ar, do ITGU e CTR para os três tipos de telhas testados e uma redução significativa do ITU para protótipos com telhas de fibrocimento. Essa redução, se deve provavelmente à diminuição do fluxo de calor da parte superior para a parte inferior da cobertura, o que resultou em menor quantidade de radiação térmica no interior dos protótipos.

Contudo, a aplicação do painel fotovoltaico nas coberturas não foi suficiente para manter o ambiente térmico interno dentro das faixas de conforto. Mas, o uso de painéis contribuiu para a redução de forma considerável da quantidade de calor nos ambientes. Isso pode representar uma menor massa de calor a ser removida das instalações, o que pode gerar uma redução no consumo de energia pelos sistemas de ventilação em condições reais. Neste sentido, em edifícios com a aplicação de painel fotovoltaico, observou-se uma redução significativa nas cargas de resfriamento necessárias, para manter o ambiente em conforto térmico, com ganho líquido anual de cerca de 3 a 4 % (KAPSALIS; KARAMANIS, 2015).

Considerando os aviários do Brasil, que demandam ventilação durante a maior parte do tempo, uma redução da quantidade de calor no ambiente pode gerar economia na produção, além de os sistemas fotovoltaicos oferecerem autonomia energética aos produtores de frangos de corte.

2.4 CONCLUSÃO

A aplicação de painel fotovoltaico sobre a cobertura de protótipos de aviários, com sistema de ventilação natural, foi capaz de reduzir a temperatura do ar em cerca de $0,4 \text{ }^\circ\text{C}$, o ITGU em cerca de 0,7 e a CTR em cerca de 4 W/m^2 , independentemente do tipo de telha utilizado.

Nos protótipos com telhas de fibrocimento, a aplicação de painéis fotovoltaicos, foi capaz de reduzir o ITU em cerca de 4,8 em relação aos protótipos sem o painel fotovoltaico.

Embora a presença do painel fotovoltaico sobre as coberturas não tenha se mostrado suficiente para promover o conforto térmico no interior dos protótipos, para frangos de corte na quarta semana de vida, nas horas mais quentes do dia, a utilização dos mesmos melhorou significativamente os índices do ambiente térmico.

2.5 REFERÊNCIAS

ABREU, V. M. N.; ABREU, P. G. Os desafios da ambiência sobre os sistemas de aves no Brasil. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, p. 1–14, 2011.

ABUSEIF, M.; GOU, Z. A Review of Roofing Methods: Construction Features, Heat Reduction, Payback Period and Climatic Responsiveness. **Energies**, v. 11, n. 11, p. 3196, 18 nov. 2018.

AWAN, A. B. et al. Comparative Analysis of Ground-Mounted vs. Rooftop Photovoltaic Systems Optimized for Interrow Distance between Parallel Arrays. **Energies**, v. 13, n. 14, p. 3639, 15 jul. 2020.

BAÊTA, F.; SOUZA, C. **Ambiência em Edificações Rurais**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2010.

BILČÍK, M.; BOŽIKOVÁ, M.; ČIMO, J. Influence of Roof Installation of PV Modules on the Microclimate Conditions of Cattle Breeding Objects. **Applied Sciences**, v. 11, n. 5, p. 2140, 28 fev. 2021.

BONIFACIUS, N.; EKASIWI, S. N. N. Small scale experiment: Thermal Performance Comparison Between Fiber-Cement Roof and Photovoltaic Roof in Malang, Indonesia. **MAKARA Journal of Technology Series**, v. 16, n. 2, p. 99–102, 25 abr. 2013.

BUFFINGTON, D. E. et al. Black Globe-Humidity Index (BGHI) as Comfort Equation for Dairy Cows. **Transactions of the ASAE**, v. 24, n. 3, p. 0711–0714, 1981.

CARNEIRO, T. A. et al. Condicionamento térmico primário de instalações rurais por meio de diferentes tipos de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 11, p. 1086–1092, 1 nov. 2015.

CASSUCE, D. C. et al. Thermal comfort temperature update for broiler chickens up to 21 days of age. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 1, p. 28–36, jan. 2013.

DAMASCENO, F. A. et al. Evaluación térmica de tejas ecológicas en modelos físicos de galpones avícolas. **DYNA**, v. 83, n. 197, p. 114, 30 jun. 2016.

DOMINGUEZ, A.; KLEISSL, J.; LUVALL, J. C. Effects of solar photovoltaic panels on roof heat transfer. **Solar Energy**, v. 85, n. 9, p. 2244–2255, 1 set. 2011.

- FURTADO, D. A.; AZEVEDO, P. V. DE; TINÔCO, I. DE F. F. Análise do conforto térmico em galpões avícolas com diferentes sistemas de acondicionamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 559–564, dez. 2003.
- JENTZSCH, R. et al. Predição de parâmetros térmicos ambientais no interior de modelos físicos em escalas reduzidas de galpões avícolas. **Interciencia**, v. 36, n. 10, p. 738–742, 2011.
- KAPSALIS, V.; KARAMANIS, D. On the effect of roof added photovoltaics on building's energy demand. **Energy and Buildings**, v. 108, p. 195–204, 1 dez. 2015.
- KELLY, C. F.; BOND, T. E.; ITTNER, N. R. Thermal design of livestock shades. **Agricultural Engineering**, v. 31, n. 12, p. 601–6, 1950.
- MAIA, A. S. C. et al. Photovoltaic panels as shading resources for livestock. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, p. 120551, jun. 2020.
- MEDEIROS, C. M. et al. Efeitos da temperatura, umidade relativa e velocidade do ar em frangos de corte. **Engenharia na Agricultura**, v. 13, n. 4, p. 277–286, 2005.
- MURPHY, G. **Similitude in Engineering**. New York: The Ronald Press Company, 1950.
- OLIVEIRA, R. F. M. DE et al. Efeitos da temperatura e da umidade relativa sobre o desempenho e o rendimento de cortes nobres de frangos de corte de 1 a 49 dias de idade. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 35, n. 3, p. 797–803, jun. 2006.
- ONU. **Adoção do acordo paris Convenção Quadro sobre Mudança do Clima**, 2015.
- PINHEIRO, J. C.; BATES, D. M. **Mixed-Effects Models in S and S-PLUS**. 1. ed. New York: Springer-Verlag, 2000.
- QUEIROZ, M. L. DE V. et al. Spatial variability in a broiler shed environment with fogging system. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 4, 2017.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. 4.0.4 "Los ed. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2021.
- SAMPAIO, C. A. DE P.; CARDOSO, C. O.; SOUZA, G. P. DE. Temperaturas superficiais de telhas e sua relação com o ambiente térmico. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 2, p. 230–236, abr. 2011.
- SANTOS, Í. P. DOS; RÜTHER, R. The potential of building-integrated (BIPV) and building-applied photovoltaics (BAPV) in single-family, urban residences at low latitudes in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 50, p. 290–297, 1 jul. 2012.
- SANTOS, P. A. et al. Ambiente térmico no interior de modelos de galpões avícolas em escala reduzida com ventilação natural e artificial dos telhados. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 575–584, dez. 2005.

SANTOS, R. C. et al. Análise de coberturas com telhas de barro e alumínio, utilizadas em instalações animais para duas distintas alturas de pé-direito. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 1, p. 142–146, abr. 2002.

SEVEGNANI, K. B.; GHELFI FILHO, H.; SILVA, I. J. O. DA. Comparação de vários materiais de cobertura através de índices de conforto térmico. **Scientia Agrícola**, v. 51, n. 1, p. 1–7, abr. 1994.

SILVA, E. T. DA et al. Determinação do Índice de Temperatura e Umidade (ITU) para produção de aves na mesorregião metropolitana de Curitiba – PR. **Revista Acadêmica: Ciência Animal**, v. 2, n. 3, p. 47, 15 jul. 2004.

THOM, E. C. The discomfort index. **Weatherwise**, v. 12, n. 2, p. 57–61, 1959.

TINÔCO, I. Avicultura Industrial: Novos Conceitos de Materiais, Concepções e Técnicas Construtivas Disponíveis para Galpões Avícolas Brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência Avícola**, v. 3, n. 1, p. 01–26, jan. 2001.

XING, W.; ZHOU, J.; FENG, Z. Effects of mounting geometries on photovoltaic module performance using CFD and single-diode model. **Solar Energy**, v. 103, p. 541–549, 1 maio 2014.

CONCLUSÕES GERAIS

A aplicação do painel fotovoltaico na cobertura de instalações de produção animal é uma realidade que tende a aumentar, devido à imperativa necessidade de autonomia energética e sustentabilidade na produção animal. Aliado a isso, observa-se que a aplicação do painel fotovoltaico apresenta uma vantagem indireta a ambiência das instalações, ao reduzir o fluxo de calor do telhado.

Ao projetar instalações de produção animal com utilização de painel fotovoltaico na cobertura, é de grande importância considerar o tipo de telha a ser utilizado, a forma correta de instalação, a fim de maximizar a geração de energia, e o impacto gerado no ambiente térmico do interior da instalação. Características como a inclinação e orientação do módulo afetam a quantidade de radiação interceptada, enquanto a distância entre o painel e o telhado interferem na temperatura de operação do painel e nas trocas de calor.

A aplicação do painel fotovoltaico na cobertura dos protótipos de aviários em escala reduzida com diferentes tipos de telhas, demonstrou uma redução nos valores de temperatura do ar e nos índices do ambiente térmico. Assim, foi observado uma redução de 0,4 °C na temperatura do ar nos protótipos com aplicação do painel fotovoltaico, independentemente do tipo de telha utilizado. De modo semelhante, o índice de temperatura de globo e umidade (ITGU) e a carga térmica de radiação (CTR) tiveram o mesmo comportamento, apresentando uma redução no ITGU de 0,7 e na CTR de 4 W/m² nos protótipos com painel fotovoltaico independentemente do tipo de telha utilizado. No índice de temperatura e umidade (ITU) não foram observadas diferenças significativas entre os protótipos com e sem painel fotovoltaico para as telhas de cerâmica e metálica. No entanto, foi observado uma redução de 4,8, no ITU, nos protótipos de telha de fibrocimento com painel fotovoltaico.

Contudo, apesar da aplicação dos painéis fotovoltaicos na cobertura dos protótipos ter reduzido de forma considerável os índices do ambiente térmico, foi observado que a presença do painel fotovoltaico não foi suficiente para manter o ambiente dos protótipos de aviários nas faixas de conforto animal. Dada a maior vulnerabilidade do ambiente interno à condição externa pela utilização do sistema de condicionamento térmico natural.

Portanto, ainda são necessários estudos e pesquisas considerando os efeitos dos painéis fotovoltaicos em outras tipologias construtivas comumente utilizadas nos países de clima quente, como as instalações híbridas, que podem funcionar abertas e/ou fechadas com sistemas de condicionamento térmico artificial com auxílio de ventiladores ou exaustores. E, por isso, essas instalações demandam maior quantidade de energia para manter o ambiente em

condição de conforto térmico para os animais, tornando a utilização dos painéis fotovoltaicos essenciais para garantir autonomia energética e sustentabilidade da produção animal.