

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

GIOVANI DE LIMA PELLIN

**CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM SECADOR SOLAR
DIRETO DE TIPO ATIVO PARA A SECAGEM DE TOMATES**

ARARANGUÁ

2022

GIOVANI DE LIMA PELLIN

**CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM SECADOR SOLAR
DIRETO DE TIPO ATIVO PARA A SECAGEM DE TOMATES**

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

Orientador: Prof. Dr. Thiago Dutra

ARARANGUÁ

2022

Giovani de Lima Pellin

**CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM SECADOR SOLAR
DIRETO DE TIPO ATIVO PARA A SECAGEM DE TOMATES**

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

Thiago Dutra, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Giuliano Arns Rampinelli, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Jim Lau, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

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

Prof. Luciano Pfitscher, Dr.
Coordenador do Curso

Prof. Thiago Dutra, Dr.
Orientador

Giovani de Lima Pellin
Autor

Araranguá, 24 de março de 2022.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Santa Catarina, essencial no meu processo de formação profissional, pela dedicação, e por tudo o que aprendi ao longo dos anos do curso.

Aos meus pais, Dulce e Luís Carlos, que me incentivaram a seguir meus sonhos e por nunca terem medido esforços para me proporcionar um ensino de qualidade durante toda a minha vida.

Aos meus irmãos, Mariana e Vinícius, que sempre me apoiaram e foram grandes exemplos em minha vida.

À Ágata, minha namorada, por ser uma pessoa incrível, por estar sempre ao meu lado em cada nova experiência pessoal e profissional e por ter me ajudado a superar inúmeros desafios ao longo de todos esses anos.

Ao meu cachorro Teddy, que esteve ao meu lado em todos os momentos da minha vida.

À minha sogra, Mônica, pois sem ela teria perdido minha vaga na universidade.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Thiago Dutra, por ter me guiado ao longo do percurso com sabedoria e paciência.

Aos meus amigos, Pietra, André, Mateus, Rubia e Lucas por terem compartilhado comigo alguns dos melhores momentos de minha vida e por terem aliviado o peso dos estudos ao longo desses anos.

Também agradeço ao meu amigo Felipe, que mesmo longe sempre esteve presente sendo um ótimo amigo.

A todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado.

RESUMO

Diversas fontes de energia podem ser utilizadas para o processo de secagem de alimentos, entre elas está a energia solar, que é limpa, renovável, abundante e tem a capacidade de produzir alimentos secos de ótima qualidade. O presente trabalho consistiu na construção e na avaliação do desempenho de um secador solar direto do tipo ativo, mediante o uso de dois níveis de ventilação forçada para a secagem de tomates (*Solanum Lycopersicum*): no primeiro nível, o fluxo de ar é promovido por três ventiladores iguais, e no segundo nível, utiliza-se apenas um dos ventiladores. Depois de construído o secador, desenvolveu-se um sistema de baixo custo para medição de algumas grandezas e aquisição de sinais, utilizando microprocessadores ESP32 e Wemos D1R2, sensores de temperatura, umidade relativa e luminosidade, e scripts de programação em linguagem C++. Observou-se que a temperatura na saída do secador solar apresentou picos de $51\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ quando se usa três ventiladores, e $54\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ quando se usa apenas um ventilador. Além disso, realizou-se o estudo das eficiências térmicas e de secagem do secador solar. Quando três ventiladores estão acionados, os valores médios de eficiência térmica e de secagem são $53,1\% \pm 14,2\%$ e $42,5\% \pm 10,5\%$, respectivamente. Por outro lado, quando apenas um ventilador é acionado, verificou-se valores médios de $26,1\% \pm 15,2\%$ para eficiência térmica e $38,4\% \pm 4,8\%$ para eficiência de secagem. Dessa forma, concluiu-se que a intensificação do nível de ventilação conferiu uma melhoria da eficiência térmica do secador, mas não afetou substancialmente sua eficiência de secagem.

Palavras-chave: Energia solar. Secador solar. ESP32. Eficiência térmica. Eficiência de secagem.

ABSTRACT

Several energy sources can be used for the process of drying food, among them is solar energy, which is pure, renewable, abundant and has the ability to produce dry foods of great quality. In the present work, an active type direct solar dryer was analyzed at two different convection levels for drying tomatoes (*Solanum Lycopersicum*), the first level with three fans and the second using a single fan. In order to collect the necessary data, a low-cost system was developed using ESP32 and Wemos D1 R2 microprocessors together with temperature, relative humidity and luminosity sensors, programmed in C++ language. The analysis of the solar dryer outlet temperature data was performed, obtaining temperature peaks of $51\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ for the first convection level and $54\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ for the second. In addition, the study of the thermal and drying efficiencies of the solar dryer was carried out, for the first convection level, average values of $53.1\% \pm 14.2\%$ and $42.5\% \pm 10.5\%$ were reached, respectively. As for the second level, the average values of $26.1\% \pm 15.2\%$ for thermal efficiency and $38.4\% \pm 4.8\%$ for drying efficiency were obtained. It was possible to perceive that the solar dryer using three fans reached higher thermal efficiency values than the second configuration. While for the drying efficiency, both convection levels presented similar averages.

Key Words: Solar energy. Solar dryer. ESP32. Thermal efficiency. Drying efficiency.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL.....	16
FIGURA 2 - SECADORES SOLARES (ADAPTADO).....	19
FIGURA 3 - ESP32	24
FIGURA 4 - PINOS ESP32	25
FIGURA 5 - PINOS WEMOS D1R2	27
FIGURA 6 - SENSOR BME280.....	28
FIGURA 7 - PROTOCOLO I2C.....	28
FIGURA 8 - CONEXÃO BME280	29
FIGURA 9 - MÓDULO LDR.....	30
FIGURA 10 - EXEMPLO DE INTERFACE GRÁFICA NO BLYNK APP	31
FIGURA 11 - EXEMPLO DE INTERFACE GRÁFICA NO THINGSPEAK	32
FIGURA 12 - ESQUEMA DO SECADOR SOLAR.....	33
FIGURA 13 - VISTA LATERAL DO SECADOR EM FUNCIONAMENTO	33
FIGURA 14 - INTERIOR DA CÂMARA DE SECAGEM.....	34
FIGURA 15 - VISTA INTERNA DO SECADOR EM FUNCIONAMENTO COM UMA PRATELEIRA	35
FIGURA 16 - TOMATES CORTADOS DE FORMA SEMICIRCULAR.....	36
FIGURA 17 - CONEXÃO DE DOIS SENSORES BME280 AO ESP32.....	37
FIGURA 18 - DIAGRAMA DE BLOCOS BME280.....	38
FIGURA 19 - CONEXÃO DO MÓDULO LDR À PLACA WEMOS D1R2	39
FIGURA 20 - DIAGRAMA DE BLOCOS MÓDULO LDR.....	39
FIGURA 21 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO ANEMÔMETRO DIGITAL GM816	40
FIGURA 22 - BALANÇO ENERGÉTICO NO SECADOR SOLAR	41
FIGURA 23 - TEMPERATURAS DE ENTRADA E SAÍDA DO AR DE SECAGEM E RADIAÇÃO INCIDENTE NO DIA 11/JUL.....	47
FIGURA 24 - TEMPERATURAS DE ENTRADA E SAÍDA DO AR DE SECAGEM E RADIAÇÃO INCIDENTE NO DIA 16/JUL.....	48
FIGURA 25 - TEMPERATURAS DE ENTRADA E SAÍDA DO AR DE SECAGEM E RADIAÇÃO INCIDENTE NO DIA 19/JUL.....	48
FIGURA 26 - TEMPERATURAS DE ENTRADA E SAÍDA DO AR DE SECAGEM E RADIAÇÃO INCIDENTE NO DIA 22/JUL.....	49
FIGURA 27 - TEMPERATURAS DE ENTRADA E SAÍDA DO AR DE SECAGEM E RADIAÇÃO INCIDENTE NO DIA 24/JUL.....	49

FIGURA 28 - TEMPERATURAS DE ENTRADA E SAÍDA DO AR DE SECAGEM E RADIAÇÃO INCIDENTE NO DIA 18/JUL.....	50
FIGURA 29 - TEMPERATURAS DE ENTRADA E SAÍDA DO AR DE SECAGEM E RADIAÇÃO INCIDENTE NO DIA 20/JUL.....	51
FIGURA 30 - TEMPERATURAS DE ENTRADA E SAÍDA DO AR DE SECAGEM E RADIAÇÃO INCIDENTE NO DIA 21/JUL.....	51
FIGURA 31 - TEMPERATURAS DE ENTRADA E SAÍDA DO AR DE SECAGEM E RADIAÇÃO INCIDENTE NO DIA 23/JUL.....	52
FIGURA 32 - TEMPERATURAS DE ENTRADA E SAÍDA DO AR DE SECAGEM E RADIAÇÃO INCIDENTE NO DIA 25/JUL.....	52
FIGURA 33 - COMPARAÇÃO ENTRE OS DIAS 24/JUL, TRÊS VENTILADORES, E 25/JUL, UM VENTILADOR	53
FIGURA 34 - COMPARAÇÃO ENTRE DOIS DIFERENTES NÍVEIS DE CONVECÇÃO	55
FIGURA 35 - EFICIÊNCIA TÉRMICA DO SECADOR SOLAR COM TRÊS VENTILADORES	55
FIGURA 36 - EFICIÊNCIA TÉRMICA DO SECADOR SOLAR COM UM VENTILADOR	56
FIGURA 37 - COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA MÉDIA PARA AS DUAS CONFIGURAÇÕES	57
FIGURA 38 - MÉDIAS DE EFICIÊNCIA DE SECAGEM E RADIAÇÃO SOLAR PARA O SISTEMA COM TRÊS VENTILADORES	58
FIGURA 39 - MÉDIAS DE EFICIÊNCIA DE SECAGEM E RADIAÇÃO SOLAR PARA O SISTEMA COM UM VENTILADOR	58
FIGURA 40 - MÉDIAS DE EFICIÊNCIA DE SECAGEM E UMIDADE RELATIVA DE ENTRADA E SAÍDA PARA O SISTEMA COM TRÊS VENTILADORES	60
FIGURA 41 - MÉDIAS DE EFICIÊNCIA DE SECAGEM E UMIDADE RELATIVA DE ENTRADA E SAÍDA PARA O SISTEMA COM UM VENTILADOR	60
FIGURA 42 - AS QUANTIDADES DE MASSA DO SISTEMA E A EFICIÊNCIA DE SECAGEM PARA TRÊS VENTILADORES	61
FIGURA 43 - AS QUANTIDADES DE MASSA DO SISTEMA E A EFICIÊNCIA DE SECAGEM PARA UM ÚNICO VENTILADOR	61
FIGURA 44 - VISTA SUPERIOR DO SECADOR EM FUNCIONAMENTO.....	79
FIGURA 45 - TOMATES ENQUANTO O SECADOR SOLAR ESTÁ EM FUNCIONAMENTO	79
FIGURA 46 - TOMATES SECOS APÓS O PROCESSO DE SECAGEM.....	80

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - DADOS DO PROCESSO DE SECAGEM (ADAPTADO)	21
TABELA 2 - RADIAÇÃO SOLAR MÉDIA DIÁRIA MENSAL, EM KWH/(M ² .DIA), PARA A CIDADE DE ARARANGUÁ.....	23
TABELA 3 - COMPARATIVO ENTRE ESP8266 E ESP32 (ADAPTADO)	26
TABELA 4 - DATAS DOS EXPERIMENTOS DE SECAGEM REALIZADOS ENTRE ÀS 9H E 17H.....	35
TABELA 5 - PORTAS UTILIZADAS PELOS DOIS SENSORES BME280	37
TABELA 6 - PORTAS UTILIZADAS PELO MODULO LDR.....	39
TABELA 7 - INCERTEZAS DE MEDIÇÃO.....	43
TABELA 8 - RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE PARA OS DIAS COM TRÊS VENTILADORES.....	45
TABELA 9 - RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE PARA OS DIAS COM UM VENTILADOR	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	SECAGEM.....	14
2.2	VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO PROCESSO DE SECAGEM SOLAR	15
2.3	SECADORES SOLARES	18
2.3.1	Tipos de secadores solares	18
2.4	SECAGEM DE PRODUTOS AGRÍCOLAS.....	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	LOCALIZAÇÃO.....	23
3.2	EQUIPAMENTOS E PROGRAMAS UTILIZADOS PARA COLETA DE DADOS DE TEMPERATURA, UMIDADE RELATIVA DO AR E RADIAÇÃO SOLAR	23
3.2.1	Microcontroladores	24
3.2.1.1	ESP32	24
3.2.1.2	ESP8266 e Wemos D1R2	25
3.2.2	BME280	27
3.2.3	Módulo LDR	29
3.2.4	Blynk e Thingspeak	31
3.3	DESCRIÇÃO DO SECADOR SOLAR	32
3.4	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	35
3.4.1	Aquisição e tratamento de dados	36
3.5	DETERMINAÇÃO DAS EFICIÊNCIAS DO SECADOR SOLAR.....	41
3.5.1	Eficiência Térmica	41
3.5.2	Eficiência de secagem	42
3.6	INCERTEZAS DE MEDIÇÃO	42
3.7	TESTE MODIFICADO DE THOMPSON PARA REMOÇÃO DE DADOS ATÍPICOS.....	44
4	RESULTADOS	45
4.1	RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE.....	45
4.2	TEMPERATURAS NO SECADOR SOLAR	46
4.3	ANÁLISE ENERGÉTICA DO SECADOR	55
4.3.1	Eficiência térmica	55

4.3.2	Eficiência de Secagem	57
4.4	MASSAS E QUANTIDADE DE ÁGUA REMOVIDA DOS TOMATES	60
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	65
	REFERÊNCIAS.....	66
	APÊNDICE A - CÓDIGO ESP32	72
	APÊNDICE B - CÓDIGO WEMOS D1 R2	75
	APÊNDICE C - SECADOR SOLAR EM FUNCIONAMENTO.....	79

1 INTRODUÇÃO

A exposição de alimentos à radiação solar é uma das formas mais antigas de se realizar o processo de secagem através da energia do sol. Desde o início da espécie humana, no qual o Sol era a principal fonte de energia térmica disponível, até o seu momento mais recente com a agricultura familiar, as pessoas utilizam a radiação solar para secar e preservar alimentos contra o tempo (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011).

Secadores solares podem usar a radiação solar para aquecer o produto de forma direta ou indireta e o ar de secagem pode escoar através de convecção forçada ou natural (CHAVAN et al., 2020). Cabe salientar que aquecer o alimento de forma direta significa que a radiação solar incide sobre o alimento sem desvios, aumentando sua temperatura. Por outro lado, aquecer de forma indireta indica que o ar é aquecido antes de entrar em contato com o produto, dessa forma a radiação solar não é diretamente responsável por aquecer o produto. A circulação de ar na câmara de secagem desempenha um papel importante na remoção da umidade superficial do produto, quando a secagem é limitada a mecanismos de convecção. No entanto, se o alimento tiver alta resistência interna à transferência de umidade, a circulação do ar não será efetiva, pois nesse caso a secagem ocorrerá por mecanismos de difusão (EKKA et al., 2020; INYANG; OBOH; ETUK, 2018).

A secagem de alimentos utilizando a energia solar apresenta algumas consequências para quem a utiliza diretamente e para o nosso planeta. Essas consequências giram em torno de impactos sociais e impactos ambientais.

O alimento seco possui, geralmente, um valor de mercado maior que o alimento *in natura* e pode ser armazenado por longos períodos de tempo, uma vez que o menor teor de umidade evita a proliferação de seres vivos microscópicos (ARAÚJO et al., 2020). A energia solar é limpa e renovável, portanto, um secador de alimentos à base de energia solar não emite gases poluentes durante o processo e por ser uma fonte de energia gratuita, o secador solar também apresenta um baixo custo de secagem de alimentos (TABORDA, 2017). Essas características são bem diferentes dos fornos convencionais, que geralmente utilizam gás, lenha e outros combustíveis fósseis para o aquecimento do ar de secagem. Na prática, fornos convencionais emitem gases nocivos ao meio ambiente durante seu funcionamento e geram gastos com

combustível. Além disso, possuem diversos mecanismos para produzir calor e, conseqüentemente, geram despesas com os custos de manutenção (SILVEIRA, 2016). Portanto, o desidratador solar é uma máquina com um ótimo custo-benefício por utilizar uma fonte de energia gratuita, por possuir poucos gastos com manutenção, comparando a fornos convencionais, e por ser uma tecnologia simples, facilmente implementada (TABORDA, 2017).

Analisar o desempenho do secador solar é indispensável para entender seu funcionamento e permite descobrir se a máquina está cumprindo seus objetivos de forma satisfatória. Com o objetivo de realizar essa análise, alguns parâmetros podem ser avaliados, como a eficiência térmica e a eficiência de secagem. A eficiência térmica determina o desempenho do secador em transferir energia ao fluido de trabalho, ou seja, ao ar de secagem. Enquanto que a eficiência de secagem determina a qualidade do processo de secagem, considerando a massa de água evaporada do produto.

Frente ao exposto, essa pesquisa tem como objetivo o desenvolvimento de um secador solar direto de baixo custo e avaliar sua atuação na secagem de tomates (*Solanum Lycopersicum*), visando à utilização em pequena escala, através de um sistema de coleta de dados de baixo custo. Para tal, seus objetivos específicos foram os seguintes: (i) Desenvolver de um secador solar direto com convecção forçada para a realização dos testes, (ii) monitorar variáveis importantes no processo de secagem, tais como a umidade relativa e temperatura do ar de secagem e radiação solar incidente e (iii) avaliar o desempenho do secador solar quando conduzido em dois níveis diferentes de ventilação forçada.

O presente trabalho está organizado conforme descrito a seguir: no segundo capítulo foram apresentados conceitos e fundamentos importantes para a secagem de alimentos utilizando energia solar, assim como a descrição dos principais modelos de secadores solares existentes. No terceiro capítulo, demonstra-se o funcionamento geral de cada um dos componentes eletrônicos utilizados no sistema de aquisição de dados. Também é exposto como o secador solar direto foi desenvolvido, como os testes foram realizados, as equações empregadas para avaliar o desempenho do secador solar e o procedimento de análise de incertezas de medição. No quarto capítulo, retrata-se os dados obtidos pelo sistema de aquisição, os resultados e a discussão de seus significados. No quinto capítulo são apresentadas as considerações finais do trabalho, assim como uma síntese dos principais resultados.

Por fim, no sexto capítulo são apresentados possíveis trabalhos futuros que dariam continuidade para a pesquisa realizada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SECAGEM

O processo de secagem de um alimento consiste na remoção de qualquer substância volátil presente no mesmo, geralmente água, através de um processo térmico para obter um produto sólido com menor teor de umidade que o inicial. De acordo com Chen (2008) e Mujumdar (2006), essa operação unitária tem o objetivo de converter uma matéria-prima sólida ou líquida, através de uma aplicação de calor para evaporação do líquido, em um produto sólido seco. Normalmente, esse método é empregado para que um produto atinja um nível ideal de umidade favorável para o armazenamento e preservação dos alimentos por um longo período de tempo, visto que o baixo teor de umidade dificulta a proliferação de bactérias, fungos, leveduras e ações de enzimas. (MARTINAZZO et al., 2016; THAM et al, 2017).

Para que a remoção da umidade ocorra dentro de um processo de secagem é necessário que exista, simultaneamente, a transferência de calor e massa (INYANG; OBOH; ETUK, 2018). Mecanismos de radiação, condução ou convecção, ou a combinação desses efeitos, são necessários para que ocorra a transferência de calor a partir de uma fonte térmica (UDOMKUN et al., 2020). Diversas formas de energia podem ser utilizadas como fonte térmica, como combustíveis fósseis, eletricidade e a energia solar.

Após a absorção de energia térmica pelo produto, a massa de água interna se desloca para a superfície e dela é transferida para o ar de secagem, sob forma de vapor. Ou seja, ao absorver a energia térmica, a temperatura do produto úmido aumenta até que atinja um valor suficiente para que a pressão de vapor d'água na parte interna exceda a pressão de vapor do ar externo, o que resulta no processo de vaporização da água do produto (HIDALGO, 2021). O processo de secagem pode ser limitado pela taxa de difusão de água no interior do produto e pela taxa de vaporização da superfície. Se a primeira for lenta, se tornará o fator limitante, mas se for mais rápida que a taxa de vaporização da superfície, a última se tornará o fator limitante (EKECHUKWU; NORTON, 1999).

De acordo com Hidalgo (2021), dois períodos podem descrever o processo de secagem, o período de taxa constante e o período de taxa decrescente. Durante o

primeiro, a secagem ocorre através da evaporação da umidade presente na camada mais externa do produto e sua forma física é afetada, principalmente superfície (HIDALGO, 2021). Nessa etapa, condições externas como umidade relativa, temperatura, direção e velocidade do escoamento de ar exercem grande influência na superfície do alimento (INYANG; OBOH; ETUK, 2018; KOUHILA et al., 2020). No decorrer desse período, a água compreendida na superfície do alimento irá evaporar até que se atinja um valor de umidade crítica, dependente da espessura do material e da taxa de secagem (BENNAMOUN; LI, 2018; McCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993). Já ao longo do período de taxa decrescente, a água presente dentro do produto é transportada para a superfície e sua remoção ocorre por meio do ar externo (HIDALGO, 2021). A difusão do líquido controla esse período como consequência da diferença de concentrações da água e das condições internas do material, como temperatura, estrutura e umidade (INYANG; OBOH; ETUK, 2018; McCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993). Devido à forte ligação entre a água e a estrutura do material, será no período de taxa decrescente que produtos como frutas e verduras irão secar (BOUGHALI et al., 2009). Por fim, temos que o processo de secagem somente irá terminar quando a umidade de equilíbrio for atingida (AKPINAR, 2010).

2.2 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO PROCESSO DE SECAGEM SOLAR

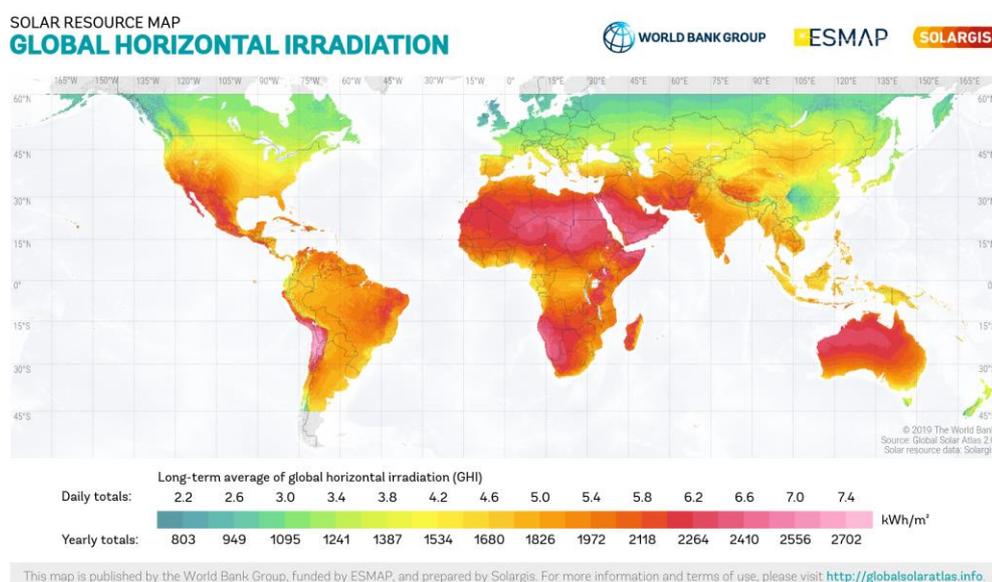
O processo de secagem solar ocorre através da exposição dos alimentos à radiação eletromagnética do Sol, a qual aquece o produto direta ou indiretamente. Nesse processo, a umidade é removida por meio da convecção natural ou forçada do ar, quando se utilizam componentes ativos, como ventiladores (CHAVAN et al., 2020; LINGAYAT et al., 2020). As condições climáticas do ambiente, intensidade da radiação solar e velocidade do ar de secagem são fatores que influenciam as duas formas de transferência de calor e massa (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011).

Além de ser uma das formas mais antigas de se realizar o processo de desidratação, a secagem solar tem, entre suas principais vantagens, o fato de ser um processo tecnologicamente simples, não poluente, que utiliza uma fonte de energia renovável, abundante e que não pode ser monopolizada (AKPINAR, 2010; TUNDE-AKINTUNDE, 2011). Ademais, através da secagem solar é possível obter produtos

com a qualidade desejada e com pouquíssimos impactos ambientais (BENNAMOUN; LI, 2018).

Para grande parte dos países em desenvolvimento, como o Brasil, foi somente nas últimas décadas que políticas energéticas sustentáveis começaram a surgir com o objetivo de desincentivar a utilização de combustíveis fósseis (AMERI et al., 2018). O programa nacional do álcool (Proálcool), criado em 1975, foi uma dessas políticas e contribuiu para impulsionar a produção de bioenergia no país (Alisson, 2016). A maior parte desses países estão situados próximos à linha do Equador em zonas climáticas em que a incidência da irradiação solar possui valores elevados. Esse fato pode ser verificado na Figura 1, que apresenta a irradiação solar horizontal global no ano de 2019.

Figura 1 - Irradiação global horizontal



Fonte: Global Solar Atlas, 2019.

O Brasil possui grande potencial para a utilização da energia solar, visto que apresenta valores de irradiação global horizontal na faixa de 3,5 a 6,5 kWh/(m².dia), valores bastante elevados e que variam menos ao longo do ano do que comparado a países europeus (Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017). Secadores que utilizam combustíveis fósseis apresentam elevados custos de funcionamento dos equipamentos e riscos para o meio ambiente, uma vez que liberam gases prejudiciais ao meio ambiente. Portanto, a substituição destes combustíveis convencionais nos processos de secagem pode representar uma redução considerável nos custos com

energia, além de reduzir a emissão de gases como o CO₂, um dos gases responsáveis pelo aquecimento global (REYES et al,2013).

É comum que pequenos agricultores utilizem a secagem a céu aberto para realizar o processo de secagem dos produtos, porém esse método possui limitações intrínsecas. Realizar o procedimento a céu aberto deixa a safra suscetível a toda forma de infestação e alterações climáticas, como o ataque de fungos e outros animais, chuvas e geadas (DJEBLI et al., 2020; SALLAM et al., 2013; TÉLLEZ et al., 2018). Por esse e outros motivos, a utilização de secadores solares, que realizam o processo de forma adequada e segura, tem se tornado cada vez mais popular no comércio de pequenos agricultores (EKECHUKWU; NORTON, 1999).

A utilização de um secador solar apresenta uma série de vantagens quando se comparado ao processo a céu aberto, como a redução da área necessária para a secagem, aumento da eficiência do processo e uma melhora significativa na qualidade e higiene final do produto seco (EL KHADRAOUI et al., 2019; SAMI; RAHIMI; ETESAMI, 2011). Ademais, caso exista um acompanhamento climático e otimização dos secadores, o tempo de secagem pode ser reduzido significativamente (NOURHÈNE; MOHAMMED; NABIL, 2008; ROMULI et al., 2019). Além disso, secadores solares podem ser empregados para uma alta gama de produtos alimentícios que podem ser armazenados e conservados por mais de uma colheita (BOUGHALI et al., 2009; ISLAM et al., 2019). A instalação de secadores solares representa um investimento inicial, no entanto, os agricultores relatam um rendimento maior pela produção de culturas comercializáveis e o investimento inicial é recuperado devido ao maior lucro (TIWARI, 2016).

Devido ao fato de a radiação solar ser uma forma de energia periódica e facilmente influenciada pelas eventuais mudanças climáticas, o interesse de se utilizar fontes auxiliares e armazenadores de energia é consideravelmente alto, principalmente nos períodos em que o secador solar não está em operação (MUTHUKUMAR, 2017; REYES; MAHN; VÁSQUEZ, 2014). Além disso, a radiação solar incidente na Terra possui baixa densidade, comparada a combustíveis fósseis, por conta disso a área do secador solar deve ser elevada. Isso pode configurar uma limitação durante o processo, porque o aumento da área pode ser tecnicamente/economicamente inviável para grandes volumes de produção (IMRE, 2006).

Enfim, a partir do que foi visto, é possível perceber que a utilização da radiação solar durante a secagem possui problemas inerentes que podem ser solucionados através do investimento nas soluções certas (HIDALGO, 2021). Também é importante controlar o processo de secagem com base na radiação solar específica do local, otimizando os custos de investimento para se obter um projeto economicamente viável (IMRE, 2006). Além disso, é necessária uma padronização dos processos para a ampla comercialização, pois ainda se utiliza muito a experiência na construção dos secadores solares, ao invés de métodos científicos e cálculos técnicos (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011; VIJAYAVENKATARAMAN; INIYAN; GOIC, 2012).

2.3 SECADORES SOLARES

Um secador solar tem como principal objetivo fornecer energia térmica ao produto, na forma de calor, para que a pressão de vapor da água contida em seu interior seja elevada e a umidade relativa do ar de secagem diminua. Dessa forma, o ar de secagem passa a possuir uma maior capacidade de transporte de água, melhorando a eficiência da secagem (EKECHUKWU; NORTON, 1999; TIWARI, 2016).

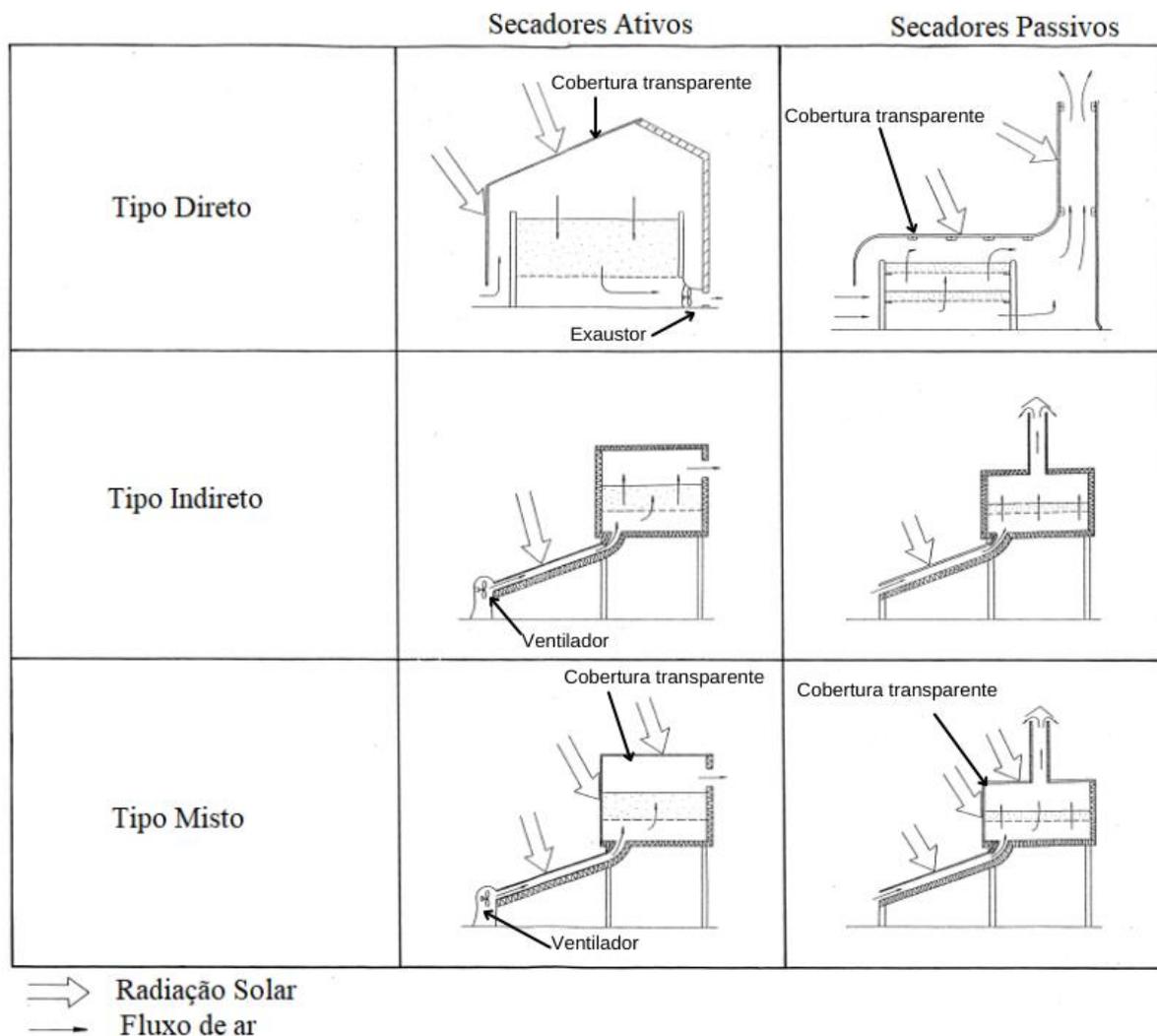
De maneira geral, os secadores solares apresentam uma série de componentes, como: a câmara de secagem, em que o produto passa pelo processo de secagem; o coletor que converte a energia solar em energia térmica; a, não obrigatória, fonte de energia auxiliar; um meio para transferir energia térmica ao produto e ao ar de secagem; alguma alternativa para manter o ar de secagem em movimento; materiais estruturais (Silveira, 2016).

2.3.1 Tipos de secadores solares

É possível dividir os secadores solares a partir de seu fluxo de ar, como secadores ativos e passivos, e com base na incidência da radiação solar sobre a câmara de secagem, como secadores diretos, indiretos, mistos e híbridos (FUDHOLI et al., 2010; MOHANA et al., 2020; VIJAYAVENKATARAMAN; INIYAN; GOIC, 2012).

Essas diferentes representações podem ser observadas na Figura 2 - Secadores Solares abaixo:

Figura 2 - Secadores Solares (adaptado)



Fonte: Ekechukwu e Norton (1999).

Como pode ser observado na Figura 2, em secadores de tipo direto, o alimento, dentro da câmara de secagem, é exposto diretamente a radiação solar que atravessa uma cobertura transparente, normalmente de vidro ou plástico. Nesse caso, o processo de secagem tem início quando os raios solares atingem a superfície do alimento e transferem energia térmica para o mesmo por meio de mecanismos de radiação. Com isso o produto começa a esquentar e a cobertura transparente impede que a radiação emitida pelo alimento escape para a atmosfera. Conseqüentemente, a temperatura do ar na câmara de secagem e do alimento aumentam rapidamente, o que facilita a remoção da umidade, mas pode interferir na qualidade do produto final

(CHAVAN et al., 2020; MOHANA et al., 2020). O secador solar de tipo indireto possui uma cobertura que não permite a passagem de raios solares e a radiação incidente sobre o coletor aquece o ar de secagem antes que ele chegue à câmara de secagem, onde estão os produtos. Nesse modelo, a transferência de calor ocorre por meio de mecanismos de convecção entre o alimento úmido e o ar de secagem já aquecido (LINGAYAT et al., 2020; MOHANA et al., 2020). O secador solar de tipo misto é uma mistura dos anteriores, combinando a secagem direta com a indireta, apresentando uma câmara de secagem com cobertura transparente e um coletor solar, como visto na Figura 2. A transferência de calor no secador misto ocorre através de mecanismos de radiação na câmara de secagem e mecanismos de convecção do ar de secagem para o produto (MOHANA et al., 2020). Além disso, caso exista algum método auxiliar de aquecimento do ar de secagem, que utilize outra fonte de energia, como combustíveis fósseis, eletricidade ou gás, que garanta a atividade do secador quando a radiação solar não está disponível, o secador solar é considerado do tipo híbrido (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011).

Também conhecidos como secadores forçados, os secadores ativos são caracterizados pela presença de ventiladores ou exaustores posicionados nas entradas ou saídas do sistema, que promovem a convecção forçada do fluido de trabalho. Além disso, por possuírem uma melhor circulação do ar de secagem dentro da câmara, os secadores dessa categoria tendem a possuir menores períodos de secagem e alcançam melhores taxas de secagem que os secadores passivos, no entanto são mais complexos e caros (MOHANA et al., 2020; FUDHOLI et al., 2010). Em secadores do tipo passivo, o ar aquecido percorre o sistema por meio da convecção natural, ou seja, o ar se movimenta devido às diferenças de temperatura e massa específica do ar entre uma superfície quente e outra fria (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011). Normalmente, os sistemas passivos são mais baratos e de fácil construção que os modelos ativos, precisando somente de uma câmara de secagem e orifícios de entrada e saída de ar (TABORDA, 2017; HIDALGO, 2021). Os modelos passivos são mais adequados para a secagem de pequenas quantidades de frutas e vegetais, todavia, existe uma pequena chance de perda de qualidade do produto devido a possibilidade do superaquecimento (MOHANA et al., 2020).

2.4 SECAGEM DE PRODUTOS AGRÍCOLAS

Plantas alimentícias e produtos agrícolas são sensíveis às diferenças de temperatura e umidade que o processo de secagem proporciona e suas características, como cor, cheiro, textura, umidade e sabor, são dependentes dos processos térmicos e sofrem modificações (IMRE, 2006). Quando se trata do consumo humano, cor e umidade podem ser consideradas as principais variáveis a serem controladas durante o processo de secagem (HIDALGO, 2021). A primeira está diretamente relacionada à aceitação do produto pelo consumidor final, uma vez que alterações na cor podem causar diminuição na qualidade e no valor de mercado. A segunda tem ligações com a quantidade de energia utilizada durante o processo de secagem e com o tempo de armazenamento do produto (BAHLOUL et al., 2009; CHEN, 2008; GARCÍA et al., 2010).

A gravimetria é o processo utilizado para a aferição da quantidade de massa seca de um corpo, conseqüentemente, também pode ser utilizado para determinar a quantidade de umidade em um produto (HIDALGO, 2021). De acordo com o Imre (2006), frutas e vegetais verdes e folhosos precisam ser secos de um valor inicial de umidade entre 60% e 80%, em base úmida, para uma faixa de 10 a 25% para o armazenamento seguro. Já cereais e leguminosas possuem umidade inicial em cerca de 30% na colheita e durante o processo de secagem devem atingir 12%. Em Emedix (2022) e Fudholi et. al (2010), é possível verificar que o tomate cru possui umidade inicial em torno de 95%, sendo esse valor maior que a média das frutas encontradas em Imre (2006). Na Tabela 1, a seguir, são apresentados os valores de secagem de outros produtos alimentícios.

Tabela 1 - Dados do processo de secagem (Adaptado)

Produto	Percentual de umidade (b.u.)		Temp. ar de secagem (°C)
	Inicial (%)	Final (%)	
Banana	80	15	70
Tomate	95	7	60
Beterraba	75-85	10-14	-
Cardamomo	80	10	45-50
Mandioca	62	17	70
Pimenta Chili	90	20	35-40
Semente de café	65	11	45-50

Milho	28-32	10-13	43-82
Algodão	25-35	5-7	-
Vagem	70	5	75
Alho	80	4	55
Uvas	74-78	18	50-60
Cebola	80-85	8	50
Amendoim	45-50	13	35
Plantas medicinais	85	11	35-50
Batata	75-85	10-14	70
Arroz	25	12	43
Soja	20-25	11	61-67
Trigo	18-20	11-14	43-82
Pimenta	80	10	55
Folhas de espinafre	80	10	-

Fonte: Handbook of Industrial Drying (2006).

Quando a temperatura do ar de secagem for baixa, próxima a 30°C, existe a possibilidade de deterioração e mofo do produto e a taxa de secagem é muito lenta. Para que o processo de secagem seja seguro e o produto apresente um bom resultado, as temperaturas do ar de secagem devem variar de 35°C a 60°C (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011). Devido à natureza intermitente da radiação solar, podem ocorrer variações de temperatura difíceis de controlar ao longo do processo de secagem. Em momentos de alta radiação solar, a temperatura de secagem tende a aumentar excessivamente, caso isso ocorra é possível misturar o ar de secagem com o ar fresco da atmosfera (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011; RABHA; MUTHUKUMAR, 2017).

Segundo Hidalgo (2021), a qualidade final do produto seco é um fator importantíssimo para a economia do processo, pois afeta a capacidade de comercialização e a receita final obtida com a venda, que pode ser maior conforme o resultado. Por fim, para que o produto final possua a qualidade desejada e o processo de secagem ocorra de forma satisfatória, deve-se controlar de perto as taxas de transferência de calor e massa e o método escolhido para o processo não deve afetar significativamente o sabor, cor, textura ou valor nutricional (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2010; EKECHUKWU; NORTON, 1999).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 LOCALIZAÇÃO

O experimento foi realizado em uma residência localizada nas proximidades do campus da UFSC na cidade de Araranguá, Santa Catarina, Brasil. A latitude local é de aproximadamente $28^{\circ} 57' 43,7''$ S, a longitude é de aproximadamente $49^{\circ} 28' 16,8''$ O e a altitude é de 13 metros acima do nível do mar. Na Tabela 2 é possível verificar a radiação média diária mensal entre os anos de 2015 a 2019 para a cidade de Araranguá (ANDRADE, 2020).

Tabela 2 - Radiação solar média diária mensal, em kWh/(m².dia), para a cidade de Araranguá

Mês	Média [kWh/(m ² .dia)]
Janeiro	5,64
Fevereiro	5,42
Março	4,6
Abril	3,76
Mai	2,74
Junho	2,67
Julho	2,64
Agosto	3,61
Setembro	3,77
Outubro	4,19
Novembro	5,71
Dezembro	6,12
Anual	4,24

Fonte: Andrade, 2020.

3.2 EQUIPAMENTOS E PROGRAMAS UTILIZADOS PARA COLETA DE DADOS DE TEMPERATURA, UMIDADE RELATIVA DO AR E RADIAÇÃO SOLAR

A coleta de dados de radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar são muito importantes para o processo de secagem. Para isso, podem ser utilizados diversos tipos de sensores, processadores e interfaces, alguns dos quais serão apresentados a seguir.

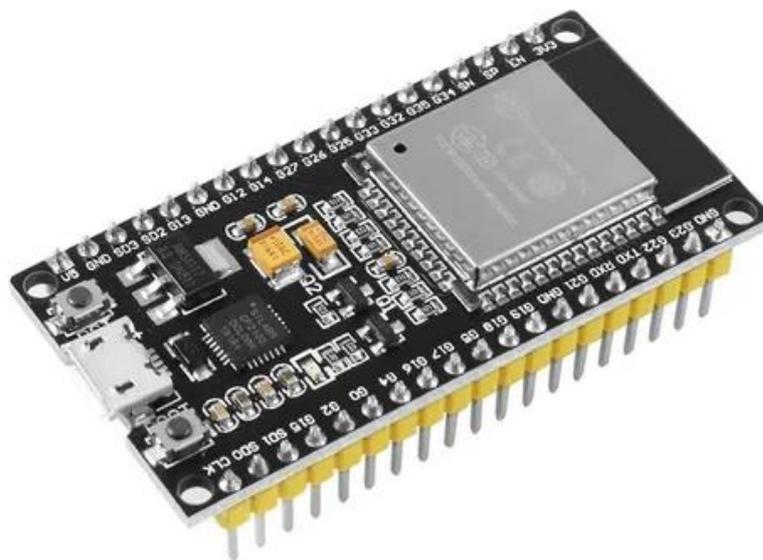
3.2.1 Microcontroladores

Microcontroladores, ou microprocessadores, são dispositivos capazes de receber códigos em linguagem C++ através da interface Arduino IDE, a partir de uma porta USB com diversas velocidades de comunicação serial. Eles são utilizados para realizar as mais diversas funções. A seguir são apresentados alguns modelos de microcontroladores.

3.2.1.1 ESP32

O ESP32 (Figura 3) é um microcontrolador, que possui Wi-Fi, o que permite o armazenamento de dados diretamente em servidores, e Bluetooth 2.4 GHz, tendo um microprocessador com dois núcleos (SYSTEMS, 2018). Ele pode operar tanto com 5 V ou com 3,3 V e possui diversas portas digitais e analógicas, sendo compatível com uma grande gama de sensores.

Figura 3 - ESP32

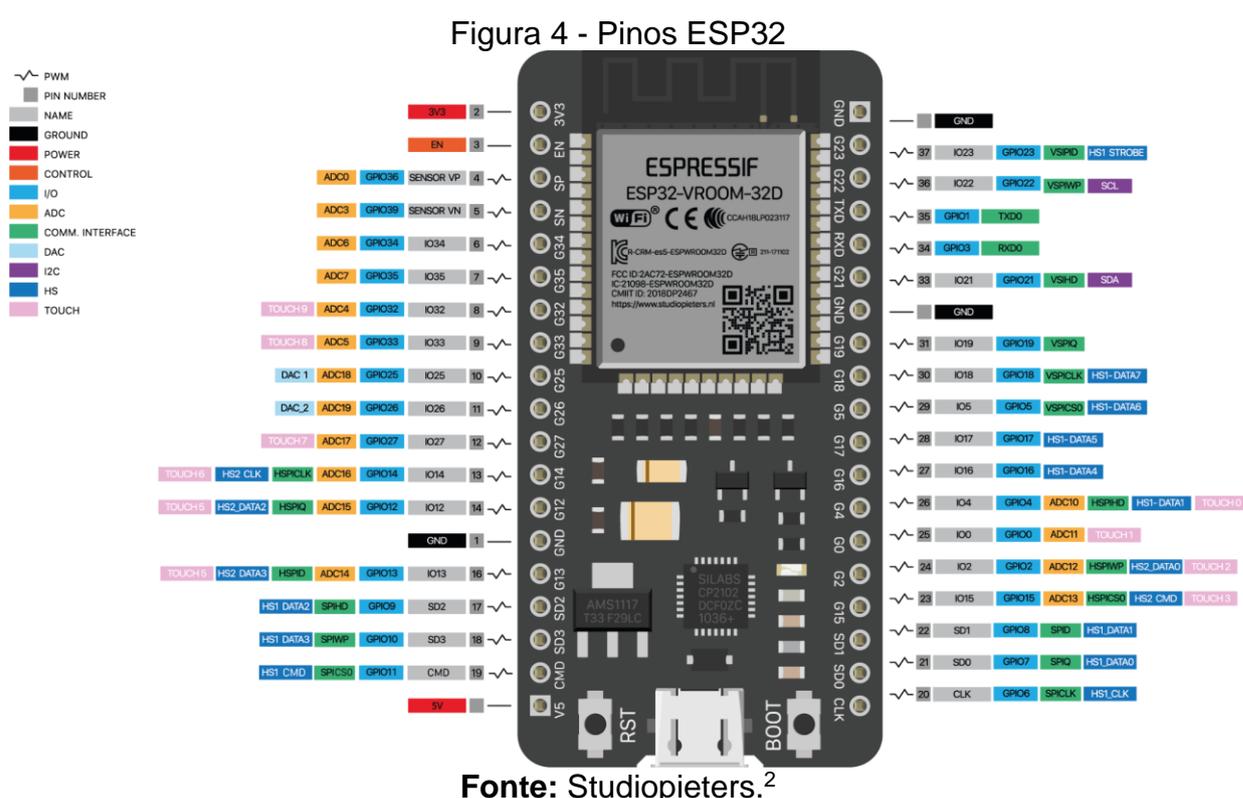


Fonte: Safiratec.¹

O microcontrolador ESP32 trabalha com pacotes de 12 bits, isso quer dizer que as informações lidas em portas analógicas variam entre 0 e 4095. É possível

¹ Disponível em: < https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1333093418-placa-esp32-wroom32-cp2102-wifi-bluetooth-38-pinos-_JM> Acesso em: 26/02/2022

relacionar essas leituras com a tensão nas portas analógicas, ao se utilizar proporções (BORGES, 2021). As portas do microcontrolador são chamadas de GPIO e muitas realizam mais de uma função. As portas DAC 1 e DAC 2 são as utilizadas para receber sinais analógicos (Espressif System, 2016). As entradas GPIO 21, GPIO 22, GPIO 33 e GPIO 35 são capazes de receber os sinais SCL e SDA, responsáveis pelo funcionamento do protocolo I2C e dos sensores BME280. Além disso, o ESP32 possui os pinos 3V3 ou Vin, responsáveis pelo fornecimento de energia, e o pino GND, responsável pelo aterramento dos sensores. Todas as portas do ESP32 são apresentadas na Figura 4.



3.2.1.2 ESP8266 e Wemos D1R2

O ESP8266 é a versão antecessora do ESP32 e, embora seja similar em alguns aspectos, não apresenta algumas funcionalidades, tais como *bluetooth* ou sensores táteis. Uma das principais diferenças entre eles está na resolução do sinal analógico - enquanto o ESP32 possui 12 bits, o ESP8266 possui 10 bits. Isso significa que as

² Disponível em: <<https://www.studiopieters.nl/esp32-pinout/>> Acesso em: 26/02/2022

informações lidas nas portas analógicas do ESP8266 variam com uma resolução de 0 a 1024. Na Tabela 2 são apresentadas outras diferenças entre os dois modelos.

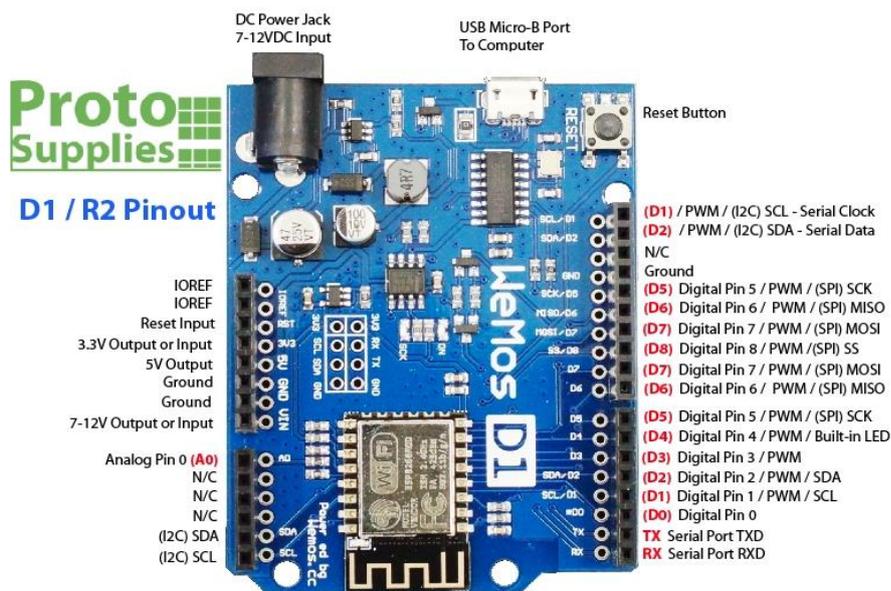
Tabela 3 - Comparativo entre ESP8266 e ESP32 (adaptado)

Especificações	ESP8266	ESP32
MCU	Single-Core 32-bit	Dual-Core 32bit
802.11 b/g/n Wi-Fi	Sim, HT20	Sim, HT40
Bluetooth	Nenhum	Bluetooth 4.2 e inferiores
Frequência típica	80 MHz	160MHz
SRAM	160 kBytes	512 kBytes
Flash	SPI Flash, up to 16Mbytes	SPI Flash, up to 16Mbytes
GPIO	17	36
Hardware/Software PWM	Nenhum/ 8 canais	1 / 16 canais
SPI/I2C/I2S/UART	2/1/2/2	4/2/2/2
ADC	10-bit	12-bit
CAN	Nenhum	1
Interface ethernet MAC	Nenhum	1
Sensor tátil	Nenhum	Sim
Sensor de temperatura	Nenhum	Sim
Temperatura de funcionamento	-40°C - 125°C	-40°C - 125°C

Fonte: Aufranc, 2016.

Já a placa WeMos D1R2 é um microcontrolador inspirado no Arduino Uno, cuja principal diferença está em seu processador. Enquanto o processador do Arduino Uno é o Atmega328, a placa WeMos-D1R2 utiliza o ESP8266. A WeMos D1R2 apresenta diversas portas analógicas e digitais, com saídas entre 3,3 V e 5 V, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Pinos WeMos D1R2



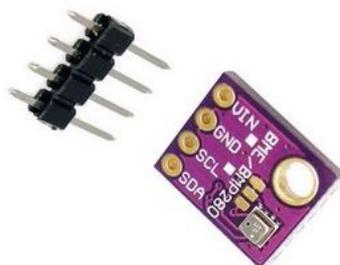
Fonte: ProtoSupplies.³

3.2.2 BME280

O sensor BME280, fabricado pela Bosch Sensortec, é um equipamento compacto e de fácil implementação capaz de realizar a medição de dados de temperatura e umidade relativa do ar no mesmo componente. A faixa de leitura de dados de temperatura é de -40 °C a 85°C com uma precisão de 1°C. O sensor coleta os dados de umidade relativa do ar entre os valores de 0 e 100%, possuindo uma precisão de 3% UR (BOSCH SENSORTEC). O sensor BME280 e seus respectivos pinos são mostrados na Figura 6.

³ Disponível em: <<https://protosupplies.com/product/esp8266-d1-r2-wifi-processor-with-uno-footprint/>> Acesso em: 26/02/2022

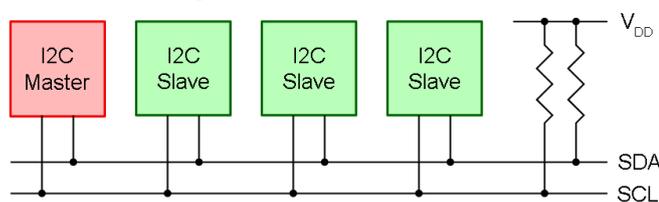
Figura 6 - Sensor BME280



Fonte: Saravati.⁴

A comunicação ocorre através do protocolo I2C, desenvolvido pela *Phillips* no início dos anos 90, esse protocolo utiliza dois fios, *Serial Clock (SCL)* e *Serial Data (SDA)*. O primeiro é responsável por criar um *clock* que sincroniza sistemas e o segundo é responsável por enviar e receber os dados. É um protocolo utilizado principalmente para a comunicação entre periféricos e microcontroladores, possuindo baixa velocidade de comunicação. Além disso, possui um endereço de 7 bits, o que significa que é possível conectar até 128 dispositivos em um mesmo barramento I2C (CARVALHO, 2016). Na Figura 7 é apresentado o protocolo I2C.

Figura 7 - Protocolo I2C



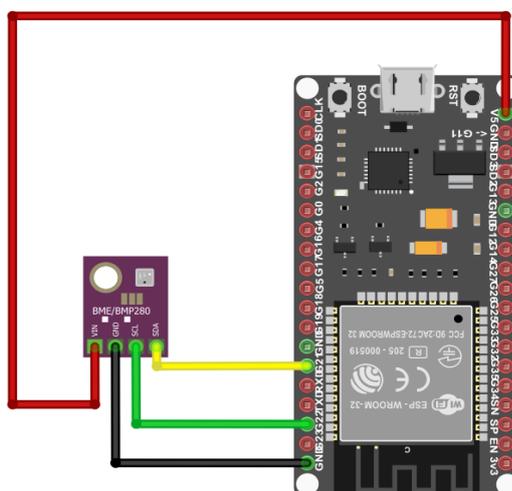
Fonte: Kernel.⁵

A sua conexão na plataforma ESP32 é normalmente feita com a alimentação positiva no pino V5 ou Vin e negativa no GND, o sinal de dados é conectado aos pinos específicos de SCL e SDA. Na Figura 8 é possível ver a conexão correta do sensor a uma plataforma ESP32, sendo os cabos amarelo e verde os sinais SDA e SCL e os cabos vermelho e preto a alimentação positiva e negativa, respectivamente.

⁴ Disponível em: <<https://www.saravati.com.br/sensor-de-pressao-bmp280-barometrico-gybmep-5v-4-pinos>> Acesso em: 26/02/2022

⁵ Disponível em: <<https://www.kernel.org/doc/html/latest/i2c/summary.html>> Acesso em: 26/02/2022

Figura 8 - Conexão BME280



Fonte: O autor.

3.2.3 Módulo LDR

Geralmente, são utilizados piranômetros para obter dados de radiação solar, porém esse tipo de equipamento possui um custo muito elevado, cerca de 150 vezes o custo de um único módulo LDR (*Light Dependent Resistor*). O sensor LDR é um fotoresistor que possui a característica singular de modificar sua resistência conforme a intensidade da luz que o atinge e, dessa forma, é capaz de variar a diferença de potencial gerada em seus terminais. Para este módulo, quanto maior for a intensidade da luz incidente sobre o sensor, menor será a sua resistência (VIEIRA et al., 2015). Portanto, é possível associar a leitura do sensor com o comportamento de um piranômetro (BORGES, 2021).

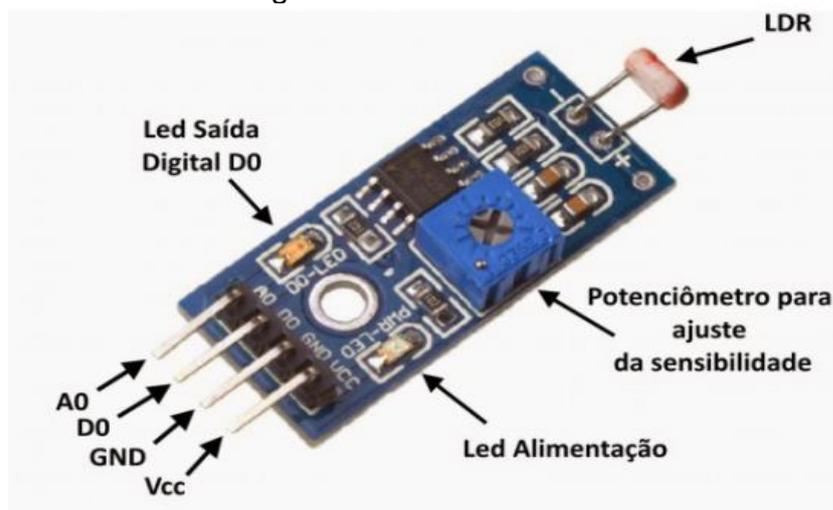
Existem diversos tamanhos de módulos LDR, no entanto, o de 5 mm apresenta a melhor correlação da tensão de saída com a radiação solar do piranômetro, sendo necessária a utilização de um fator de correção. Este fator é utilizado devido a diferença entre as faixas do espectro compreendido entre o módulo LDR, de 400 nm a 700 nm, e o piranômetro, de 400 nm a 1100 nm (VIEIRA et al., 2015; SANTIAGO, 2014). De acordo com o estudo realizado em VIEIRA et al. (2015), foi possível obter a equação (3.1), responsável por relacionar a tensão de saída do sensor LDR de 5mm com a potência em W/m^2 de forma exponencial:

$$Rad = 4464,9 * e^{-17,73 * V_{saída}} \quad (3.1)$$

em que, R_{ad} é a radiação solar incidente (W/m^2) e $V_{saída}$ é a tensão de saída (V) do módulo LDR (VIEIRA et al., 2015). Para obter a equação (3.1) um piranômetro e um módulo LDR foram submetidos às mesmas condições, para que então fosse possível criar uma relação entre os dados medidos pelo piranômetro e a tensão de saída do LDR. A partir disso, obteve-se uma linha de tendência entre as duas variáveis utilizada para montar a equação de regressão cujo coeficiente de determinação do ajuste (R^2) é 0,8446 (VIEIRA et al., 2015).

Um módulo LDR é composto pelo sensor LDR, por um comparador LM393, por um potenciômetro e quatro conexões, esses componentes podem ser observados na Figura 9. O potenciômetro precisa estar ajustado na posição de $10\text{ k}\Omega$ para que a equação (3.1) seja válida (VIEIRA et al., 2015). A alimentação do módulo é realizada pelos terminais VCC e GND e ele possui duas saídas de dados, uma analógica e outra digital. A saída analógica entrega os dados de tensão de saída, entre 0 V e a máxima tensão de alimentação, necessários na equação. Uma vez que a saída digital entrega a informação de apenas dois estados lógicos, 1 ou 0, ela não é suficiente para a equação (3.1).

Figura 9 - Módulo LDR



Fonte: Baú da Eletrônica.⁶

Cabe ressaltar que o módulo LDR utilizado no presente trabalho não é o mesmo utilizado em VIEIRA et al. (2015) e não passou pelo processo de calibração com algum sensor de referência. Por conta disso, os dados de radiação solar obtidos podem não

⁶ Disponível em: < https://www.baudaeletronica.com.br/sensor-de-luz.html?gclid=CjwKCAiAl-6PBhBCEiwAc2GOVG0J9GkeKxDyKNLIgofVA7xQMz1cV4r6F2_9w620MrCChfucC7X6HxoCuKIQAvD_BwE > Acesso em: 26/02/2022

ser tão precisos quanto os apresentados em VIEIRA et al. (2015) e a utilização da equação (3.1) para a aquisição desses dados não é necessariamente ideal.

3.2.4 Blynk e Thingspeak

As plataformas *Blynk* e *Thingspeak* surgem com a proposta de integrar o mundo físico com o digital. O primeiro faz a junção entre um aplicativo de celular e um hardware, que pode ser, o ESP32, o ESP8266 e outras placas de desenvolvimento. O segundo tem o mesmo objetivo, no entanto ele faz a integração do hardware a uma plataforma na internet. O aplicativo *Blynk* foi empregado para o armazenamento em rede dos dados de temperatura e umidade relativa do ar coletados através do ESP32 e dos sensores BME280. Já a plataforma *Thingspeak* foi utilizada com o objetivo de receber o sinal analógico proveniente do microprocessador Wemos D1R2 agregado ao módulo LDR. Tanto o *Blynk*, como o *Thingspeak*, possuem interfaces gráficas em que o usuário é capaz de visualizar os dados em tempo real e até mesmo controlar seus dispositivos remotamente. A programação para ambas as plataformas pode ser realizada através da Arduino IDE. A Figura 10 e a Figura 11 exibem exemplos das interfaces gráficas dos dois sistemas.

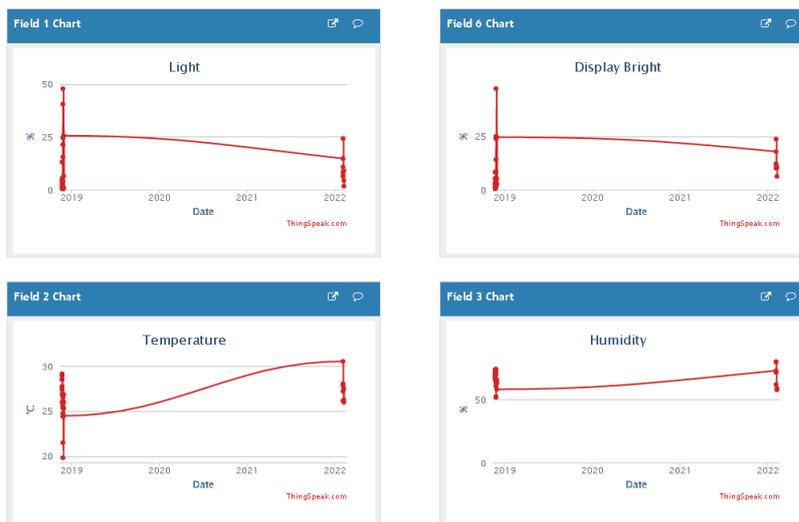
Figura 10 - Exemplo de interface gráfica no Blynk App



Fonte: JemRF.⁷

⁷ Disponível em: <<https://jemrf.github.io/RF-Documentation/blynk.html>> Acesso em: 26/02/2022

Figura 11 - Exemplo de interface gráfica no Thingspeak



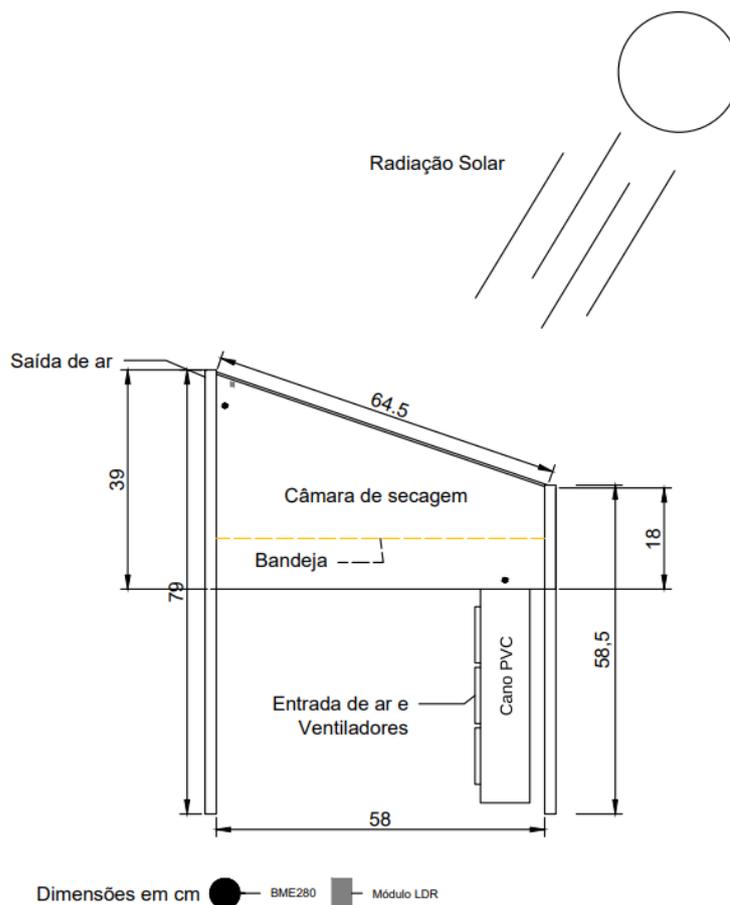
Fonte: Michelin.⁸

3.3 DESCRIÇÃO DO SECADOR SOLAR

A Figura 12 apresenta o esquema do secador solar proposto neste trabalho, que é do tipo direto com convecção forçada. O secador consiste na câmara de secagem, na forma de um prisma trapezoidal, construída em madeira com largura total de 0,55 metros e comprimento total de 0,64 metros. A câmara de secagem possui 0,18 metros de altura menor e 0,39 metros de altura maior, coberta por uma lâmina de vidro de quatro milímetros de espessura e dimensões de 0,64 x 0,55. O secador em funcionamento pode ser visualizado na Figura 13 e em demais figuras apresentadas no APÊNDICE C - SECADOR SOLAR EM FUNCIONAMENTO.

⁸ Disponível em: <<https://thingspeak.com/channels/141950>> Acesso em: 26/02/2022

Figura 12 - Esquema do secador solar



Fonte: O autor

Figura 13 - Vista lateral do secador em funcionamento



Fonte: O autor.

Um cano de PVC foi utilizado para direcionar o ar impulsionado por três ventiladores instalados na entrada do secador. Esses são ventiladores de pequeno

porte, utilizados para controlar a temperatura de componentes de microcomputadores, e consomem uma potência de 0,8 W cada um. O ar entra diretamente na câmara, local em que absorve o calor das paredes do secador, aquecidas através da radiação solar, e passa pelos produtos, realizando os processos de transferência de calor e massa. Posteriormente, o ar aquecido deixa o secador através de uma abertura localizada na parte superior da câmara de secagem. O tampo de vidro possui uma inclinação próxima a 20° , ângulo que permite a entrada de radiação solar por um maior período ao longo do dia. Com o objetivo de maximizar a quantidade de energia absorvida pelo secador, a câmara de secagem foi pintada com tinta preta, que reflete apenas 2% da radiação incidente sobre sua superfície (Jornal da USP, 2019). Os alimentos são expostos sobre uma prateleira perfurada no interior do secador solar. As informações apresentadas anteriormente podem ser visualizadas nas Figura 13, Figura 14 e Figura 15.

Figura 14 - Interior da câmara de secagem



Fonte: O autor.

Figura 15 - Vista interna do secador em funcionamento com uma prateleira



Fonte: O autor.

3.4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O secador solar foi posicionado de forma com que sua cobertura de vidro estivesse virada para o norte geográfico, ou seja, a posição que garante uma maior média de incidência solar ao longo do ano e maior quantidade de horas de sol, no hemisfério sul (BABAGANA et al., 2021; BOLAJI, 2008).

Foram realizados onze testes experimentais, com duração de um dia cada. Desses testes, seis foram executados com os três ventiladores acionados, isto é, com um nível de ventilação mais intenso. Os cinco testes restantes foram realizados com apenas um ventilador ligado, promovendo assim uma ventilação mais branda. Os testes foram conduzidos no município de Araranguá - SC, entre as 9h e 17h, nos dias apresentados na Tabela 4, durante o mês de julho de 2021.

Tabela 4 - Datas dos experimentos de secagem realizados entre às 9h e 17h

Mês/Ano	Dia	Nível de convecção
Julho/2021	18	1 Ventilador
	20	
	21	
	23	
	25	
Julho/2021	11	3 Ventiladores
	13	

16
19
22
24

Fonte: O autor.

As amostras de tomate, com massa média inicial de 0,5 kg por experimento, foram adquiridas em mercado local (Araranguá, Santa Catarina, Brasil), em 2021. Cada uma das amostras teve sua massa medida imediatamente antes e depois de cada experimento, a fim de se determinar a quantidade de água evaporada durante a secagem. Para tanto, foi utilizada uma balança de cozinha, modelo SF-400, com resolução de 1 g. Antes de serem inseridos no secador, os tomates foram cortados pela metade, e depois cortados em fatias menores de forma semicircular, conforme apresentado na Figura 16, sendo finalmente posicionados na prateleira interna do secador solar.

Figura 16 - Tomates cortados de forma semicircular



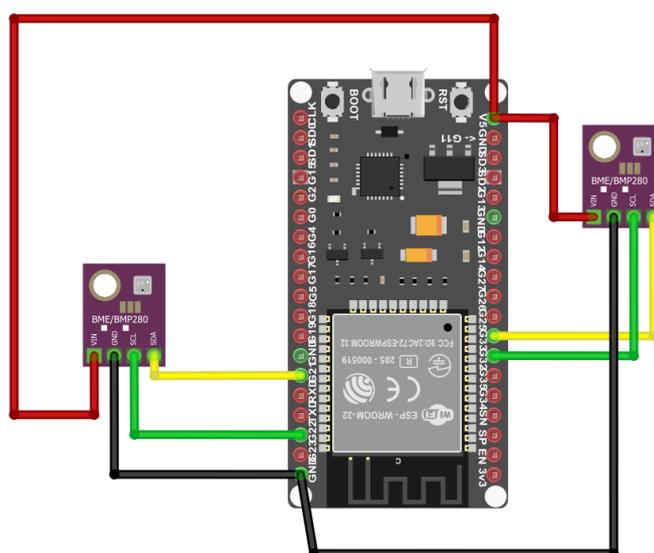
Fonte: O autor.

3.4.1 Aquisição e tratamento de dados

A fim de analisar o processo de secagem de tomates neste secador solar direto ativo, foi necessária a instalação de instrumentos capazes de medir dados relacionados à radiação solar, temperatura de entrada e saída do ar de secagem e umidade relativa, apresentados anteriormente.

Os dados de temperatura e umidade relativa do ar do secador foram aferidos através de dois sensores BME280. Um dos sensores foi posicionado na entrada da câmara de secagem, enquanto o outro foi instalado na saída do secador solar, como pode ser observado na Figura 12. Os sensores BME280 estão conectados ao ESP32, conforme a Figura 17, que envia os dados coletados para o servidor do aplicativo Blynk. O aplicativo permite o monitoramento e armazenamento dos dados em tempo real. O algoritmo em C++, desenvolvido pelo autor, utilizado para realizar a coleta e envio dos dados é apresentado no APÊNDICE A - CÓDIGO ESP32. Tanto a Figura 17, quanto a Tabela 5, apresentam a maneira que foi realizada a conexão dos dois sensores BME280 ao microcontrolador. A Figura 18 representa em um diagrama de blocos como ocorre a comunicação entre os componentes que coletam os dados de temperatura e umidade relativa do ar.

Figura 17 - Conexão de dois sensores BME280 ao ESP32



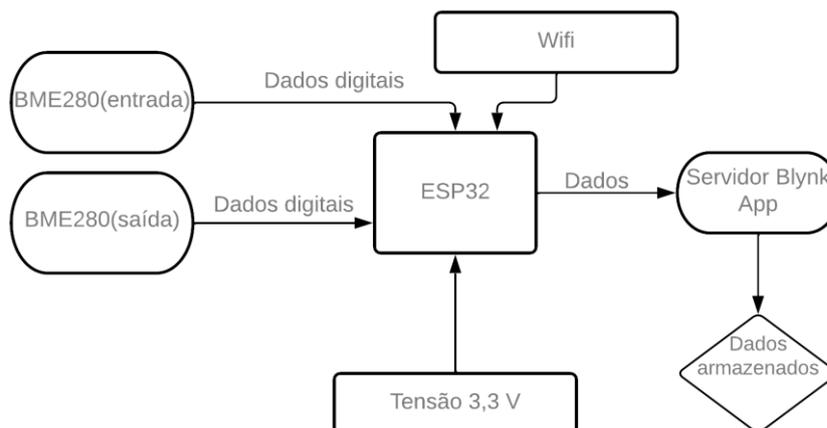
Fonte: O autor.

Tabela 5 - Portas utilizadas pelos dois sensores BME280

Sensor	Saída do sensor	Porta utilizada (ESP32)
BME280 (Entrada)	VIN	V5
	GND	GND
	SCL	GPIO 22
	SDA	GPIO 21
BME280 (Saída)	VIN	V5
	GND	GND
	SCL	GPIO33
	SDA	GPIO32

Fonte: O autor.

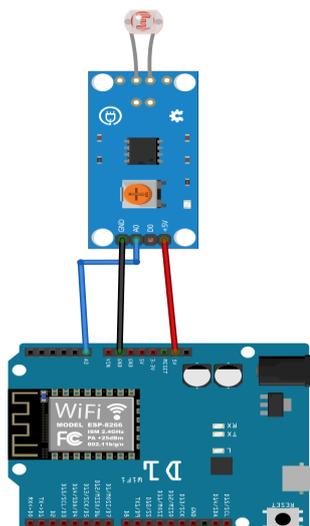
Figura 18 - Diagrama de Blocos BME280



Fonte: O autor.

Os dados de radiação solar [W/m^2] foram obtidos por meio de um módulo LDR conectado ao microcontrolador WeMos D1R2 (Figura 19), que envia os dados analógicos lidos pelo sensor para o servidor do ThingSpeak. Esse servidor permite o acompanhamento e armazenamento dos dados em tempo real. No APÊNDICE B - CÓDIGO WEMOS D1 R2 é possível encontrar o código em C++, desenvolvido pelo autor, utilizado para realizar a coleta e envio dos dados. O algoritmo utilizado converte os dados obtidos pelo sensor LDR para valores de tensão, para que então, utilizando a equação (3.1), seja possível obter os dados de radiação solar. Como pode ser observado na Figura 12 e na Figura 13, o módulo LDR foi acoplado na parte superior externa do secador solar, de forma que ele estivesse sempre recebendo radiação solar. Além disso, tanto a Figura 19, quanto a Tabela 6, apresentam as portas empregadas e a forma que as conexões foram feitas entre o módulo LDR e o microcontrolador. A Figura 20 representa em um diagrama de blocos como ocorre a comunicação entre os componentes que coletam os dados de radiação solar.

Figura 19 - Conexão do módulo LDR à placa WeMos D1R2



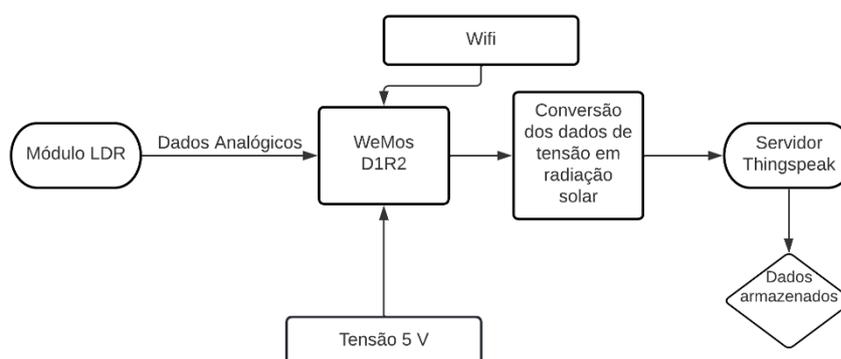
Fonte: O autor

Tabela 6 - Portas utilizadas pelo módulo LDR

Sensor	Saída do sensor	Porta utilizada (WeMos D1R2)
Módulo LDR	Vcc GND A0	5V GND A0

Fonte: O autor.

Figura 20 - Diagrama de blocos módulo LDR



Fonte: O autor.

Para quantificar a velocidade do ar de secagem na entrada da câmara de secagem, foi utilizado um anemômetro digital GM816, conforme mostra a Figura 21. O anemômetro foi posicionado imediatamente na saída do tubo PVC, pois nesse local os níveis de velocidade são mais elevados e a seção transversal do escoamento pode

ser facilmente determinada, permitindo o cálculo da vazão mássica. O anemômetro empregado neste trabalho é capaz de medir velocidade dentro de uma faixa de 0 m/s até 30 m/s, com 5% de incerteza. Os dados obtidos pelo equipamento, para cada configuração, permaneceram com valores aproximadamente constantes em 0,3 m/s \pm 0,02 m/s e 0,9 m/s \pm 0,04 m/s para um e três ventiladores, respectivamente.

Figura 21 - Especificações técnicas do anemômetro digital GM816

A. Air velocity				
Unit	Range	Resolution	Threshold	Accuracy
M/s	0-30	0.1	0.1	±5%
Ft/min	0-5860	19	39	
Knots	0-55	0.2	0.1	
Km/hr	0-90	0.3	0.3	
Mph	0-65	0.2	0.2	
Temperature. B				
Unit	Range	Resolution	Accuracy	
°C	-10°C~+45°C	0.2	±2°C	
°F	14°F~113°F	0.36	±3.6°F	
Battery		CR2032 3.0V (not included)		
Thermometer		NTC thermometer		
Operating temperature		-10°C~+45°C(14°F~113°F)		
Operating humidity		Less than 90%RH		
Store temperature		-40°C~+60°C(-40°F~140°F)		
Current consumption		Approx. 3mA		
Weight		52g		
Dimension		40x18x105mm		



Fonte: Benetech.⁹

Com os dados obtidos pelo anemômetro digital, é possível calcular a vazão mássica do ar de secagem que entra no secador através de:

$$\dot{m}_{ar} = V_{ar} \rho_{ar} A_{PVC} \quad (3.2)$$

em que \dot{m}_{ar} é a vazão mássica do ar de secagem (kg/s), V_{ar} é a velocidade de entrada do ar de secagem (m/s), ρ_{ar} é a massa específica do ar de secagem (kg/m³) e A_{PVC} é a área da seção transversal do tubo de PVC (m²). Com o objetivo de simplificar os cálculos, foi utilizado um valor constante de massa específica do ar de aproximadamente 1,2 kg/m³.

Finalmente, deve ser mencionado que os ventiladores, os microcontroladores e os sensores, foram alimentados através de fontes CC selecionadas para fornecer a

⁹ Disponível em: <<https://vctec.co.kr/web/product/benetech/img/GM816.pdf>> Acesso em: 23/03/2022

potência adequada para cada um. Além disso, todas as ligações elétricas e conexões entre sensores e microcontroladores foram feitas com cabos apropriados para o seu devido funcionamento.

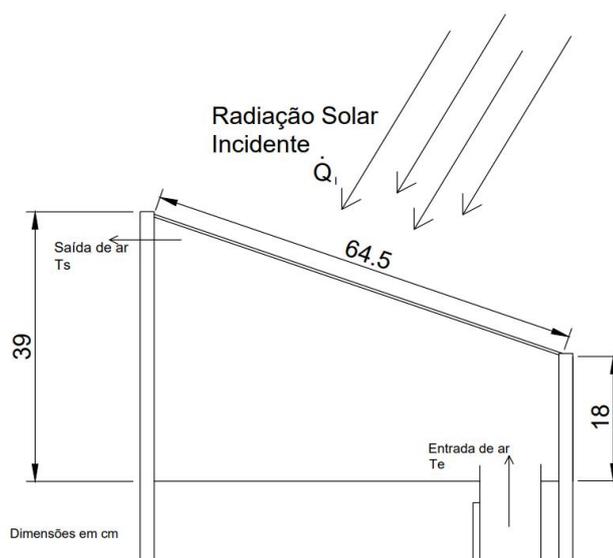
3.5 DETERMINAÇÃO DAS EFICIÊNCIAS DO SECADOR SOLAR

A seguir, serão apresentados os métodos e equações utilizadas para a determinação da eficiência térmica e da eficiência de secagem do secador solar.

3.5.1 Eficiência Térmica

Para que a eficiência térmica seja calculada, é necessário compreender o balanço energético no secador solar. Um esquema demonstrando os fluxos de energia através das fronteiras do secador é apresentado na Figura 22.

Figura 22 - Balanço energético no secador solar



Fonte: O autor.

A eficiência térmica do secador solar é definida como a razão entre a taxa de calor útil transferido ao ar de secagem, que é o fluido de trabalho, e a taxa de energia fornecida ao sistema, no caso, a radiação solar incidente (FUDHOLI et. al., 2013):

$$\eta = \frac{\dot{m}_{ar} c_p (T_s - T_e)}{\dot{Q}_I} \quad (3.3)$$

em que \dot{m}_{ar} é o vazão mássica de ar de secagem que passa pelo secador solar (kg/s), C_p é o calor específico do ar (1000 J/Kg.K), T_e e T_s são as temperaturas de entrada e de saída do secador, respectivamente, e \dot{Q}_I é a taxa de calor fornecida por radiação solar (W). Para o cálculo de \dot{Q}_I , foi utilizada a equação (3.4):

$$\dot{Q}_I = A_{vidro} Rad \quad (3.4)$$

onde A_{vidro}^{10} é a área da estrutura de vidro do secador (0,35 m²) e Rad é o fluxo de radiação solar incidente no secador (W/m²).

3.5.2 Eficiência de secagem

A eficiência de secagem (η_s) pode ser expressa pela razão entre a taxa de energia empregada na vaporização da umidade contida na cultura e a taxa de calor inserida no sistema, ou seja, a radiação solar incidente (DISSA et. al., 2011; EL KHADRAOUI et. al., 2019). Dessa forma, a eficiência de secagem é determinada a partir de:

$$\eta_s = \frac{\frac{M_{ev}}{\Delta t} \lambda}{\frac{\sum Rad}{n} A_{vidro}} \quad (3.5)$$

em que M_{ev} é a massa de água removida da cultura (kg), obtida através da diferença entre a massa inicial e final dos tomates, Δt é a quantidade de segundos em um dia de experimento, λ é o calor latente de vaporização da água (2256 kJ/kg), $\sum Rad$ é o somatório dos fluxos de radiação solar incidente (W/m²) no secador solar e n é a quantidade de medições.

3.6 INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

O procedimento de determinação das incertezas de medição a ser descrito é baseado em técnicas facilmente encontradas em Albertazzi Junior e Sousa (2017). A incerteza dos parâmetros medidos pode ser determinada de duas formas. Caso seja uma medida direta, como temperatura, umidade relativa do ar ou radiação solar, a

¹⁰ A área do vidro é empregada para o cálculo da taxa de calor fornecida por radiação da mesma forma que Hidalgo (2021) utilizou em sua pesquisa.

incerteza é a própria incerteza padrão fornecida pelo fabricante. No entanto, se for uma medida indireta, como a eficiência térmica e de secagem, que são calculadas a partir de medidas diretas, deve-se utilizar a equação:

$$u(X_R) = \sqrt{\left[\frac{\partial f}{\partial X_1} u(X_1)^2 + \frac{\partial f}{\partial X_2} u(X_2)^2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial X_n} u(X_n)^2\right]} \quad (3.6)$$

em que $u(X_R)$ é a incerteza padrão do parâmetro medido e $u(X_1), u(X_2), \dots, u(X_n)$ é a incerteza padrão de cada componente e $\frac{\partial f}{\partial X_n}$ é a derivada parcial da função em relação a cada componente. Na Tabela 7 é apresentado o valor de incerteza de cada equipamento utilizado para a coleta de dados.

Tabela 7 - Incertezas de medição

Equipamento	Parâmetro	Faixa de medição	Incerteza
Módulo LDR	Radiação Solar	0 - 1300 W/m ²	± 6%
BME280	Temperatura	-40 a 85 °C	± 1 °C
	Umidade Relativa	0 - 100 %	± 3%
Anemômetro	Velocidade do ar	0 - 30 m/s	± 5%
Balança digital	Massa	0 - 7000 g	± 1 g

Fonte: O autor.

Por outro lado, quando se utilizam médias para expor os resultados, é preciso levar em conta a incerteza devido as repetições, obtida através do cálculo do desvio padrão da amostra. Dessa forma, a incerteza padrão das médias é calculada através de:

$$u(\overline{X_R}) = \sqrt{[u(X_R)^2 + u(R_e)^2]} \quad (3.7)$$

em que $u(\overline{X_R})$ é a incerteza padrão média do parâmetro medido e $u(R_e)$ é a incerteza devido as repetições. Com isso, é possível calcular a incerteza final média para cada parâmetro utilizando o coeficiente t de Student para 95,45% de confiança, como visto na equação (3.8):

$$U(\overline{X_R}) = u(\overline{X_R}) \cdot t \quad (3.8)$$

onde $U(\overline{X_R})$ é a incerteza final média para cada parâmetro e t é o coeficiente de Student para 95,45% de confiança.

3.7 TESTE MODIFICADO DE THOMPSON PARA REMOÇÃO DE DADOS ATÍPICOS

O teste modificado de Thompson permite encontrar valores atípicos, *outliers* em inglês, através das equações (4.1) e (4.2) que comparam o desvio padrão, a média dos dados e o teste Tau, criado por Thompson, juntamente com os dados do instante medido (LABRECQUE et. al. 2016).

$$|x - \bar{x}| > Tau * \sigma \quad (3.9)$$

$$Tau = \frac{t^*(n-1)}{\sqrt{n}*\sqrt{n-2+t^2}} \quad (3.10)$$

Nas equações acima, x é o dado averiguado em um determinado em instante, \bar{x} é a média dos dados obtidos, σ é o desvio padrão médio e Tau é o valor obtido através da equação (3.10). Na equação (3.10), t é o inverso bicaudal da função t de Student e n é o total de dados das aferições. Realizar essa análise de dados é necessária devido à possibilidade da existência de erros aleatórios, ou valores atípicos, que ocorrem durante a operação de um sistema de aferição automático.

Os valores atípicos, que divergem da média padrão de dados, prejudicam os resultados dos dados coletados. Por esse motivo é necessário o descarte desses valores discrepantes, evitando perda de confiabilidade dos dados. Geralmente, esses valores atípicos são ocasionados por fatores externos, como é o caso das medidas de radiação solar. O módulo LDR funciona com base na luminosidade do local e caso alguma nuvem, ou poeira, estejam obstruindo a radiação que chega ao sensor, pode haver erro na leitura ou um valor atípico na média. Com o descarte dos valores atípicos e a melhora da confiabilidade do sistema, é possível iniciar a análise dos dados coletados pelo sistema de aquisição.

4 RESULTADOS

4.1 RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE

Os dados de radiação solar obtidos através módulo LDR são apresentados na Tabela 8, para convecção forçada com três ventiladores, e na Tabela 9, para convecção forçada com um ventilador. Vale ressaltar que a coleta de dados de radiação solar foi realizada minuto a minuto e posteriormente são apresentadas a média para cada hora de experimento.

Tabela 8 - Radiação solar incidente para os dias com três ventiladores

Hora	Radiação Solar [W/m ²]					
	11/jul	13/jul	16/jul	19/jul	22/jul	24/jul
09:00	724,27	546,58	657,81	488,04	518,17	468,39
10:00	880,02	578,81	684,91	545,39	676,37	559,79
11:00	765,72	405,88	644,72	491,29	775,14	709,85
12:00	791,20	484,84	1039,01	633,93	833,46	703,12
13:00	698,05	475,19	1073,00	576,63	898,81	743,12
14:00	650,14	194,30	982,36	623,58	844,15	783,59
15:00	493,53	70,18	743,42	560,59	627,09	528,85
16:00	137,92	37,44	252,42	308,52	324,34	285,04
17:00	37,36	1,59	8,56	75,72	26,14	31,72

Fonte: O autor.

Tabela 9 - Radiação solar incidente para os dias com um ventilador

Hora	Radiação Solar [W/m ²]				
	18/jul	20/jul	21/jul	23/jul	25/jul
09:00	382,61	629,42	250,25	278,72	355,30
10:00	392,29	688,68	496,19	520,02	541,73
11:00	532,34	712,07	626,83	779,10	751,68
12:00	623,83	794,46	853,02	907,05	727,46
13:00	666,76	750,49	937,80	956,66	739,53
14:00	830,42	810,85	864,05	864,64	669,88
15:00	614,00	574,00	684,23	827,45	328,33
16:00	216,09	92,43	382,69	527,12	143,51
17:00	82,22	40,17	61,17	38,42	11,77

Fonte: O autor.

Ao analisar os dados apresentados na Tabela 8 e Tabela 9, percebe-se como a radiação solar incidente variou ao longo dos dias de teste. Como esperado de dados

de radiação solar, devido ao movimento aparente do Sol ao longo do dia, os picos de radiação ocorreram, normalmente, entre às 12h e 14h, comportamento que pode ser observado na Figura 23. As maiores médias de radiação solar ocorreram nos dias 16/jul, com média de $676,25 \text{ W/m}^2 \pm 26,98 \text{ W/m}^2$, 23/jul, com média de $633,24 \text{ W/m}^2 \pm 20,61 \text{ W/m}^2$, e 22/jul, com média de $613,74 \text{ W/m}^2 \pm 19,47 \text{ W/m}^2$. Enquanto que as menores médias ocorreram durante os dias 13/jul, com média de $310,53 \text{ W/m}^2 \pm 19,52 \text{ W/m}^2$, e 25/jul, com média de $474,35 \text{ W/m}^2 \pm 20,78 \text{ W/m}^2$. Esses últimos foram os dias que apresentaram maior quantidade de nuvens ao longo do dia, fator crucial para a redução da radiação solar incidente.

A partir dos dados coletados, percebe-se que as médias de radiação solar estiveram próximas na maior parte do tempo e os dias apresentaram condições meteorológicas parecidas, com céu aberto e sol entre poucas nuvens. No entanto, para que possa ser realizada a análise da eficiência para cada nível de convecção, é necessário utilizar somente os dias que o nível de radiação e outras condições climáticas sejam semelhantes. Dado este fato, o dia 13/jul foi descartado das comparações, uma vez que suas condições meteorológicas foram diferentes dos demais dias.

Como mencionado na seção 3.2.3, o módulo LDR utilizado para a coleta dos dados de radiação solar neste trabalho não é o ideal, assim como a correlação apresentada na equação (3.1). Por esse motivo, os resultados de radiação solar apresentados neste capítulo podem não ser tão precisos quanto os dados obtidos através de um piranômetro, ou um módulo LDR calibrado. Uma vez que as equações de eficiência térmica e eficiência de secagem são dependentes dos dados de radiação solar, os seus resultados também serão impactados pelas incertezas provenientes do módulo LDR.

4.2 TEMPERATURAS NO SECADOR SOLAR

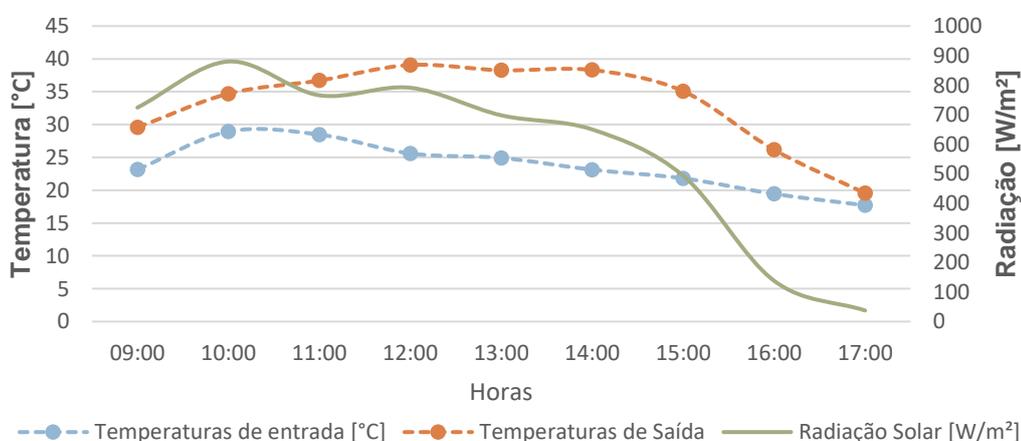
Assim como os dados de radiação solar, a coleta dos dados de temperatura na entrada e saída do secador também foram aferidos minuto a minuto e os resultados aqui apresentados são as médias para cada hora de experimento. Como visto anteriormente, as temperaturas de entrada e saída do ar de secagem no secador solar

são variáveis importantes para o cálculo da eficiência térmica e por isso devem ser monitoradas.

Nas Figura 23, Figura 24, Figura 25, Figura 26 e Figura 27, são apresentadas as temperaturas de entrada e saída do ar e a radiação solar incidente no sistema utilizando três ventiladores. Ao analisar cada figura, percebe-se que a temperatura de saída sofre grande influência da radiação solar e por conta disso suas curvas seguem padrões parecidos. Além disso, verifica-se que para todos os dias utilizando três ventiladores, as temperaturas de entrada permaneceram entre $15\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$, $^{\circ}\text{C}$ e $34\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$, com a máxima temperatura no dia 24/jul e mínima temperatura no dia 16/jul.

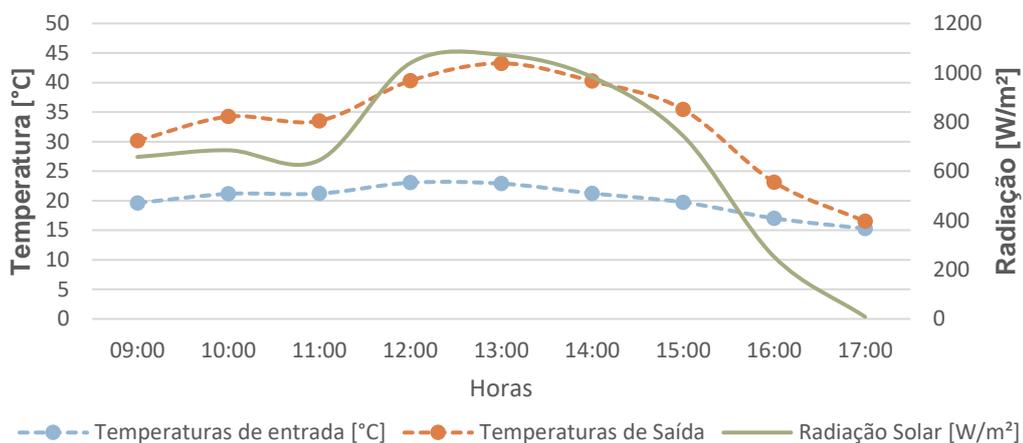
Sobre as temperaturas de saída, os valores mínimo e máximo para essa configuração foram, respectivamente, $17\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$, às 17h do dia 16/jul, e $51\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$, às 14h do dia 19/jul. A média de temperatura de saída ao longo dos dias, com três ventiladores, foi de $36\text{ °C} \pm 4\text{ °C}$. Em 24/jul ocorreu a maior média, no valor de $40\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$, e em 16/jul ocorreu a menor média, no valor de $33\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$. Como mencionado anteriormente, radiação solar influencia fortemente a temperatura de saída, no entanto a maior temperatura não ocorreu no dia de maior média de radiação solar. Esse fato que pode ter ocorrido devido aos menores valores de temperatura de entrada do dia 16/jul.

Figura 23 - Temperaturas de entrada e saída do ar de secagem e radiação incidente no dia 11/jul



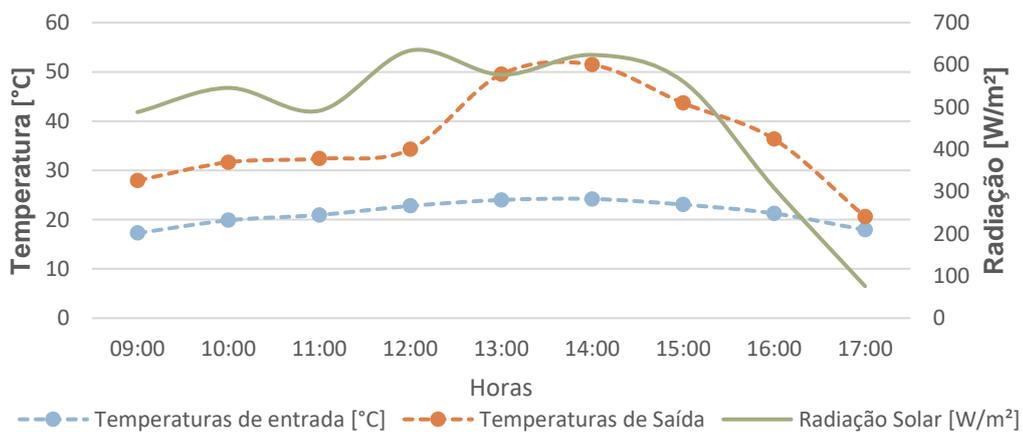
Fonte: O autor.

Figura 24 - Temperaturas de entrada e saída do ar de secagem e radiação incidente no dia 16/jul



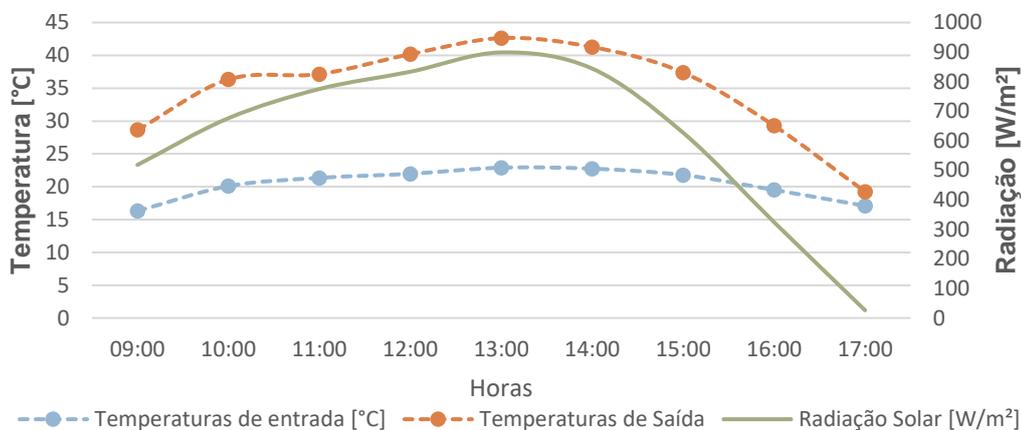
Fonte: O autor.

Figura 25 - Temperaturas de entrada e saída do ar de secagem e radiação incidente no dia 19/jul



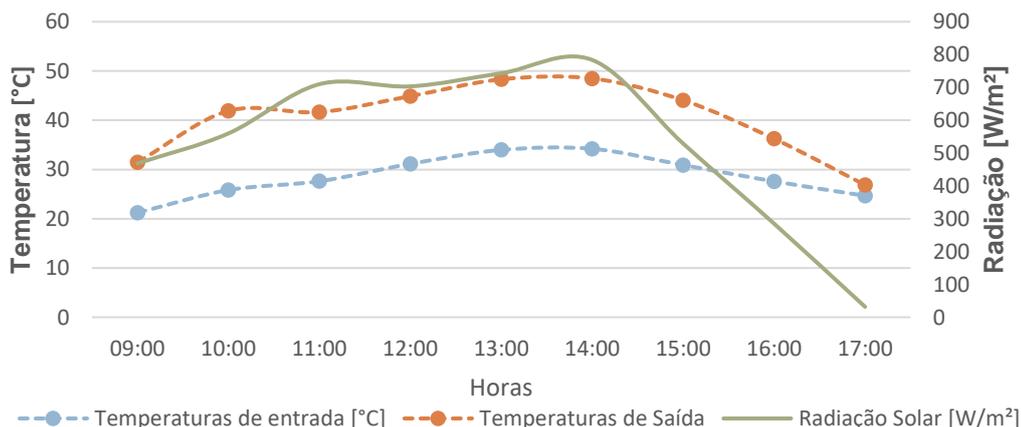
Fonte: O autor.

Figura 26 - Temperaturas de entrada e saída do ar de secagem e radiação incidente no dia 22/jul



Fonte: O autor.

Figura 27 - Temperaturas de entrada e saída do ar de secagem e radiação incidente no dia 24/jul



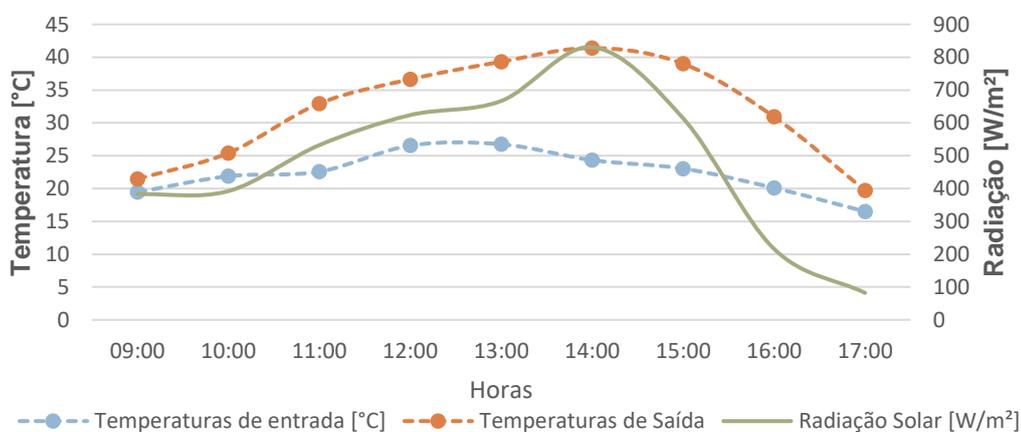
Fonte: O autor.

Para os dias restantes, foi empregado um único ventilador para a realização dos experimentos. São apresentadas nas Figura 28, Figura 29, Figura 30, Figura 31 e Figura 32 as temperaturas de entrada e saída do ar e a radiação solar incidente no secador, para um único ventilador. Analisando as figuras, percebe-se que a radiação solar continua exercendo grande influência sobre a temperatura de saída, assim como na configuração com maior quantidade de ventiladores. Ademais, verifica-se que para todos os dias analisados, as temperaturas de entrada permaneceram entre $14\text{ }^{\circ}\text{C} \pm$

1°C e 33 °C ± 1 °C, com o mínimo ocorrendo no dia 21/jul e máximo ocorrendo no dia 25/jul, às 9h e 12h, respectivamente.

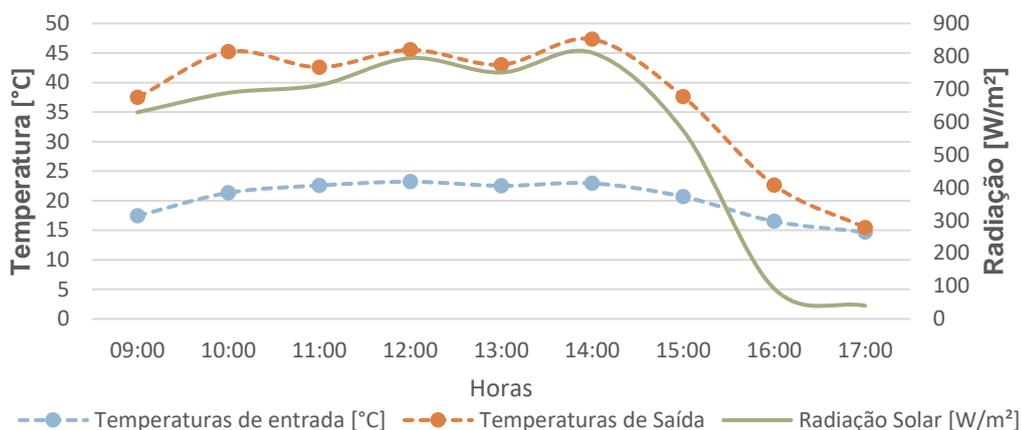
Para a segunda configuração, que utiliza somente um ventilador, os valores mínimo e máximo de temperatura de saída atingiram valores de 15 °C ± 1 °C, às 17h do dia 20/jul, e 54 °C ± 1 °C, às 13h do dia 21/jul, respectivamente. Além disso, a média de temperatura de saída ao longo dos dias foi de 39 °C ± 6 °C, para a segunda configuração. A maior média ocorreu no dia 23/jul, no valor de 44 °C ± 2 °C, e no dia 18/jul ocorreu a menor média, no valor de 32 °C ± 2 °C. Em geral, as temperaturas para esta configuração foram maiores do que quando se utilizou a primeira configuração, três ventiladores.

Figura 28 - Temperaturas de entrada e saída do ar de secagem e radiação incidente no dia 18/jul



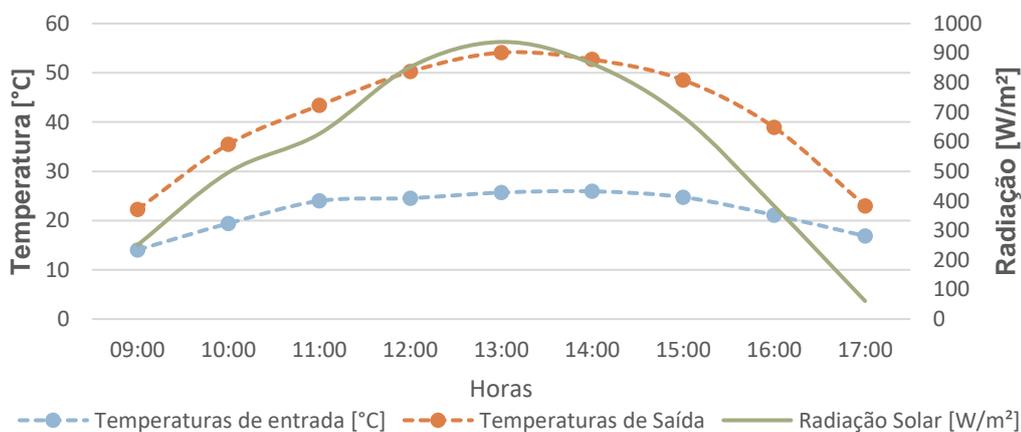
Fonte: O autor.

Figura 29 - Temperaturas de entrada e saída do ar de secagem e radiação incidente no dia 20/jul



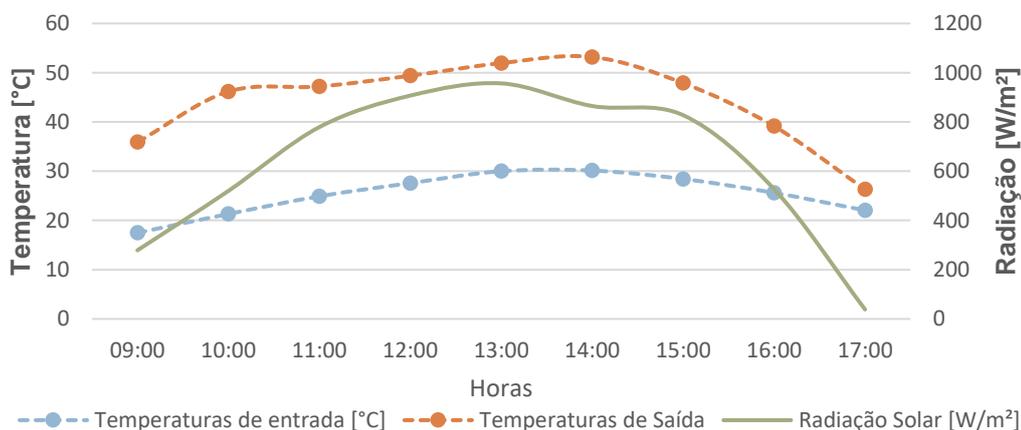
Fonte: O autor.

Figura 30 - Temperaturas de entrada e saída do ar de secagem e radiação incidente no dia 21/jul



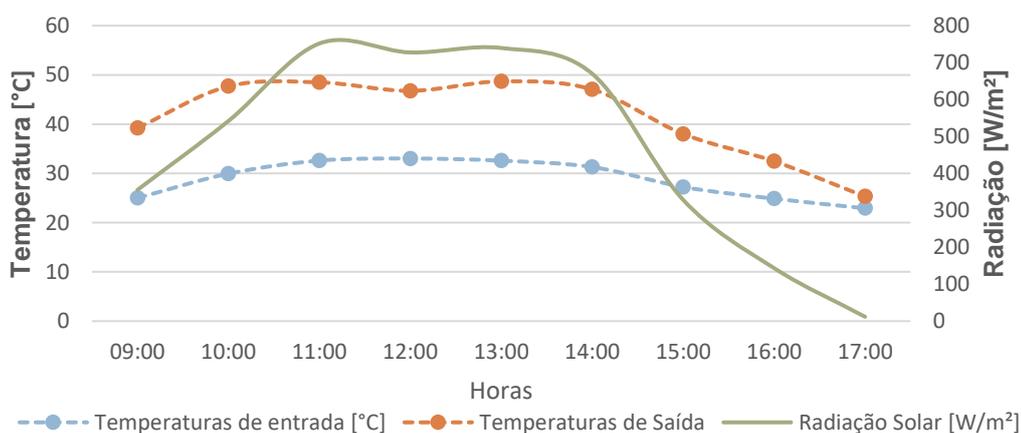
Fonte: O autor.

Figura 31 - Temperaturas de entrada e saída do ar de secagem e radiação incidente no dia 23/jul



Fonte: O autor.

Figura 32 - Temperaturas de entrada e saída do ar de secagem e radiação incidente no dia 25/jul



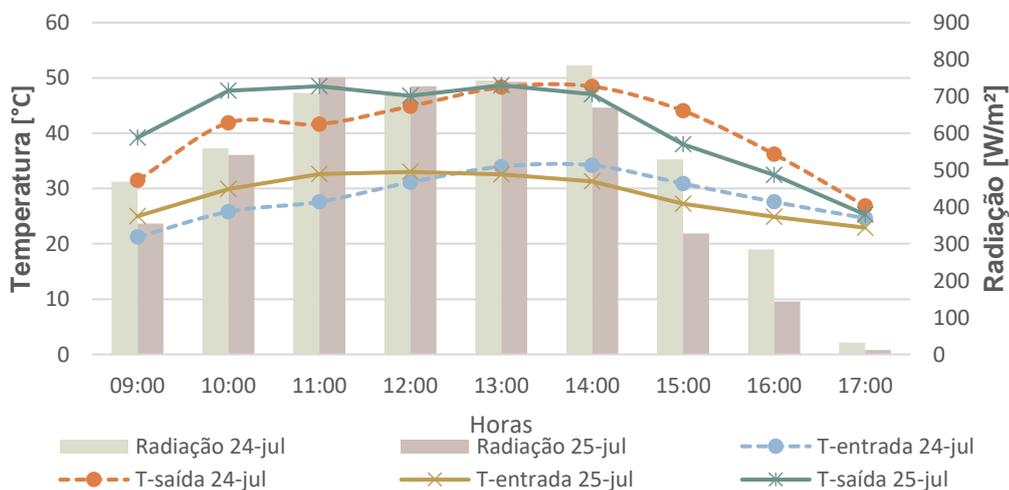
Fonte: O autor.

Além disso, realizou-se uma comparação entre dias semelhantes de cada nível de convecção, visualizada na Figura 33. Nesta figura, é possível observar a radiação solar e as temperaturas de entrada e saída para os dias 24/jul, que utiliza três ventiladores, e 25/jul, que utiliza um único ventilador. Os dias escolhidos possuem médias de temperaturas de entrada e saída semelhantes, respectivamente, $29\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ e $40\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ para o dia 24/jul e $29\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ e $42\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ para o dia 25/jul.

Analisando a temperatura de saída do ar de secagem de ambos os dias, percebe-se a forte influência que a radiação solar exerce sobre a temperatura. No

início do dia 24/jul a temperatura de saída era menor comparada ao dia 25/jul, contudo os níveis de radiação do primeiro dia eram maiores no início, o que permitiu uma rápida elevação na temperatura. Esta rápida elevação estabilizou às 11h, quando a radiação e temperatura de saída do dia 25/jul eram maiores que a do dia 24/jul. Às 13h os níveis de radiação solar dos dois dias em questão se equiparam, assim como seus valores de temperatura de saída do ar de secagem. A partir das 14h os níveis de radiação começam a despencar, da mesma maneira que a temperatura. Todavia, a radiação do dia 25/jul decai mais rapidamente que a do dia 24/jul e o mesmo acontece com a temperatura de saída do secador solar. Com isso, as temperaturas do dia 24/jul permanecem maiores que as do dia 25/jul até o final dos testes. O mesmo padrão ocorre nas temperaturas de entrada do ar de secagem no secador de ambos os dias, pois a radiação solar também possui forte influência sobre o ar externo ao secador.

Figura 33 - Comparação entre os dias 24/jul, três ventiladores, e 25/jul, um ventilador



Fonte: O autor.

Também foi realizada uma comparação entre os dois diferentes níveis de convecção forçada (três ventiladores e um ventilador), que é apresentada na Figura 34. Nesta figura pode-se visualizar as médias de radiação solar e temperatura de entrada e saída do ar de secagem no secador solar para ambos os níveis de convecção.

Ao analisar os dados apresentados, percebe-se que as médias de radiação solar incidente foram maiores para a primeira configuração, com três ventiladores, entre às 9h e 12h e a partir desse horário foram maiores para a segunda configuração,

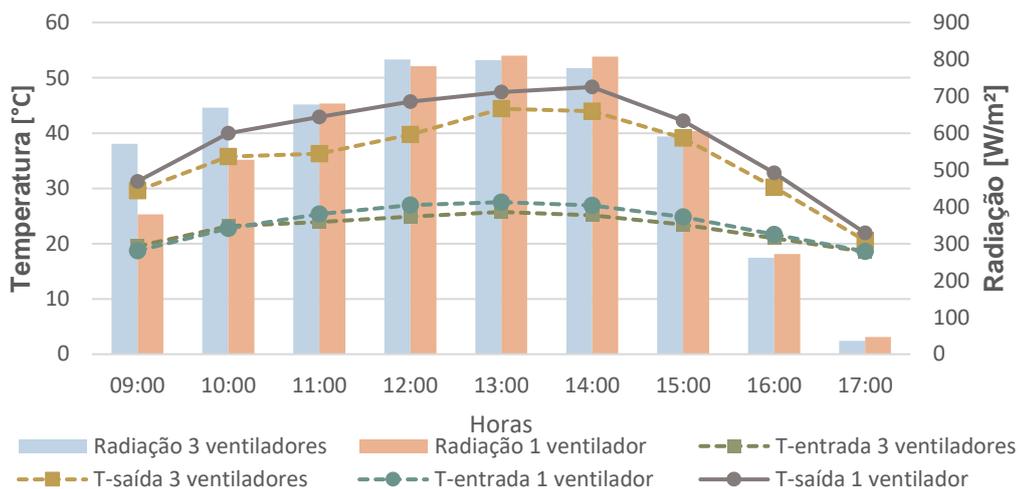
com um ventilador. A média de radiação solar utilizando três ventiladores atingiu um valor de $575,67 \text{ W/m}^2 \pm 44,79 \text{ W/m}^2$ e utilizando um ventilador obteve-se um valor de $545,73 \text{ W/m}^2 \pm 39,76 \text{ W/m}^2$. As médias de temperatura de entrada e saída foram maiores para a segunda configuração, atingindo os valores de $24 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ e $39 \text{ }^\circ\text{C} \pm 6 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente, enquanto que para a primeira configuração alcançou-se os valores de $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ e $36 \text{ }^\circ\text{C} \pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente.

Além do mais, é possível perceber que, durante os testes realizados, a radiação solar foi um agente muito influente para as temperaturas de saída do ar de secagem, mas não o único. Isso porque a configuração com três ventiladores possui maior média de radiação solar, porém não possui a maior média de temperatura de saída do sistema.

A grande diferença entre os dois níveis de convecção forçada é a quantidade de vazão mássica que entra no sistema. Na primeira configuração, com três ventiladores, a velocidade do ar de entrada é de $0,9 \text{ m/s} \pm 0,04 \text{ m/s}$, enquanto que a velocidade do ar de entrada para o segundo nível é de $0,3 \text{ m/s} \pm 0,02 \text{ m/s}$.

Dessa forma, pode-se afirmar que a quantidade de vazão mássica entrando no sistema na primeira configuração é três vezes maior que a quantidade que entra na segunda, de acordo com a equação (3.2). Por fim, é possível explicar porque a média temperatura de saída do ar de secagem para o sistema com três ventiladores é menor, mesmo com maiores níveis de radiação. Esse fato ocorre justamente devido à maior quantidade de ar de secagem que entra no sistema, uma vez que este ar não está aquecido e demanda maiores níveis de energia para aquecer na mesma taxa da segunda configuração.

Figura 34 - Comparação entre dois diferentes níveis de convecção



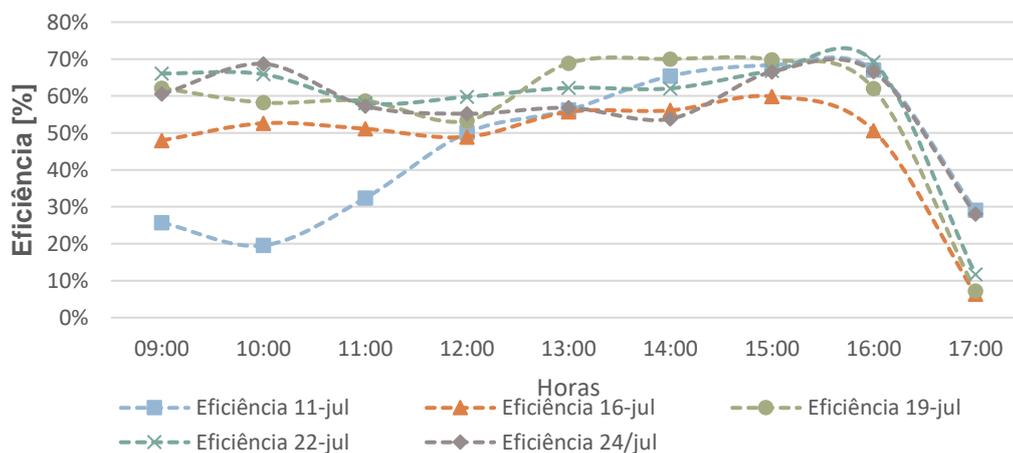
Fonte: O autor.

4.3 ANÁLISE ENERGÉTICA DO SECADOR

4.3.1 Eficiência térmica

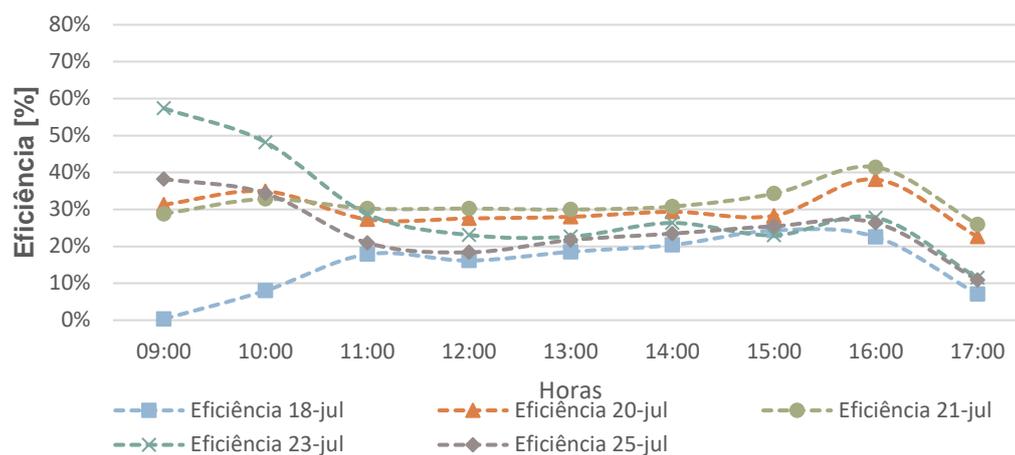
Para determinar a eficiência térmica do secador solar, foi utilizada a equação (3.3), com o método descrito na seção 3.5.1. Na Figura 35 e Figura 36 é possível verificar a média de eficiência para cada hora de experimento e para cada nível de convecção.

Figura 35 - Eficiência térmica do secador solar com três ventiladores



Fonte: O autor.

Figura 36 - Eficiência térmica do secador solar com um ventilador



Fonte: O autor.

Na Figura 35 observa-se a variação da eficiência térmica do secador solar ao longo das horas de experimento com três ventiladores. A eficiência térmica média para essa configuração foi de $53,1\% \pm 14,2\%$. Na Figura 36 observa-se a eficiência térmica do secador solar ao longo das horas para os testes que utilizam somente um ventilador. A eficiência térmica média para essa configuração atingiu $26\% \pm 15,2\%$. Cabe ressaltar que devido à incerteza do módulo LDR, estes dados podem não possuir a precisão apresentada. Às 9h do dia 18/jul a eficiência média alcançou valores próximos a zero, esse fato ocorreu devido à baixa radiação incidente naquele momento do dia. Conseqüentemente, não existiu grande diferença entre as temperaturas de entrada e saída, resultando no valor muito baixo de eficiência.

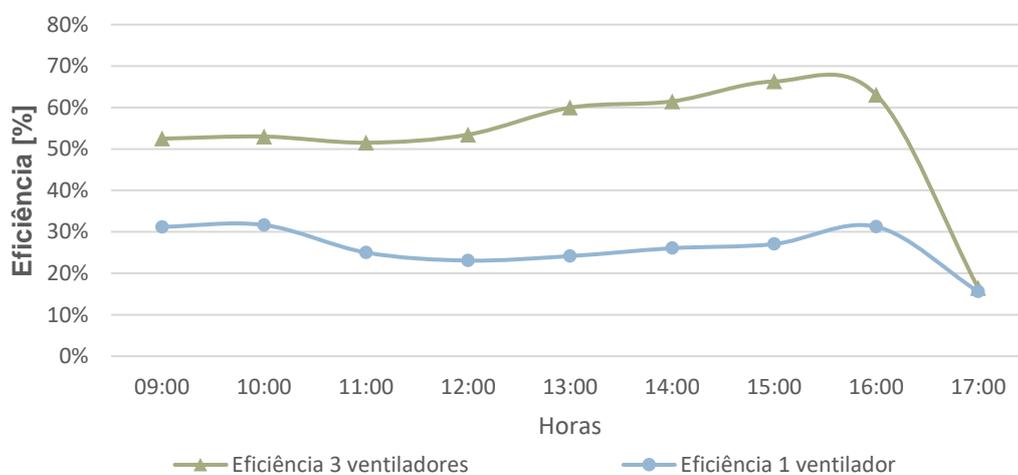
Em seus experimentos com um secador solar indireto, Taborda (2017) alcançou uma eficiência térmica média de 44%. Em sua pesquisa, Banout e Ehl (2011) atingiram valores de 40,98% para a eficiência térmica com seu coletor solar de $0,9 \text{ m}^2$ de área. Com um coletor solar de passagem dupla de ar, Fudholi et al. (2015) encontrou uma eficiência média de 31%. Por fim, utilizando um coletor solar aletado, Yang et al. (2014) obteve uma eficiência térmica média de 42,5%. Valores que podem ser considerados próximos as médias encontradas no presente trabalho.

Na Figura 37 realiza-se uma comparação apresentando em detalhes as médias de eficiência térmica do secador para ambas as configurações. Ao analisar a figura, percebe-se que as duas curvas de média seguem um padrão parecido, possuindo poucas variações ao longo do dia, até que ao fim do experimento a eficiência cai

drasticamente. Fato que ocorre devido as menores diferenças de temperatura de entrada e saída do ar de secagem.

Além disso, percebe-se que o secador solar utilizando três ventiladores tende a ser mais eficiente que a segunda configuração. A diferença entre as eficiências térmicas ocorre devido ao maior nível de convecção forçada na primeira configuração, uma vez que a vazão mássica é três vezes maior e os outros parâmetros da equação (3.3) não variam muito entre os diferentes níveis de convecção. Apesar do sistema com três ventiladores possuir uma vazão mássica três vezes maior, sua eficiência térmica média não segue a mesma proporção, isso ocorre porque a diferença de temperatura entre entrada e saída do secador é maior na segunda configuração (um ventilador).

Figura 37 - Comparação da eficiência térmica média para as duas configurações



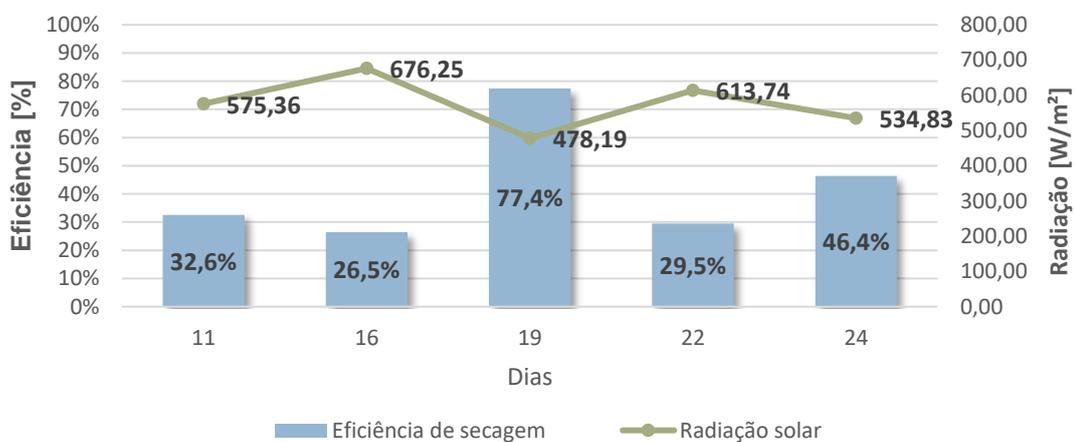
Fonte: O autor.

4.3.2 Eficiência de Secagem

Para determinar a eficiência de secagem média diária do secador solar, utilizou-se o método descrito no item 3.5.2 junto com a equação (3.5), em que a eficiência de secagem é a razão da quantidade de água removida dos tomates e a quantidade de energia fornecida ao sistema. Ao contrário dos outros gráficos apresentados anteriormente, que continham as horas de experimento, nos gráficos desta seção serão apresentados dados da média diária para cada dia de teste. Uma vez que a eficiência de secagem é dependente da quantidade de água removida do

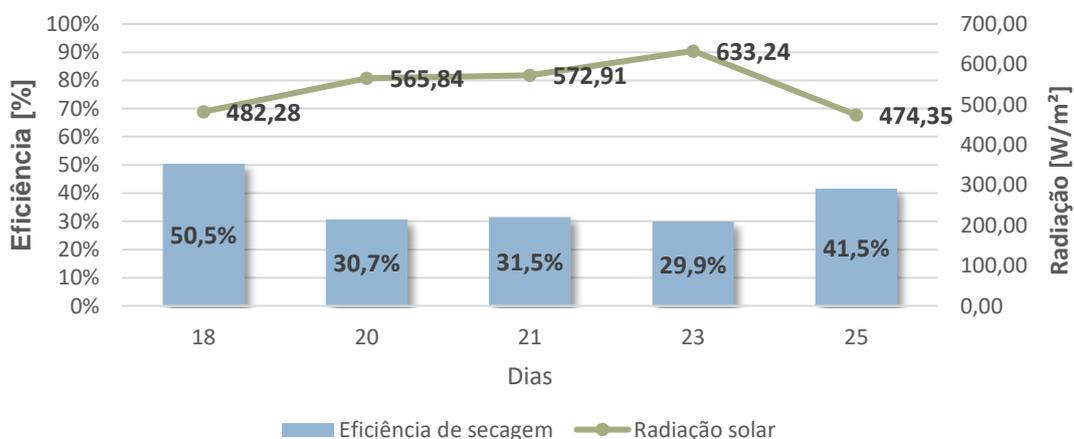
produto, aferida uma única vez por dia, vide equação (3.5), impedindo a discretização horária dos dados. As médias de eficiência de secagem são apresentadas nas Figura 38 e Figura 39.

Figura 38 - Médias de eficiência de secagem e radiação solar para o sistema com três ventiladores



Fonte: O autor.

Figura 39 - Médias de eficiência de secagem e radiação solar para o sistema com um ventilador



Fonte: O autor.

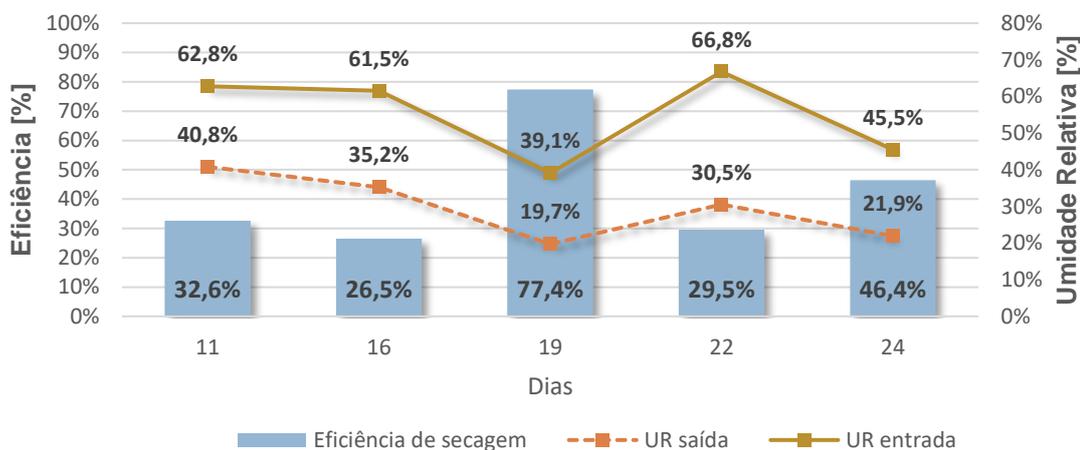
Além disso, observa-se na Figura 38 a média diária de eficiência de secagem e de radiação solar para o primeiro nível de convecção, com três ventiladores. As médias de eficiência permaneceram entre $26,5\% \pm 8,4\%$ e $77,4\% \pm 18,3\%$, e a média para esta configuração foi de $42,5\% \pm 10,5\%$, com o mínimo ocorrendo no dia 16/jul e

o máximo no dia 19/jul, respectivamente. Por outro lado, na Figura 39 são apresentados os dados obtidos para o segundo nível de convecção, com um ventilador. Para esta configuração, as médias de eficiência permaneceram entre $29,9\% \pm 9,0\%$, no dia 23/jul, e $50,5\% \pm 15,1\%$, no dia 18/jul, e a média geral para o segundo nível de convecção foi de $38,4\% \pm 4,8\%$. Hidalgo (2021) obteve uma eficiência de secagem média de $38,3\%$ com seu secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico, o que é um valor próximo às médias encontradas no presente trabalho.

Variáveis como umidade relativa do ar de secagem na entrada e na saída do sistema e radiação solar podem ser utilizadas para explicar os diferentes níveis de eficiência de secagem no secador solar. Nas Figura 40 e Figura 41 são apresentadas as umidades relativas do ar de secagem, na entrada e na saída do sistema, e as eficiências de secagem para aqueles dias. Com isso, percebe-se a forte influência que a umidade relativa do ar que entra no sistema exerce sobre a eficiência. Quanto menor for o valor da umidade relativa do ar (UR), maior será a capacidade deste ar de transportar umidade e mais eficiente será a secagem. Por conta disso, os dias que alcançaram uma eficiência maior que 40% são justamente aqueles que possuem menores índices de UR na entrada e na saída do secador solar.

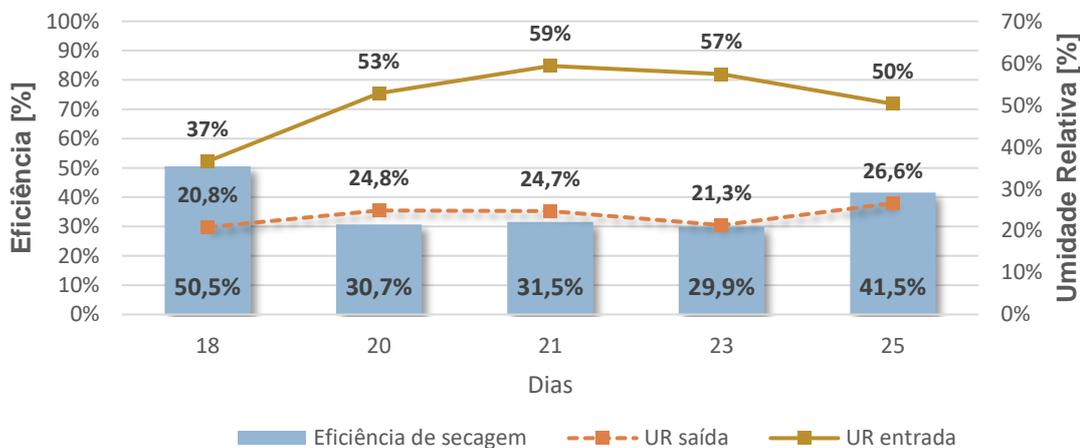
Além disso, a radiação solar incidente sobre o sistema (Figura 38 e Figura 39) também exerce certa influência sobre a eficiência de secagem do secador solar, sendo ela inversamente proporcional a eficiência, vide equação (3.5). Logo, um nível elevado de radiação solar tende a diminuir a eficiência de secagem, como ocorreu no dia 16/jul. No entanto, a radiação solar só causa esse efeito quando existem altos índices de umidade relativa do ar e o ar não tem capacidade para remover moléculas de água presentes na superfície do tomate.

Figura 40 - Médias de eficiência de secagem e umidade relativa de entrada e saída para o sistema com três ventiladores



Fonte: O autor.

Figura 41 - Médias de eficiência de secagem e umidade relativa de entrada e saída para o sistema com um ventilador

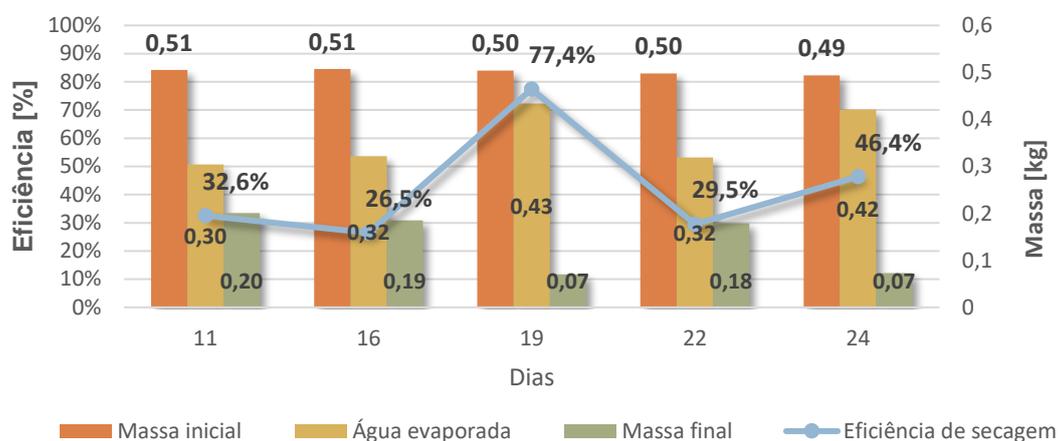


Fonte: O autor.

4.4 MASSAS E QUANTIDADE DE ÁGUA REMOVIDA DOS TOMATES

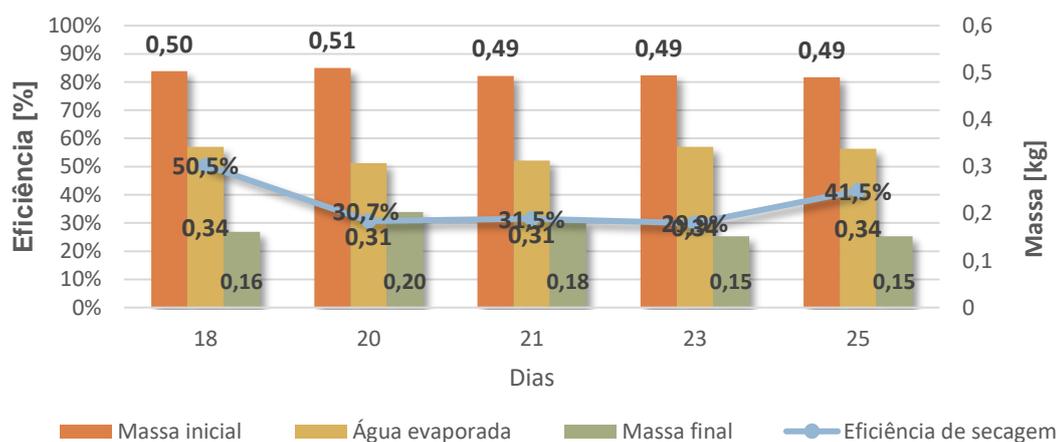
Como descrito no item 3.3, os tomates tiveram sua massa aferida antes do início e depois de concluído o processo de secagem, a fim de determinar a quantidade de água removida. Nas Figura 42 e Figura 43, é possível visualizar a quantidade de massa inicial, a quantidade de massa final, a quantidade de água evaporada dos tomates e a eficiência de secagem para cada um dos dias de experimento.

Figura 42 - As quantidades de massa do sistema e a eficiência de secagem para três ventiladores



Fonte: O autor.

Figura 43 - As quantidades de massa do sistema e a eficiência de secagem para um único ventilador



Fonte: O autor.

Observa-se na Figura 42, sistema com três ventiladores, que a quantidade inicial de massa esteve sempre entre $0,49 \text{ kg} \pm 0,001 \text{ kg}$ e $0,51 \text{ kg} \pm 0,001 \text{ kg}$, com uma média de aproximadamente $0,50 \text{ kg} \pm 0,005 \text{ kg}$. A massa final variou de $0,07 \text{ kg} \pm 0,001 \text{ kg}$ a $0,2 \text{ kg} \pm 0,001 \text{ kg}$, com uma média de $0,14 \text{ kg} \pm 0,02 \text{ kg}$ e a quantidade de água evaporada dos tomates variou de $0,30 \text{ kg} \pm 0,001 \text{ kg}$ a $0,43 \text{ kg} \pm 0,001 \text{ kg}$, possuindo uma média de $0,36 \text{ kg} \pm 0,056 \text{ kg}$. Além disso a porcentagem de redução de massa, que compara a massa inicial com a massa final, esteve entre os valores de 60,20% e 86,11%, obtendo uma média de 68,90% de massa reduzida.

Por outro lado, observa-se na Figura 43, sistema com um ventilador, a quantidade de massa inicial teve um mínimo de $0,49 \text{ kg} \pm 0,001 \text{ kg}$ e um máximo de $0,51 \text{ kg} \pm 0,001 \text{ kg}$, com uma média aproximada de $0,49 \text{ kg} \pm 0,007 \text{ kg}$. A massa final variou entre $0,16 \text{ kg} \pm 0,001 \text{ kg}$ e $0,2 \text{ kg} \pm 0,001 \text{ kg}$, atingindo um valor médio de $0,17 \text{ kg} \pm 0,02 \text{ kg}$ e a quantidade de água removida dos tomates variou entre $0,31 \text{ kg} \pm 0,001 \text{ kg}$ e $0,34 \text{ kg} \pm 0,001 \text{ kg}$, com isso atingiu-se uma média de $0,33 \text{ kg} \pm 0,015 \text{ kg}$ de água evaporada. A porcentagem de redução de massa obteve um mínimo de 60,20% e um máximo de 69,23%, atingindo uma média de 65,98% de quantidade de massa reduzida.

Por fim, percebe-se que o sistema utilizando três ventiladores foi capaz de remover mais água do que o sistema com um único ventilador. Esse fato ocorreu devido aos menores índices de umidade relativa do ar de secagem, que possuem grande influência sobre a eficiência de secagem. Outro fator influente é a quantidade de vazão mássica de ar entrando no sistema, uma vez que a maior quantidade representa uma maior capacidade de remoção de umidade.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho consistiu na construção e na avaliação do desempenho de um secador solar direto de tipo ativo para secagem de tomates. A partir de medições de temperatura, umidade relativa do ar, vazão mássica de ar, massa da cultura em questão (tomates) e radiação solar, foi possível determinar as eficiências térmica e de secagem, bem como analisar diversos aspectos do processo de secagem. As análises foram conduzidas mediante dois níveis de convecção forçada: (i) utilizando três ventiladores e (ii) utilizando apenas um ventilador.

De modo geral, a configuração do sistema que alcançou as maiores médias de temperatura de saída foi a com um ventilador, mantendo uma média de $39\text{ °C} \pm 6\text{ °C}$ e atingindo um valor máximo de $54\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ na saída do secador solar. Já para o secador utilizando três ventiladores, foi alcançada uma média de $36\text{ °C} \pm 4\text{ °C}$, com o valor máximo de $51\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$. As maiores temperaturas ocorreram nos horários em que o fluxo de radiação solar foi mais intenso, próximo às 12h e 14h do dia.

Sobre a eficiência térmica do secador solar, é possível afirmar que foram atingidos valores satisfatórios para ambas as configurações utilizadas, ao se considerar as particularidades individuais de cada sistema. Durante os testes utilizando três ventiladores, obteve-se uma eficiência térmica média de $53,1\% \pm 14,2\%$, enquanto que para os ensaios onde somente um ventilador foi utilizado, houve uma redução na eficiência térmica média que atingiu o valor de $26,12\% \pm 15,2\%$. Logo, o secador solar na primeira configuração, com três ventiladores, tende a ser mais eficiente do que o sistema utilizando apenas um ventilador.

Além disso, tanto a configuração com três ventiladores, quanto a configuração com um único ventilador apresentaram valores satisfatórios de eficiência de secagem. A primeira obteve uma média de eficiência de secagem de $42,5\% \pm 10,5\%$, enquanto que a segunda manteve uma média de $38,4\% \pm 4,8\%$, valores esses semelhantes aos encontrados por Hidalgo (2021).

Ademais, destaca-se algumas limitações encontradas durante a realização da pesquisa que deu origem a este trabalho. Com relação às limitações, uma delas foi a falta de informações relacionadas a incerteza do módulo LDR, que impacta diretamente nos dados de radiação e nos cálculos de eficiência térmica e de secagem. Por conta disso, os resultados deste trabalho podem não apresentar a precisão

esperada, principalmente se forem comparados a sistemas de aquisição de dados profissionais.

Enfim, o secador solar construído neste trabalho apresenta uma construção fácil e de baixo custo, uma vez que utiliza materiais simples como a madeira e o vidro. Além disso, ele é ideal para a produção de diversas variedades de alimentos secos em pequena escala, pois utiliza pouco espaço e apresenta bons níveis de eficiência de secagem. De modo geral, o sistema de aquisição de dados também apresenta baixo custo e fácil implementação, principalmente quando comparado aos equipamentos de nível profissional.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de continuar a pesquisa iniciada neste trabalho, indica-se:

- Realizar os mesmos experimentos, porém com equipamentos mais precisos, como pirômetros e termopares, para obter dados mais confiáveis;
- Realizar os mesmos experimentos em outra estação do ano, como o verão, e comparar os resultados com os obtidos neste trabalho;
- Realizar um estudo com o objetivo de determinar a capacidade de alimento que este equipamento consegue secar sem apresentar grandes perdas na eficiência de secagem;
- Avaliar as eficiências do secador solar ao se utilizar outros tipos de alimento, como grãos ou cogumelos;
- Realizar o estudo de viabilidade econômica de implantação deste modelo de secador solar para pequenos agricultores, considerando gastos em matéria-prima e consumo energético dos ventiladores.

REFERÊNCIAS

AKPINAR, E. K. Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: Modelling, performance analyses. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 12, p. 2407-2418, 2010.

ALBERTAZZI JUNIOR, Armando; SOUSA, André R.. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. 2. ed. Florianópolis: Manole, 2017.

ALISSON, Elton. Proálcool: uma das maiores realizações do Brasil baseadas em ciência e tecnologia. 2016. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/proalcool-uma-das-maiores-realizacoes-do-brasil-baseadas-em-ciencia-e-tecnologia/24432/>. Acesso em: 18 jan. 2022.

AMERI, B. et al. Comparative approach to the performance of direct and indirect solar drying of sludge from sewage plants, experimental and theoretical evaluation. **Solar Energy**, v. 159, p. 722–732, 2018.

ANDRADE, Pietra Isabele Ferreira de. **Análise da Distribuição Espacial e Temporal da Radiação Solar na Região Sul Litorânea e Serrana de Santa Catarina a partir de Estações Meteorológicas de Superfície**. 2020. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/218717/TCC%20Engenharia%20de%20Energia%20Pietra%20de%20Andrade.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 26 fev. 2022.

ARAUJO, Fernanda Souza *et al.* Beneficiando hortaliças: a desidratação como forma de agregar valor à produção agroecológica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROECOLOGIA, SÃO CRISTÓVÃO, SERGIPE, 11., 2020, Sergipe. **Anais [...]**. São Cristóvão: Desconhecida, 2020. v. 15, p. 1-5. Disponível em: <http://cadernos.aba-agroecologia.org.br/cadernos/article/view/4749/3148>. Acesso em: 26 fev. 2022.

AUFRANC, Jean-Luc. **ESP8266 and ESP32 Differences in One Single Table**. 2016. Disponível em: <https://www.cnx-software.com/2016/03/25/esp8266-and-esp32-differences-in-one-single-table/>. Acesso em: 26 fev. 2022.

BABAGANA, Gutti; SILAS, Kiman; MUSTAFA, B. G. Design and construction of forced/natural convection solar vegetable dryer with heat storage. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 7, n. 10, p. 5-6, 2012.

BANOUT, Jan; EHL, Petr. Using a Double-pass solar drier for drying of bamboo shoots. **Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics (JARTS)**, v. 111, n. 2, p. 119-127, 2011.

BAÚ DA ELETRÔNICA. **Sensor de Luz LDR**. Disponível em: <https://www.baudaeletronica.com.br/sensor-de-luz.html?gclid=CjwKCAiAI->

6PBhBCEiwAc2GOVG0J9GkeKxDyKNLIgofVA7xQMz1cV4r6F2_9w620MrCChfucC7X6HxoCuKIQAxD_BwE. Acesso em: 26 fev. 2022.

BELESSIOTIS, V.; DELYANNIS, E. Solar drying. **Solar Energy**, v. 85, n. 8, p. 1665–1691, 2011.

BENAMOUN, L.; LI, J. Drying Process of Food: Fundamental Aspects and Mathematical Modeling. In: GRUMEZESCU, A. M.; HOLBAN, A. M. (ed.) **Natural and Artificial Flavoring Agents and Food Dyes**. Elsevier Inc. All, 2018. Cap 2, p 29-82.

BOLAJI, Bukola Olalekan. **Design and Performance Evaluation of a Solar Poultry Egg Incubator**. 2008.

BORGES, Nycollas Kaíque de Paula Castilho. **Desenvolvimento de Estação Solarimétrica de Baixo Custo**. 2021. 79 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Itumbiara, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ifg.edu.br/bitstream/prefix/635/1/TCC%20Engenharia%20Elétrica%20Itumbiara%202021%20-%20Nycollas%20Kaíque%20de%20Paula%20Castilho%20Borges.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2022.

BOSCH SENSORTEC. **BME280**. Disponível em: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2022.

BOUGHALI, S. et al. Crop drying by indirect active hybrid solar – electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara. **Solar Energy**, v. 83, n. 12, p. 2223-2232, 2009.

CARRION, Patrícia; QUARESMA, Manuela. **Internet da Coisas (IoT): Definições e aplicabilidade aos usuários finais**, Internet of Things (IoT): Definitions and applicability for end users. [s. l.], p. 49–66, 2019.

CARVALHO, Vicente Bueno. **Desenvolvimento e Teste de um Monitor de Barramento I2C para Proteção Contra Falhas Transientes**. [s. l.], 2016. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/150164>> Acesso em: 25 de fevereiro. 2022.

CHAVAN, A. et al. Natural convection and direct type (NCDT) solar dryers: a review. **Drying Technology**, p. 1-22, 2020.

CHEN, X. D. Food drying fundamentals. In: CHEN, X. D.; MUJUMDAR, A. S. (ed.) **Drying Technologies in Food Processing**. 1. ed., © 2008 Blackwell Publishing Ltd, 2008. Cap. 1, p. 25-54.

DISSA, A. O. et al. Experimental characterisation and modelling of thin layer direct solar drying of Amelie and Brooks mangoes. **Energy**, v. 36, n. 5, p. 2517-2527, 2011.

DJEBLI, A. et al. Modeling and comparative analysis of solar drying behavior of potatoes. **Renewable Energy**, v. 145, p. 1494-1506, 2020.

EKECHUKWU, O. V.; NORTON, B. Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. **Energy Conversion and Management**, v. 40, n. 6, p. 615- 655, 1999.

EL KHADRAOUI, A. et al. Drying of red pepper slices in a solar greenhouse dryer and under open sun: Experimental and mathematical investigations. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 52, p. 262-270, 2019.

EL-SEBAIL, A. A.; SHALABY, S. M. Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint. **Energy Conversion and Management**, v. 74, p. 109-116, 2013.

EMEDIX. **Valor nutricional dos alimentos: tomate.** tomate. Disponível em: http://www.emedix.com.br/dia/ali006_1f_tomate.php. Acesso em: 25 fev. 2022.

Espressif Systems. **ESP32 Datasheet.** 8 out. 2016. Disponível em: https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet_ESP8266_esp32_en.pdf; Acesso em: 26 fev. 2022.

FUDHOLI, A. et al. Review of solar dryers for agricultural and marine products. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 14, n. 1, p.1-30, jan. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.032>.

FUDHOLI, Ahmad et al. Drying of Malaysian Capsicum annum L.(red chili) dried by open and solar drying. **International Journal of Photoenergy**, v. 2013, 2013.

FUDHOLI, Ahmad et al. Performances and improvement potential of solar drying system for palm oil fronds. **Renewable Energy**, v. 78, p. 561-565, 2015.

GARCÍA, S. V. et al. Influence of Drying Temperature on the Physical and Microbiological Parameters and the Quality of Dried Green Onion. **Drying Technology**, v. 28, n. 12, p. 1435-1444, 2010.

HIDALGO, Letícia Ferraresi. **Avaliação de processo em secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico: aplicação para secagem de alimentos.** 2021. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/14003/Dissertação%20de%20Mestrado_Letícia%20Ferraresi%20Hidalgo.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 25 fev. 2022.

HOSSAIN, M. A.; AMER, B. M. A.; GOTTSCHALK, K. Hybrid solar dryer for quality dried tomato. **Drying Technology**, v. 26, n. 12, p. 1591-1601, 2008.

IMRE, L. Solar Drying. In: MUJUMDAR, A. S. (ed.) **Handbook of Industrial Drying**. 3. ed., Boca Raton: Taylor & Francis, Inc., 2006. Cap. 13, p. 307-361.

INYANG, U. E.; OBOH, I. O.; ETUK, B. R. Kinetic Models for Drying Techniques—Food Materials. **Advances in Chemical Engineering and Science**, v. 8, n. 2, p. 27-48, 2018.

INTRODUCTION to I2C and SMBus. Disponível em: <https://www.kernel.org/doc/html/latest/i2c/summary.html>. Acesso em: 25 fev. 2022.

ISLAM, M. et al. Effect of cover design on moisture removal rate of a cabinet type solar dryer for food drying application. **Energy Procedia**, v. 160, p. 769-776, 2019.

JEMRF DOCUMENTATION. **Blynk Integration**. 2020. Disponível em: <https://jemrf.github.io/RF-Documentation/blynk.html>. Acesso em: 26 fev. 2022.

JORNAL DA USP. **Cor de telhados e fachadas pode influenciar temperatura das cidades**. 2019. Adaptado de Tatiana Zanon. Disponível em: <https://jornal.usp.br/?p=222988>. Acesso em: 26 fev. 2022.

KOUHILA, M. et al. Drying characteristics and kinetics solar drying of Mediterranean mussel (*mytilus galloprovincialis*) type under forced convection. **Renewable Energy**, v. 147, n. 1, p. 833-844, 2020.

LABRECQUE, David et al. Portable Device Validation to Study the Relation between Motor Activity and Language: Verify the Embodiment Theory through Grip Force Modulation. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, v. 5, n. 12, p. 5-10, 2016.

LINGAYAT, A. B. et al. A review on indirect type solar dryers for agricultural crops – Dryer setup, its performance, energy storage and important highlights. **Applied Energy**, v. 258, n. 15, 114005258, 2020.

MARTINAZZO, A. P. et al. Drying kinetics and microbiological quality of green onions. **Revista Ceres**, v. 63, n. 6, p. 769-774, 2016.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. Drying of solids. In: _____. Unit Operations of Chemical Engineering. 5. ed., McGraw-Hill, Inc., 1993. Cap. 24, p. 767-809.

MICHELON, Andre. **IeC Clock 1**. Disponível em: <https://thingspeak.com/channels/141950>. Acesso em: 26 fev. 2022.

MOHANA, Y. et al. Solar dryers for food applications: Concepts, designs, and recent advances. **Solar Energy**, v. 208, p. 321-344, 2020.

NOURHÈNE, B.; MOHAMMED, K.; NABIL, K. Experimental and mathematical investigations of convective solar drying of four varieties of olive leaves. **Food and Bioproducts Processing**, v. 86, n. 3, p. 176-184, 2008.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. Atlas

brasileiro de energia solar. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>.

PROTOSUPPLIES. **ESP8266 D1 R2 WiFi Processor with Uno Footprint**. Disponível em: <https://protosupplies.com/product/esp8266-d1-r2-wifi-processor-with-uno-footprint/>. Acesso em: 26 fev. 2022.

RABHA, D. K.; MUTHUKUMAR, P. Performance studies on a forced convection solar dryer integrated with a paraffin wax-based latent heat storage system. **Solar Energy**, v. 149, p. 214-226, 2017.

REYES, A.; MAHN, A.; VÁSQUEZ, F. Mushroom dehydration in a hybrid-solar dryer, using a phase change material. **Energy Conversion and Management**, v. 83, n. 11, p. 241- 248, 2014.

REYES, A. et al. Mushroom dehydration in a hybrid-solar dryer. **Energy Conversion and Management**, v. 70, p. 31-39, 2013.

ROMULI, S. et al. Technical Performance of an Inflatable Solar Dryer for Drying Amaranth Leaves in Kenya. *Applied Sciences*, v. 9, n. 16, 3431, 2019.

SALLAM, Y. I. et al. Solar drying of whole mint plant under natural and forced convection. **Journal of Advanced Research**, v. 6, n. 2, p. 171-178, 2013.

SAFIRATEC.COM.BR. **Placa Esp32 Wroom32 Cp2102 Wifi Bluetooth 38 Pinos**. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1333093418-placa-esp32-wroom32-cp2102-wifi-bluetooth-38-pinos-_JM?quantity=1. Acesso em: 26 fev. 2022.

SAMI, S.; RAHIMI, A.; ETESAMI, N. Dynamic Modeling and a Parametric Study of an Indirect Solar Cabinet Dryer. **Drying Technology**, v. 29, n. 7, p. 825-835, 2011.

SANTIAGO, G. L. S. **Desenvolvimento de um medidor de radiação solar de baixo custo**. 2014. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2014.

SEERANGURAYAR, T. et al. Effect of solar drying methods on color kinetics and texture of dates. **Food and Bioproducts Processing**, v. 116, p. 227-239, 2019.

SENSOR de Pressão Umidade e Temperatura BME280 5V 4 Pinos. Disponível em: <https://www.saravati.com.br/sensor-de-pressao-bmp280-barometrico-gybmep-5v-4-pinos>. Acesso em: 20 jan. 2022.

STUDIOPIETERS. **ESP32 – PinOut**. Disponível em: <https://www.studiopieters.nl/esp32-pinout/>. Acesso em: 26 fev. 2022.

SYSTEMS, Espressif. **ESP32 Series (Datenblatt)**. [s. l.], 2018.

TABORDA, Diego de Mendonça. **Uso de energia solar para o aquecimento do ar em secadores de grãos**. 2017. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João del Rei, São João del Rei, 2017. Disponível em:

<https://ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/mestradoenergia/Dissertacoes/2015/Dissertacao%20-%20Diego%20Taborda.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2022.

TÉLLEZ, M. C. et al. Solar drying of Stevia (*Rebaudiana Bertoni*) leaves using direct and indirect technologies. **Solar Energy**, v. 159, p. 898-907, 2018.

THAM, T. C. et al. Effect of ambient conditions on drying of herbs in solar greenhouse dryer with integrated heat pump. **Drying Technology**, v. 35, n. 14, p. 1721-1732, 2017.

TIWARI, A. A Review on Solar Drying of Agricultural Produce. **Journal of Food Processing and Technology**, v. 7, n. 9, 1000623, 2016.

TOMAR, V.; TIWARI, G. N.; NORTON, B. Solar dryers for tropical food preservation: Thermophysics of crops, systems and components. **Solar Energy**, v. 154, p. 2-13, 2017.

TUNDE-AKINTUNDE, T. Y. Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper. **Renewable Energy**, v. 36, n. 8, p. 2139-2145, 2011.

UDOMKUN, P. et al. Review of solar dryers for agricultural products in Asia and Africa: An innovation landscape approach. **Journal of Environmental Management**, v. 268, 110730, 2020.

VIEIRA, Romênia Gurgel *et al.* MEDIÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL UTILIZANDO SENSOR LDR. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Mossoró, v. 1, n. 7, p. 48-54, abr. 2015. Disponível em: <https://revistas2.uepg.br/index.php/ret/article/view/11382/209209209348>. Acesso em: 26 fev. 2022.

VIJAYAVENKATARAMAN, S.; INIYAN, S.; GOIC, R. **A review of solar drying technologies.** **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p. 2652-2670, 2012.

YANG, Ming et al. Design and optimization of a solar air heater with offset strip fin absorber plate. **Applied Energy**, v. 113, p. 1349-1362, 2014.

APÊNDICE A - CÓDIGO ESP32

```
#define BLYNK_PRINT Serial

#include <WiFi.h> // Wi-Fi

#include <WiFiClient.h> // Wi-Fi client

#include <SPI.h>

#include <Wire.h>

#include <Adafruit_GFX.h>

#include <Adafruit_Sensor.h>

#include <Adafruit_BME280.h>

#include <BlynkSimpleEsp32.h>

BlynkTimer timer;

#define SDA_2 33
#define SCL_2 32

Adafruit_BME280 bme; //entrada
Adafruit_BME280 bme1; //saida

char auth[] = "XFtXcVeILsKwl8WAXB8sGiyjlaBw1Y9i";
char ssid[] = ""; //coloque aqui o nome da rede que se deseja conectar
char pass[] = ""; //coloque aqui a senha da rede que se deseja conectar
```

```
void sendSensor() {  
    //bme entrada  
  
    float temperature = bme.readTemperature();  
    float humidity = bme.readHumidity();  
  
    //bme1 saida  
    float temperature1 = bme1.readTemperature();  
    float humidity1 = bme1.readHumidity();  
  
    Blynk.virtualWrite(V1, temperature);  
    Blynk.virtualWrite(V2, humidity);  
    Blynk.virtualWrite(V3, temperature1);  
    Blynk.virtualWrite(V4, humidity1);  
  
}  
  
void setup() {  
  
    Serial.begin(115200);  
    Blynk.begin(auth, ssid, pass);  
    timer.setInterval(1000 L, sendSensor);  
  
    Wire.begin();  
    Wire1.begin(SDA_2, SCL_2);  
  
    bool status = bme.begin(0x76);  
    if (!status) {  
        Serial.println("Sensor BME280 não encontrado, verificar cabeamento!");  
        while (1);  
    }  
  
    bool status1 = bme1.begin(0x76, & Wire1);
```

```
if (!status1) {  
    Serial.println("Sensor BME280_1 não encontrado, verificar cabeamento!");  
    while (1);  
}  
delay(2000);  
  
}  
void loop() {  
    Blynk.run();  
    timer.run();  
  
    delay(100);  
}
```

APÊNDICE B - CÓDIGO WEMOS D1 R2

```

#include <ESP8266WiFi.h>

#include<math.h>

//defines
#define SSID_REDE "" //coloque aqui o nome da rede que se deseja conectar
#define SENHA_REDE "" //coloque aqui a senha da rede que se deseja
conectar
#define INTERVALO_ENVIO_THINGSPEAK 60000 //intervalo entre envios de
dados ao ThingSpeak (em ms)

//constantes e variáveis globais
char EnderecoAPIThingSpeak[] = "api.thingspeak.com";
String ChaveEscritaThingSpeak = "";
long lastConnectionTime;
WiFiClient client;

//prototypes
void EnviaInformacoesThingspeak(String StringDados);
void FazConexaoWiFi(void);
float FazLeituraLDR(void);

/*
  Implementações
*/

//Função: envia informações ao ThingSpeak
//Parâmetros: String com a informação a ser enviada
//Retorno: nenhum
void EnviaInformacoesThingspeak(String StringDados) {
  if (client.connect(EnderecoAPIThingSpeak, 80)) {

```

```

//faz a requisição HTTP ao ThingSpeak
client.print("POST /update HTTP/1.1\n");
client.print("Host: api.thingspeak.com\n");
client.print("Connection: close\n");
client.print("X-THINGSPEAKAPIKEY: " + ChaveEscritaThingSpeak + "\n");
client.print("Content-Type: application/x-www-form-urlencoded\n");
client.print("Content-Length: ");
client.print(StringDados.length());
client.print("\n\n");
client.print(StringDados);

lastConnectionTime = millis();
Serial.println("- Informações enviadas ao ThingSpeak!");
}
}

```

```

//Função: faz a conexão WiFi
//Parâmetros: nenhum
//Retorno: nenhum
void FazConexaoWiFi(void) {
  client.stop();
  Serial.println("Conectando-se à rede WiFi...");
  Serial.println();
  delay(1000);
  WiFi.begin(SSID_REDE, SENHA_REDE);

  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }

  Serial.println("");
  Serial.println("WiFi conectado com sucesso!");
  Serial.println("IP obtido: ");

```

```
Serial.println(WiFi.localIP());

delay(1000);
}

//Função: faz a leitura do LDR
//Retorno: Valor analógico LDR (0 - 1023)

float FazLeituraLDR(void) {
    int ValorLDR;
    float tensao;
    float rad;

    ValorLDR = analogRead(A0); //1023 -> 5V
    Serial.print("[Leitura LDR] ");
    Serial.println(ValorLDR);

    tensao = ValorLDR * (5.0 / 1023);
    Serial.print("[Tensao] ");
    Serial.print(tensao);
    Serial.println("V");

    rad = 4464.9 * exp(-17.73 * tensao);
    Serial.print("[radiação] ");
    Serial.print(rad);
    Serial.println("W/m²");

    return ValorLDR;
}

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    lastConnectionTime = 0;
    FazConexaoWiFi();
}
```

```

    Serial.println("Planta IoT com ESP8266 WemosD1");
}

//loop principal
void loop() {
    float ValortensaoLida;
    float ValorLDRTruncado;
    char FieldTensao[11];

    //Força desconexão ao ThingSpeak (se ainda estiver desconectado)
    if (client.connected()) {
        client.stop();
        Serial.println("- Desconectado do ThingSpeak");
        Serial.println();
    }

    ValortensaoLida = FazLeituraLDR();
    ValorLDRTruncado = (int) ValortensaoLida; //trunca Tensão como número
racional

    //verifica se está conectado no WiFi e se é o momento de enviar dados ao
ThingSpeak
    if (!client.connected() &&
        (millis() - lastConnectionTime > INTERVALO_ENVIO_THINGSPEAK)) {
        sprintf(FieldTensao, "field1=%d", ValorLDRTruncado);
        EnviaInformacoesThingspeak(FieldTensao);
    }

    delay(1000);
}

```

APÊNDICE C - SECADOR SOLAR EM FUNCIONAMENTO

Figura 44 - Vista superior do secador em funcionamento



Fonte: O autor.

Figura 45 - Tomates enquanto o secador solar está em funcionamento



Fonte: O autor.

Figura 46 - Tomates secos após o processo de secagem



Fonte: O autor.