



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

**DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE UM SECADOR
SOLAR DE FRUTAS UTILIZANDO O MÉTODO DO
PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL FATORIAL**

ÍTALO DE ANDRADE GOMES

CAMPINA GRANDE - PB

2021

ÍTALO DE ANDRADE GOMES

**DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE UM SECADOR
SOLAR DE FRUTAS UTILIZANDO O MÉTODO DO
PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL FATORIAL**

Tese apresentada submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Processos.

Orientador: **Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo**

CAMPINA GRANDE - PB

2021

G633d Gomes, Paulo de Andrade.
Dimensionamento e otimização de um secador solar de frutas utilizando o método do planejamento experimental fatorial / Paulo de Andrade Gomes. – Campina Grande, 2021.
149 f.: il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciência e Tecnologia, 2021.
"Orientação: Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo".
Referências.

1. Energia Solar. 2. Secador Solar. 3. Planejamento Experimental Fatorial. 4. Secagem de Frutas. 5. Abacaxi. I. Grilo, Marcelo Bezerra. II. Título.

CDU 621.472(043)

ÍTALO DE ANDRADE GOMES

- TESE -

**DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE UM SECADOR SOLAR DE FRUTAS
UTILIZANDO O MÉTODO DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL FATORIAL**

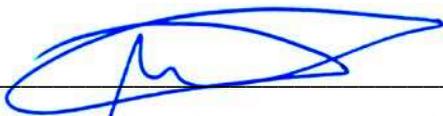
Tese apresentada e aprovada em 24 de fevereiro de 2021, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Processos.

Membros da Banca Avaliadora:



Prof. Marcelo Bezerra Grilo, Doutor.

Orientador - UFCG



Prof. Antonio Gilson Barbosa de Lima, Doutor.

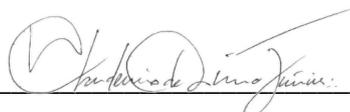
Examinador Interno - UFCG

ANTONIO GOMES
NUNES:03241606406

Assinado de forma digital por ANTONIO
GOMES NUNES:03241606406
Dados: 2021.03.09 21:42:19 -03'00'

Prof. Antonio Gomes Nunes, Doutor.

Examinador Externo - UFERSA



Prof. Claudemiro de Lima Júnior, Doutor.

Examinador Externo - UPE



Prof. Valdeci Mestre da Silva Junior, Doutor.

Examinador Externo - UEPB

Como uma promessa de Deus, você chegou
através de um milagre e em tão pouco tempo
já preencheu minha vida de sentido e
significados. Espero poder dignificar essa
missão com desmedido amor, pois imenso e
profundo é o orgulho de ser seu pai.

A minha filha, Lis.

AGRADECIMENTOS

Minha gratidão e obediência a Deus, que habilmente escreveu minha história e depositou em minha vida o anseio de utilizar as ferramentas da ciência para o desenvolvimento da humanidade.

À minha mãe Inalda, meu pai (*in memoriam*) Francisco, meu irmão Talles e minha cunhada Tuila. Gostaria de dizer-lhes que em todos os meus passos têm a marca desse amor que me é ofertado. Foram tantas lutas e desafios que só nossas memórias entendem o quanto foi difícil chegar até aqui.

À minha esposa Mayllanne e minha filha Lis, o mais reservado agradecimento. Com todo amor e carinho, vocês suportaram minhas fraquezas ofereceram-me força, coragem, desvelo e companheirismo. Fizeram-me acreditar que nada é impossível.

Aos meus avós paternos, Daniel Gomes e Adalcina, e maternos (*in memoriam*), João Isidoro e Tereza, extensivo a toda minha família, agradeço o apoio e a torcida. Essa conquista é de todos nós.

Ao professor Marcelo, que sem nenhuma objeção aceitou orientar este trabalho, agradeço pela experiência e conhecimentos repassados, pela paciência em ajudar e pela amizade sincera. Cada encontro nosso engrandece-me como profissional e como ser humano.

Dos colegas do laboratório, levo a certeza que fiz grandes amigos, nos quais sempre pude contar com o apoio e a amizade, somos o Time LEMT. Nossas conquistas continuarão a surgir com a parceria que permanecerá.

Agradeço a todos que fazem a Universidade Federal de Campina Grande, funcionários e professores, não podendo deixar de destacar o Prof. Gilson, coordenador do programa, que sempre se apresentou atencioso nas mais diversas solicitações.

À Universidade Estadual da Paraíba, por permitir e incentivar minha qualificação.

Aos meus afilhados, Rafaela, José Neto, David, Pedro Henrique, João Vitor, Eluize, Heloísa, Théo e Rafael. Embora não entendam a dimensão disto, iluminaram de maneira especial meus pensamentos, levando-me a buscar novos conhecimentos.

A todos que fizeram parte da minha vida durante esta caminhada e que, de uma forma ou de outra, cooperaram para a concretização deste trabalho e ajudaram-me a fechar mais uma etapa da minha existência. Meu muito obrigado!

Sou uma máquina em construção a procura do perfeito, se algum dia alcançarei tal feito não sei, mas se a busca incessante me faz corrigir erros, vale a pena sempre tentar.

Gomes, Ítalo de Andrade.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | | |
|--------------------|---|----|
| Figura 2.1 | Fluxograma de classificação dos secadores | 29 |
| Figura 2.2 | Protótipo de secador solar de exposição direta – GEDS/UFCG | 31 |
| Figura 2.3 | Protótipo de secador solar de exposição indireta – GEDS/UFCG | 32 |
| Figura 2.4 | Modelo geral de um sistema de transformação | 36 |
| Figura 2.5 | Fluxograma para produção de frutas desidratadas | 46 |
| | | |
| Gráfico 2.1 | Quantidade de patentes de equipamentos secadores solares por países | 39 |
| | | |
| Figura 3.1 | Classificação climática de Köppen-Geiger no estado da Paraíba | 51 |
| Figura 3.2 | Etapas do processo de desenvolvimento de um produto | 53 |
| Figura 3.3 | Desenho esquemático dos coletores solares | 55 |
| Figura 3.4 | Desenho esquemático das câmaras de secagem | 58 |
| Figura 3.5 | Isolantes térmicos | 60 |
| Figura 3.6 | Revestimento de alumínio e acabamento com cantoneiras | 61 |
| Figura 3.7 | Superfícies transparentes | 61 |
| Figura 3.8 | Sistema de monitoramento e aquisição de dados - SMAD | 62 |
| Figura 3.9 | Mini painel fotovoltaico e <i>cooler</i> | 62 |
| Figura 3.10 | Abacaxi Pérola | 63 |
| | | |
| Figura 4.1 | Ensaio 01 e 07 (02/12/2019) | 70 |
| Figura 4.2 | Ensaio 02 e 08 (03/12/2019) | 71 |
| Figura 4.3 | Ensaio 03 e 05 (04/12/2019) | 72 |
| Figura 4.4 | Ensaio 04 e 06 (05/12/2019) | 73 |
| Figura 4.5 | Coletor solar otimizado | 79 |
| Figura 4.6 | Ensaio 10 (19/10/2020) | 80 |
| Figura 4.7 | Ensaio 13 (20/10/2020) | 81 |
| Figura 4.8 | Ensaio 14 (21/10/2020) | 82 |
| Figura 4.9 | Ensaio 11 (22/10/2020) | 83 |
| Figura 4.10 | Ensaio 15 (23/10/2020) | 84 |
| Figura 4.11 | Ensaio 16 (24/10/2020) | 85 |
| Figura 4.12 | Ensaio 09 (25/10/2020) | 86 |

| | | |
|---------------------|---|----|
| Figura 4.13 | Ensaio 12 (26/10/2020) | 87 |
| Figura 4.14 | Câmara de secagem otimizada | 93 |
| Figura 4.15 | Secador solar otimizado | 93 |
| Figura 4.16 | Medição da massa de abacaxi <i>in natura</i> no início da secagem | 95 |
| Gráfico 4.1 | Variação de temperatura nos ensaios 01 e 07 (02/12/2019) | 70 |
| Gráfico 4.2 | Variação de temperatura nos ensaios 02 e 08 (03/12/2019) | 71 |
| Gráfico 4.3 | Variação de temperatura nos ensaios 03 e 05 (04/12/2019) | 72 |
| Gráfico 4.4 | Variação de temperatura nos ensaios 04 e 06 (05/12/2019) | 73 |
| Gráfico 4.5 | Gráfico de Pareto de efeitos padronizados para o coletor solar | 77 |
| Gráfico 4.6 | Superfícies de resposta [volume x superfície transparente] | 77 |
| Gráfico 4.7 | Superfícies de resposta [volume x material isolante] | 78 |
| Gráfico 4.8 | Superfícies de resposta [superfície transparente x material isolante] | 78 |
| Gráfico 4.9 | Variação de temperatura no ensaio 10 (19/10/2020) | 80 |
| Gráfico 4.10 | Variação de temperatura no ensaio 13 (20/10/2020) | 81 |
| Gráfico 4.11 | Variação de temperatura no ensaio 14 (21/10/2020) | 82 |
| Gráfico 4.12 | Variação de temperatura no ensaio 11 (22/10/2020) | 83 |
| Gráfico 4.13 | Variação de temperatura no ensaio 15 (23/10/2020) | 84 |
| Gráfico 4.14 | Variação de temperatura no ensaio 16 (24/10/2020) | 85 |
| Gráfico 4.15 | Variação de temperatura no ensaio 09 (25/10/2020) | 86 |
| Gráfico 4.16 | Variação de temperatura no ensaio 12 (26/10/2020) | 87 |
| Gráfico 4.17 | Gráfico de Pareto de efeitos padronizados para a câmara de secagem | 91 |
| Gráfico 4.18 | Superfícies de resposta [volume x tipo de secador] | 91 |
| Gráfico 4.19 | Superfícies de resposta [volume x tipo de ventilação] | 92 |
| Gráfico 4.20 | Superfícies de resposta [tipo de secador x ventilação] | 92 |
| Gráfico 4.21 | Intensidade média da radiação solar no dia 06 de dezembro de 2020 | 96 |
| Gráfico 4.22 | Distribuição das temperaturas no EXP1 | 96 |
| Gráfico 4.23 | Cinética de secagem do abacaxi ajustada pelo modelo de Page [EXP1] | 99 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|--------------------|---|-----|
| Tabela 2.1 | Quantidade de patentes de equipamentos secadores solares | 39 |
| Tabela 2.2 | Teor de umidade do abacaxi <i>in natura</i> | 43 |
| Tabela 2.3 | Ranking dos principais produtores de abacaxi do mundo | 44 |
| Tabela 2.4 | Ranking da participação regional na produção nacional de abacaxi | 45 |
| Tabela 3.1 | Dados climatológicos da cidade de Patos - PB | 50 |
| Tabela 3.2 | Matriz de planejamento experimental para o coletor solar | 57 |
| Tabela 3.3 | Matriz de planejamento experimental para a câmara de secagem | 59 |
| Tabela 4.1 | Variações de temperatura e radiação para os ensaios dos coletores solares | 74 |
| Tabela 4.2 | Propriedades do ar de secagem | 74 |
| Tabela 4.3 | Resultado da matriz do DOE para o coletor solar | 75 |
| Tabela 4.4 | Tabela ANOVA - DOE para o coletor solar | 76 |
| Tabela 4.5 | Variação de temperatura e radiação para os ensaios das câmaras | 88 |
| Tabela 4.6 | Propriedades do ar de secagem com sistema de exaustão | 88 |
| Tabela 4.7 | Resultado da matriz do DOE para a câmara de secagem | 89 |
| Tabela 4.8 | Tabela ANOVA - DOE para a câmara de secagem | 90 |
| Tabela 4.9 | Dados obtidos no experimento realizado nos dias 06 e 07 de dez de 2020 | 97 |
| Tabela 4.10 | Parâmetros de secagem | 100 |
| Tabela 4.11 | Potência útil e rendimento térmico para cada experimento | 100 |
| Tabela 4.12 | Eficiência dos processos de secagem | 101 |
| Tabela 4.13 | Coeficientes das cinéticas de secagem pelo modelo de Page | 102 |
| Tabela 4.14 | Planilha de custos para fabricação do secador solar | 103 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------|--|
| AIE | Agência Internacional de Energia |
| ANVISA | Agência Nacional de Vigilância Sanitária |
| BM | Banco Mundial |
| CCT | Centro de Ciências e Tecnologia |
| DHT | <i>Digital Humidity Temperature</i> (Temperatura e Umidade Digital) |
| DOE | <i>Design of Experiments</i> (Design de Experimentos) |
| FAO | <i>Food and Agriculture Organization</i> (Organização da Agricultura e Alimentação) |
| FoRC | <i>Food Research Center</i> (Centro de Pesquisa Alimentar) |
| GEDS | Grupo de Pesquisa em Energia e Desenvolvimento Sustentável |
| GLP | Gás Liquefeito de Petróleo |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| INMET | Instituto Nacional de Meteorologia |
| INPI | Instituto Nacional de Propriedade Industrial |
| IPCC | <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) |
| LEMT | Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas |
| NEPA | Núcleo de Estudos e Pesquisas em Alimentação |
| OCDE | Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico |
| OMS | Organização Mundial da Saúde |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| RDC | Resolução da Diretoria Colegiada |
| SMAD | Sistema de monitoramento e aquisição de dados |
| TACO | Tabela de Composição de Alimentos |
| TBCA | Tabela Brasileira de Composição de Alimentos |
| UFMG | Universidade Federal de Campina Grande |
| Unicamp | Universidade Estadual de Campinas |
| USP | Universidade de São Paulo |
| USPTO | <i>United States Patent and Trademark Office</i> (Escritório de Marcas e Patentes dos Estados Unidos) |
| WIPO | <i>World Intellectual Property Organization</i> (Organização Mundial da Propriedade Intelectual) |

RESUMO

GOMES, Ritalo de Andrade. Dimensionamento e Otimização de um Secador Solar de Frutas Utilizando o Método do Planejamento Experimental Fatorial. Campina Grande - PB, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2021. 148 p. Tese (Doutorado).

Este trabalho apresenta uma análise dimensional e construtiva de diferentes arranjos para os componentes de um sistema de secagem por meio do planejamento experimental fatorial, para se verificar as influências de cada fator no desempenho do secador solar e determinar quais apresentam significância estatística, determinando o melhor padrão para o secador solar de frutas. Foram delineadas as variáveis a serem analisadas no coletor solar e na câmara de secagem, seguindo com a realização do conjunto de experimentos para cada componente e análise por meio do planejamento experimental fatorial das variáveis estatisticamente significativas para determinação do modelo otimizado. Para os testes com o secador solar de frutas otimizado, foi escolhido o abacaxi. Os resultados obtidos experimentalmente determinaram o sistema de secagem solar otimizado, cujo arranjo apresenta-se como sendo: de um sistema de secagem com o coletor com volume de 100 litros e câmara de secagem de 50 litros, fabricado em material isolante de madeira maciça de Pinus e superfície transparente de policarbonato alveolar, do tipo indireto, ou seja, sem captação de energia solar na câmara de secagem, e com sistema de exaustão auxiliar com ventilação forçada. O desempenho do secador solar apresentou média de rendimento térmico do equipamento de 20,16% e de eficiência mecânica do processo de secagem de 95,12%, demonstrando a viabilidade técnica e operacional do equipamento e produzindo um produto final de elevado padrão de qualidade. O secador solar desenvolvido foi construído com materiais de baixo custo, facilmente encontrados no comércio local, como forma de garantir um equipamento que possa ter sua tecnologia disseminada e que atenda à demanda dos produtores da região. Sua operação e manutenção foram executadas sem necessidade de grandes despesas de elevada complexidade, o que comprovam sua facilidade de construção e operação, tornando-o uma tecnologia apropriada para inserção no ambiente comercial.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Solar. Secador Solar. Planejamento Experimental Fatorial. Secagem de Frutas. Abacaxi.

ABSTRACT

GOMES, Rinaldo de Andrade. Dimensioning and Optimization of a Solar Fruit Dryer Using the Factorial Experimental Planning Method. Campina Grande - PB, Graduate Program in Process Engineering, Federal University of Campina Grande, 2021. 148 p. Thesis (Doctorate degree).

This work presents a dimensional and constructive analysis of different arrangements for the components of a drying system by means of experimental factorial planning, to verify the influences of each factor on the performance of the solar dryer and to determine which ones have statistical significance, determining, therefore, the best standard for the solar fruit dryer. They were outlined as variables to be analyzed in the solar collector and in the drying chamber, following with the accomplishment of the set of experiments for each component and analysis through the factorial planning of the statistically important variables for the determination of the optimized model. For the testicles with the optimized solar fruit dryer, pineapple was selected. The results obtained experimentally determined the optimized solar drying system, whose arrangement is presented as: of a drying system with a 100 liter collector and a 50 liter drying chamber, made of solid pine wood insulating material and transparent surface of alveolar polycarbonate, of the indirect type, that is, without capturing solar energy in the drying chamber, and with an auxiliary exhaust system with forced supplies. The performance of the solar dryer showed an average thermal yield of the equipment of 20.16% and a mass efficiency of the process of 95.12%, demonstrating the technical and operational viability of the equipment and producing a final product of high quality standard. The solar dryer developed was built with low-cost materials, easily found in local stores, as a way to guarantee equipment that can have its technology disseminated and that meets the demand of producers in the region. Its operation and maintenance were carried out without the need for highly complex actions, which prove its ease of construction and operation, making it a suitable technology for insertion into the commercial environment.

PALAVRAS-CHAVE: Solar energy. Solar Fruit Dryer. Factorial Experimental Planning. Drying of Fruits. Pineapple.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RESUMO

ABSTRACT

CAPÍTULO I

| | | |
|-------|----------------------------------|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 | Objetivos | 20 |
| 1.1.1 | Objetivo geral | 20 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos | 20 |
| 1.2 | Justificativa da escolha do tema | 21 |

CAPÍTULO II

| | | |
|---------|--|----|
| 2 | REFERENCIAIS TEÓRICOS | 26 |
| 2.1 | Princípios da secagem | 26 |
| 2.2 | Secadores de frutas | 28 |
| 2.2.1 | Tipos de secadores | 28 |
| 2.2.2 | Secadores solares | 30 |
| 2.2.2.1 | Secador solar de exposição direta | 31 |
| 2.2.2.2 | Secador solar de exposição indireta | 31 |
| 2.3 | O sol como fonte de energia | 32 |
| 2.3.1 | Energia solar fototérmica | 34 |
| 2.3.2 | Energia solar fotovoltaica | 35 |
| 2.4 | Planejamento experimental [<i>Design of Experiments - DOE</i>] | 35 |
| 2.5 | Prospecção tecnológica | 38 |
| 2.6 | A importância econômica e nutricional das frutas | 40 |
| 2.6.1 | O abacaxi | 42 |
| 2.6.2 | Frutas desidratadas | 45 |

CAPÍTULO III

| | | |
|-------|---|----|
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 49 |
| 3.1 | Caracterização do local de realização dos experimentos | 49 |
| 3.2 | Modelos de secadores desenvolvidos pelo GEDS/UFCG | 51 |
| 3.3 | Desenvolvimento do secador solar de frutas | 52 |
| 3.4 | Planejamento experimental fatorial proposto | 54 |
| 3.4.1 | Planejamento experimental fatorial para o coletor solar | 55 |
| 3.4.2 | Planejamento experimental fatorial para a câmara de secagem | 57 |
| 3.5 | Materiais utilizados | 59 |
| 3.5.1 | Isolantes térmicos | 60 |
| 3.5.2 | Superfícies transparentes | 61 |
| 3.5.3 | Componentes eletrônicos | 62 |
| 3.5.4 | Frutas | 63 |
| 3.6 | Eficiência do processo de secagem | 63 |
| 3.7 | Determinação das curvas de secagem | 64 |
| 3.8 | Rendimento térmico do equipamento | 65 |

CAPÍTULO IV

| | | |
|---------|---|-----|
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 69 |
| 4.1 | Ensaio experimentais para o coletor solar | 69 |
| 4.2 | Ensaio experimentais para a câmara de secagem | 79 |
| 4.3 | Secagem de abacaxi com o secador solar otimizado | 94 |
| 4.3.1 | Experimento realizado em 06 a 07 de dezembro de 2020 - (EXP1) | 95 |
| 4.3.2 | Resumo dos rendimentos do equipamento e das eficiências dos processos para os 04 (quatro) experimentos | 99 |
| 4.3.2.1 | Rendimento térmico do equipamento | 99 |
| 4.3.2.2 | Eficiência dos processos de secagem | 101 |
| 4.3.2.3 | Significância da correlação estatística para os ajustes das cinéticas de secagem | 101 |
| 4.4 | Análise da viabilidade econômica | 102 |

CAPÍTULO IV

| | | |
|-----|--------------------------------|-----|
| 5 | CONCLUSÕES | 105 |
| 5.1 | Sugestões de trabalhos futuros | 106 |

REFERÊNCIAS

| | |
|---|------------|
| APÊNDICE A - DADOS DOS ENSAIOS PARA DOE DOS COLETORES SOLARES | 119 |
| APÊNDICE B - DADOS DOS ENSAIOS PARA DOE DAS CÂMARAS DE SECAGEM | 128 |
| APÊNDICE C - DADOS DOS EXPERIMENTOS DE SECAGEM DE ABACAXI | 145 |

Capítulo I
INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de manipulação das fontes de energia como garantia de sobrevivência humana remonta a mais antiga Era Histórica conhecida da humanidade - a Pré-história. Desde então, o homem observou na natureza formas de energia que lhe permitisse manter, prolongar e tornar mais confortável a sobrevivência.

No entanto, as ciências e tecnologias dominadas pela humanidade não conseguiram criar ou mesmo destruir a energia. Por esse motivo, desde a primeira manipulação, vem-se aprendendo e aperfeiçoando como controlar, converter e direcionar as energias nas suas mais diversas formas (Silva et al., 2018).

Logo, a energia passou a ser uma das principais forças motrizes do desenvolvimento econômico de um país. Junior et al. (2014) afirmam que a energia é insumo fundamental do processo produtivo de bens e serviços, além de aumentar o bem-estar da população, na medida em que proporciona conforto térmico, iluminação, lazer, entre outros benefícios.

Desta forma, o desenvolvimento cultural da humanidade foi acompanhado da evolução na utilização das fontes naturais de energia que se deram desde a descoberta do fogo, favorecendo a fixação de sua moradia em cavernas, em função da possibilidade de manter iluminados e aquecidos seus abrigos e do processamento de seus alimentos (assar a caça), passando pelo aproveitamento dos ventos como força motora nas navegações e moinhos e, mais recentemente, da água na geração de energia elétrica, entre outros.

Mas só a partir dos Séculos XVII e XVIII, com o desenvolvimento da máquina a vapor e do motor de combustão interna, é que foi verificado um verdadeiro avanço no incremento significativo de potência das máquinas, atrelado a elevação do consumo de combustíveis, até então limitado às atividades domésticas como aquecimento e preparação de alimentos.

A evolução tecnológica levou o homem a um consumo cada vez maior de energia e recursos naturais em todas as formas disponíveis, com notável crescimento do consumo de combustíveis fósseis, cujo crescimento exponencial iniciou-se com a Revolução Industrial e, como bem se sabe, não parou e nem dá sinais de que possa diminuir, definindo, assim, uma matriz energética amplamente baseada no petróleo.

No entanto, as reservas desses combustíveis são finitas e quando consideradas as reservas conhecidas e o ritmo de crescimento do consumo já se prever sua total exaustão e, conseqüentemente, o surgimento de políticas de substituição das fontes energéticas de origem fóssil por fontes renováveis, onde destas, a utilização de energias renováveis de origem solar e eólica ganha cada vez mais prestígio no mundo pós-moderno (Silva, 2013).

Há uma consciência crescente de que as energias renováveis têm um papel importante a desempenhar na disseminação de tecnologias apropriadas para fomentar a produção agrícola. Nos países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), têm sido concedidos incentivos públicos que estimularam a realização de investimentos maciços na última década para a implantação dessas fontes (Tiepolo e Júnior, 2014).

Segundo Pereira (2014), a substituição das fontes de energia de origem fóssil pelas renováveis encontra-se entre as principais questões da agenda internacional das políticas públicas como, por exemplo, nos documentos gerados pela Organização das Nações Unidas (ONU), pelo Banco Mundial (BM), pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), pela Agência Internacional de Energia (AIE), pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), e de tantas outras instituições públicas dedicadas à análise e proposição de políticas voltadas para o desenvolvimento.

O uso tecnológico de fontes renováveis tem aprimorado o conceito de sustentabilidade e auxiliado a vida do homem no campo. Com esses avanços, tem-se tornado frequentes as inovações nos diversos setores sociais e seria inevitável o uso da tecnologia de fontes energéticas renováveis que possam auxiliar os produtores rurais no desenvolvimento das suas atividades (Barros e Souza, 2019).

Optar pelas energias renováveis já é viável técnica e economicamente. Atualmente, os processos e equipamentos possuem um grau elevado de confiabilidade e qualidade, além de terem uma implementação rápida e fácil, reforçando, portanto, o quanto se vive em um cenário totalmente favorável à energia renovável.

O desenvolvimento de projetos que atendam às necessidades sociais e econômicas de uma comunidade, respeitando os recursos naturais e privilegiando a eficiência energética de um sistema, deve ser o foco principal do conhecimento científico empregado por um engenheiro nos tempos modernos, principalmente, em países como o Brasil, geograficamente posicionados numa zona de excepcional disponibilidade de energia solar, o progresso de forma sustentável representa a melhor alternativa para inserção num mercado cada vez mais competitivo, pois têm

o desafio de promover a mobilidade social e para isso precisa incentivar seu desenvolvimento tecnológico.

No anseio de possibilitar um maior desenvolvimento regional, este trabalho representa o interesse em disseminar a utilização de novas tecnologias nos processos de secagem de alimentos do setor da fruticultura, viabilizando a produção e comercialização de um produto de boa qualidade e alto valor agregado.

A escolha do setor frutífero decorre da sua importância no cenário econômico do Nordeste brasileiro e por este ser uma das principais fontes de vitaminas na nutrição humana. A utilização do secador solar terá como finalidade uma melhor conservação dos produtos, permitindo a qualidade na oferta de alimentos por longos períodos, mesmo em épocas de entressafas e, conseqüentemente, que ocorra uma comercialização mais lucrativa.

O Brasil é considerado um país industrializado e que ocupa um dos primeiros lugares em produção agrícola. A agricultura brasileira vem, desde sempre, obtendo resultados expressivos ano após ano, sendo considerado um dos pilares da economia do país.

As frutas tem um papel fundamental na cadeia produtiva de alimentos, sendo de grande importância em todo o mundo, no que se refere aos aspectos social, econômico e alimentar. A fruticultura possibilita a exploração intensiva de áreas produtivas, tornando-as lucrativas, gerando grande quantidade de postos de trabalho com uma grande quantidade de mão de obra aplicadas (Lima, 2017).

No entanto, em todas as etapas do processo produtivo agrícola mundial (produção, pós-colheita, armazenamento e transporte) apresentam altas taxas de desperdícios de alimentos, seja por sua deterioração ou pelo mal aproveitamento do seu poder nutritivo. Segundo Belik (2019), a cada ano, cerca de 1,3 bilhão de toneladas de alimentos são desperdiçadas no mundo, o que corresponde a um custo estimado de US\$ 680 bilhões para os países industrializados e US\$ 310 bilhões para os países em desenvolvimento (FAO, 2017).

No Brasil a realidade não é diferente, cerca de 45% das frutas produzidas são desperdiçadas desde o plantio até a comercialização. Pelos dados da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), classifica o Brasil como um dos dez países que mais desperdiçam alimentos – são quase 10 milhões de toneladas de comida que vão, literalmente, para a lata do lixo todos os anos.

O equipamento ora desenvolvido representa uma alternativa para a produção de alimentos desidratados para ser utilizado, principalmente, em comunidades carentes e no

ambiente da agricultura familiar, sendo também, uma opção de geração de emprego e renda para essas pessoas, a partir da produção e comercialização desses produtos na forma desidratada.

Os produtos desidratados, além de possuírem maior valor agregado do que os *in natura* apresentam, também, a possibilidade de maior tempo de conservação, menores custos de transporte pela redução de massa e conveniência no consumo.

Dessa forma, o secador solar caracteriza-se como um equipamento que contribui para promover o desenvolvimento sustentável, pois garante crescimento econômico para os produtores rurais e, conseqüentemente, sua ascensão socioeconômica, sem prejuízo das condições ambientais existentes.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um secador solar otimizado a ser utilizado na produção de frutas desidratadas, através da análise de diferentes arranjos de um sistema de secagem que utilize, exclusivamente, a energia solar como fonte energética, para determinação do melhor dimensionamento para os seus componentes, utilizando o planejamento experimental fatorial

1.1.2 Objetivos específicos

- Dimensionar, construir e testar diferentes coletores solares, tendo por base as seguintes variáveis construtivas: volume, material isolante e material da superfície transparente,

para verificar qual arranjo mais adequado ao secador solar, através do planejamento experimental fatorial;

- Determinar, através do planejamento experimental fatorial, o arranjo mais adequado à composição do secador solar para diferentes câmaras de secagem acopláveis ao coletor solar, por base na relação de volume ($\text{volume}_{\text{câmara}}/\text{volume}_{\text{coletor}}$), no tipo de secador (misto ou indireto) e no tipo de ventilação utilizada (natural ou forçada);
- Testar experimentalmente o secador solar otimizado para obter e avaliar a cinética de secagem de abacaxi e relacionar os valores obtidos experimentalmente com os do modelo matemático empírico de Page;
- Calcular o rendimento térmico do secador solar e a eficiência mássica do processo de secagem por base nos parâmetros obtidos em cada experimento de secagem de abacaxi;
- Verificar a viabilidade econômica da adoção do equipamento nos processos de secagem de frutas, através da análise de mercado e no tempo de retorno do investimento.

1.2 Justificativa da escolha do tema

Segundo Almeida et al. (2018), a maioria das propriedades rurais do Brasil é constituída por produtores que trabalham em pequena escala, tendo como mão de obra predominante o núcleo familiar, denominando a agricultura familiar.

Para a FAO (2018), a agricultura familiar desempenha um papel chave na garantia da segurança alimentar e na erradicação da fome e da pobreza. E o reconhecimento dessa influência positiva na produção de alimentos e na economia tem sido acompanhado da implementação de medidas com vistas ao fortalecimento e à expansão do setor, que caracterizam uma política de incentivos e concessão de subsídios composta por vários mecanismos de fomento.

No entanto, o processo de produção agrícola na agricultura familiar demanda por equipamentos simples para realizar suas atividades, devido ao baixo poder aquisitivo dos

agricultores familiares (Braga et al., 2015). Estes equipamentos devem, preferencialmente, ser de baixo custo, caracterizando-se também por sua facilidade de operação e manutenção.

O surgimento de secadores dimensionados adequadamente para a secagem de frutas e, principalmente, com custos mais acessíveis, fez crescer o mercado de frutas desidratadas nos últimos anos, bem como a diversificação do segmento, que passou a produzir, além da banana desidratada, frutas secas como a maçã, o mamão, a manga e o abacaxi (Costa, 2008).

A escolha dos equipamentos e dos métodos para o processamento de frutas é fundamental para a manutenção de suas características de qualidade, pois o seu processamento pode ocasionar alterações que prejudiquem suas qualidades nutricionais.

Apesar das diversas tecnologias de secagem à disposição dos agricultores, a secagem em terreiros ainda é muito utilizada no Brasil, principalmente nas zonas agrícolas, onde se concentram as cooperativas e a agricultura familiar (Nunes et al., 2014).

Mas, há uma consciência crescente de que as energias renováveis têm um papel importante a desempenhar na disseminação de tecnologias apropriadas para fomentar a produção agrícola. O uso da energia solar como fonte de energia predominante no equipamento é indispensável para o compromisso com a promoção do desenvolvimento sustentável.

De acordo com Nunes (2016), secadores solares usam fontes de energia livres e renováveis, reduzem as perdas de secagem (em comparação com a secagem direta ao sol) e apresentam custos operacionais, demasiadamente, mais baixos do que a secagem elétrica e, por isso, estão ganhando rápida aceitação como medida de economia de energia aplicada na agricultura, sendo preferíveis a outras fontes alternativas de energia porque são abundantes, inesgotáveis e menos poluentes.

Para Gomes (2015), nesse processo é necessário fornecer calor ao material úmido para que a água possa ser transportada do interior do sólido até a superfície, permitindo, assim, a evaporação de água da superfície do material ao ambiente, e também deve haver um sorvedor de umidade para remover o vapor de água, formado a partir da superfície do material a ser seco. Este processo de fornecimento de calor da fonte quente para o material úmido será responsável pela evaporação da água do material e em seguida a transferência de massa arrastará o vapor formado.

Como o fluido de trabalho utilizado nos processos de secagem solar é o ar aquecido, a avaliação das suas propriedades termodinâmicas (temperatura, umidade relativa, velocidade, dentre outras) é de extrema importância, de tal modo que, sob determinadas condições

operacionais, possa proporcionar uma secagem uniforme do produto e reduzir o tempo de secagem do mesmo (Grilo et al., 2007).

Não obstante às características climáticas do país tropical no qual se encontra, a Paraíba oferece excelentes condições à produção de frutas desidratadas através da secagem com energia solar o ano inteiro: temperatura média elevada durante o dia e o alto grau de radiação solar incidente.

Procurando interagir com esta realidade no ambiente da produção agrícola brasileira, o Grupo de Pesquisa em Energia e Desenvolvimento Sustentável (GEDS), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), tem trabalhado no desenvolvimento de secadores que utilizam a energia solar.

Desde 2008, vários protótipos foram construídos e testados nas mais diversas situações de utilização, repassando essa tecnologia para os pequenos produtores da região. Cada novo sistema de secagem desenvolvido apresenta características singulares e caminha na direção da melhoria da sua eficiência energética, utilizando tecnologia apropriada, empregando materiais facilmente encontrados na região e com limite de custos construtivos e operacionais, para que os equipamentos tenham a inserção no mercado facilitada.

Destarte, o planejamento fatorial, que segundo Rodrigues e Iemma (2014), consiste num grupo de técnicas usadas para o estudo empírico das relações entre uma ou mais respostas medidas analiticamente e um número de variáveis de entradas que possam ser controladas, representa uma ferramenta importante no dimensionamento dos componentes de um sistema de secagem que atenda a determinada necessidade.

A escolha do abacaxi como matéria-prima a ser desidratada justifica-se na importância que essa fruta representa para a economia do estado da Paraíba e para o Brasil. Em geral, a secagem deste produto, atualmente, acontece com uso de eletricidade e/ou gás liquefeito de petróleo (GLP), fontes energéticas que precisam ser substituídas por fontes renováveis que favoreçam o meio ambiente.

A necessidade da realização de um estudo experimental se dá devido o entendimento de que a concepção de sistemas de secagem solar é uma mistura de ciência teórica e experimentação prática (Silveira, 2016). Nesse sentido, Rizvi (2014) concluiu que não se pode projetar um secador com base no conhecimento teórico disponível sem experiência só porque é possível secar um produto sem qualquer conhecimento da base teórica a partir da experiência.

Neste contexto, sabendo-se do alto grau de perecimento das frutas e do iminente esgotamento das fontes energéticas derivadas do petróleo, busca-se desenvolver um secador de frutas que utilize, exclusivamente, o sol como fonte energética, através do aproveitamento da energia solar fototérmica e da energia solar fotovoltaica e, para tanto, utilizar-se-á do planejamento experimental fatorial para determinar o melhor arranjo no dimensionamento e otimização do equipamento.

Capítulo II
REFERENCIAIS TEÓRICOS

2 REFERENCIAIS TEÓRICOS

Nesse capítulo está exposta o que é e como acontece o processo de secagem de alimentos, destacando quais os equipamentos mais utilizados para se efetuar esse processo, as fontes de energia empregadas e a importância econômica e nutricional das frutas.

2.1 Princípios da secagem

Os altos índices de desperdício relacionados com a produção alimentícia são, na maioria das vezes, provenientes da degradação natural causada pela elevada quantidade de umidade presente nos alimentos.

Um dos grandes problemas enfrentados pelos agricultores é a necessidade de conseguir níveis seguros de armazenagem para minimizar os riscos de deterioração dos produtos agrícolas que, na maioria das vezes, são colhidos com teores de umidade superiores ao recomendado.

A redução de umidade do produto agrícola, através da secagem, ou seja, da retirada de água de seu interior, inviabiliza a manutenção de condições propícias à proliferação de bactérias e fungos, evitando-se a rápida degradação do mesmo.

Assim sendo, o processo de secagem apresenta-se como uma solução para a conservação de alimentos, visto que impede a deterioração do produto e, conseqüentemente, sua perda de valor comercial. Para Couto et al. (2019), além de gerar a implementação de um novo produto no mercado, esse processamento agrega significativo valor comercial ao alimento pois o caracterizará como produto processado.

Segundo Costa (2008), a secagem de um alimento consiste, basicamente, na redução de seu teor de umidade a um nível no qual seu metabolismo e/ou dos microrganismos a ele associados sejam minimizados.

Lima (1999) ressalta que quando um sólido é submetido à secagem, observam-se dois fenômenos que ocorrem simultaneamente. Nesse processo, é necessário fornecer calor ao material úmido para que a água possa ser transportada do interior do sólido até sua superfície, permitindo, assim, a evaporação de água da superfície do material para o ambiente.

Sendo assim, a secagem traduz-se pelo movimento da água presente no interior do produto até a sua superfície, através da transferência de calor, seguida da remoção dessa água que está na superfície do material para um fluido secante externo, geralmente o ar, através da transferência de umidade (Lunkes et al., 2019).

O processo de fornecimento de calor para o material úmido será responsável pela evaporação da água do material, seguindo-se a transferência de massa que arrastará o vapor formado.

Por ser um processo simultâneo de transferência de calor e transferência de massa entre o produto a ser secado e o ar de secagem, a secagem influencia nas características do produto final e tem efeito direto na sua qualidade. Se for mal conduzida pode causar a deterioração do produto ou reduzir a qualidade do mesmo, diminuindo seu rendimento nas etapas de processamento.

A umidade dos produtos biológicos está diretamente relacionada com sua estabilidade, qualidade e composição, podendo afetar propriedades determinantes para a sua estocagem, embalagem e/ou processamento. Por isso, sua determinação é uma das medidas mais importantes e utilizadas na análise de alimentos, sendo fundamental para o processo de secagem.

Pela Resolução da Diretoria Colegiada da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (RDC/ANVISA) nº 272, de 22 de setembro de 2005, que aprova o regulamento técnico para produtos vegetais, produtos de frutas e cogumelos comestíveis, são estabelecidos os requisitos específicos para determinação de frutas secas ou desidratadas (exceto frutas secas tenras), que devem possuir umidade máxima limitada em 25% (Brasil, 2005).

2.2 Secadores de frutas

O secador é o equipamento usado na redução da umidade dos produtos pela ação do calor. As especificações dos sistemas de secagem podem mudar quanto a sua capacidade, processo de operação, combustível utilizado, versatilidade e limites de vazão, temperatura e umidade relativa do ar de secagem.

A grande variedade de equipamentos e processos de secagem representa uma das maiores dificuldades na seleção de secadores para se obter um produto de qualidade. Muitos métodos são apresentados na literatura para escolha do modelo mais adequado a cada necessidade, como os baseados em conceitos fenomenológicos e os que dizem respeito aos custos (Machado, 2009).

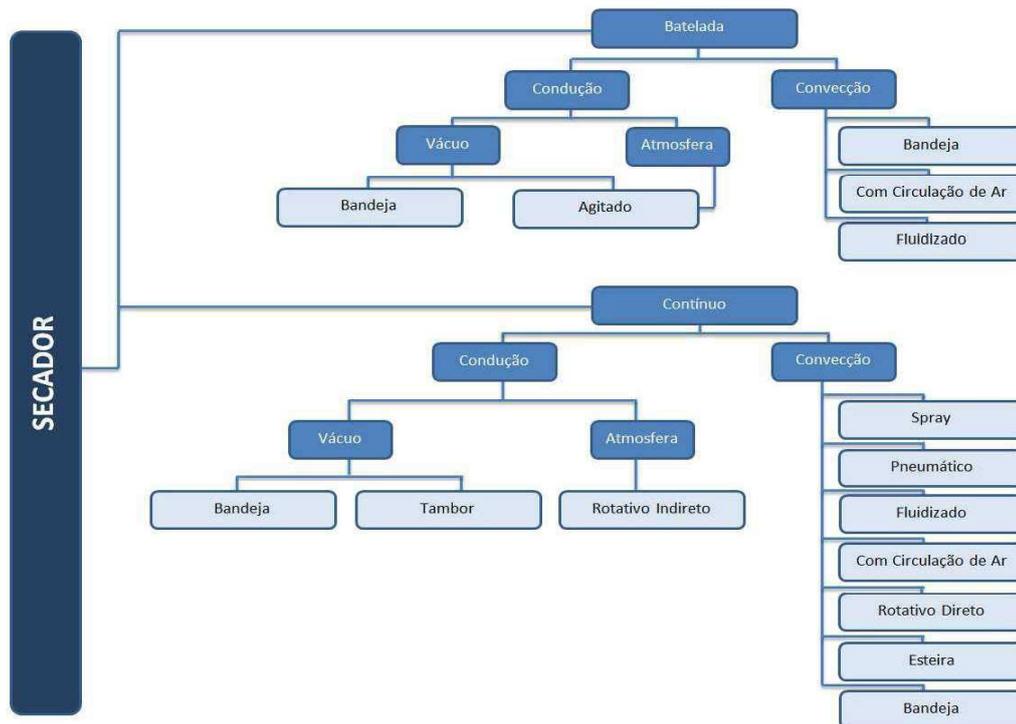
No entanto, dos muitos tipos de secadores para produtos agrícolas, os modelos diferem-se, basicamente, pelo método de operação (contínuo ou batelada), sendo, portanto, de extrema importância o conhecimento como intervém o produto no equipamento.

2.2.1 Tipos de secadores

Segundo Gomes (2015), existe uma grande variedade de produto a ser seco usando diferentes métodos de secagem, como também existem diversos modelos de secadores projetados para atender a uma demanda específica. Diante dessa variedade de produtos e de processos, os critérios para se classificar os secadores são muitos. Sendo assim, a escolha do modelo mais adequado pode ser subjetiva, baseada no bom senso e na experiência.

A classificação dos secadores pode ser definida com base no método de operação, cujas peculiaridades apresentam-se conforme demonstrado no fluxograma de classificação dos secadores apresentado na Fig. 2.1.

Figura 2.1 - Fluxograma de classificação dos secadores.



Fonte: Gomes (2015).

- **Secadores de Batelada ou Descontínuos:** nos sistemas de secagem por batelada o produto é depositado no secador até que o processo seja concluído e, só então, o produto desidratado é removido e outra porção de produto é depositada, quando é iniciado um novo processo.
- **Secadores Contínuos:** consistem em equipamento de secagem nos quais os produtos a serem desidratados são depositados de forma que durante a realização do processo outros produtos são inseridos no sistema enquanto os que atingem o teor de umidade desejado são retirados, como o próprio nome sugere, continuamente.

Dentre os modelos disponíveis, os equipamentos mais versáteis para a secagem de alimentos são os secadores que operam em regime de batelada e por convecção, com a disposição do produto em bandejas e submetido a uma corrente de ar aquecido.

Dentre os secadores que operam de forma descontínua, os secadores de cabine ou bandejas são mais comumente utilizados, sendo mais eficientes, mais econômicos, com custos de construção e de manutenção baixos.

Os secadores de bandejas podem operar em dois modos distintos: a câmara do aquecedor é cheia e só será iniciado a movimentação do ar após a temperatura atingir o grau desejado; ou, o secador é posto em funcionamento só depois que a temperatura e a circulação de ar estiverem nas condições ideais, quando, então, será possível a introdução dos produtos no equipamento.

Após seu surgimento no mercado, o secador de bandejas passou a ser utilizado por pequenas e médias indústrias de alimentos. No entanto, a fonte de energia predominantemente utilizada nesse tipo de secador é a energia elétrica ou o gás liquefeito de petróleo (GLP).

Com a disponibilização de mais equipamentos, com as características já citadas, no mercado de processamento de produtos agrícolas, certamente haverá um aumento na implantação de indústrias de secagem, reduzindo-se as perdas do excedente da produção dos produtos agropecuários.

2.2.2 Secadores solares

A secagem utilizando energia solar em ambientes abertos, conhecida como secagem natural, secagem ao ar livre ou popularmente referida como secagem de terreiro ainda é muito usada para determinados produtos agrícolas. No entanto, a secagem utilizando secador solar de exposição direta ou indireta tem crescido porque tem apresentado resultados positivos quanto ao processo de secagem além de garantir maior qualidade e limpeza ao produto final desidratado.

No secador solar, o ar ambiente é aquecido pela irradiação solar e percorre de forma natural ou forçada, retirando a água do produto que se quer secar. O material pode ser colocado diretamente no coletor, secagem direta, ou em uma câmara de secagem, secagem indireta.

Os secadores solares de exposição indireta, em geral, representam uma evolução em relação aos primeiros, uma vez que neste, o ar ambiente que é o responsável direto pelo processo de secagem pode ser controlado em relação a suas propriedades termodinâmicas, principalmente em relação à temperatura, umidade e volume de ar que circula no interior da câmara de secagem.

2.2.2.1 Secador solar de exposição direta

O secador solar de exposição direta é um equipamento muito simples, de fácil construção, operação e manutenção, sendo composto basicamente de três elementos: o corpo, que é uma caixa retangular construída de madeira; bandejas, onde o abacaxi, ou outro produto agrícola é colocado para ser desidratado; e a cobertura transparente, que lhe dá a característica de estufa.

Na Fig. 2.2 apresenta-se um protótipo de secador solar de exposição direta produzido pelo GEDS/UFCG, no qual é possível perceber cada detalhe destes elementos construtivos

Figura 2.2 - Protótipo de secadores solares de exposição direta - GEDS/UFCG.



Fonte: Nunes (2016).

2.2.2.2 Secador solar de exposição indireta

Neste tipo de secador solar o produto a ser desidratado não está diretamente exposto à radiação solar, isso minimiza a descoloração e rachaduras na sua superfície, melhorando, assim, a qualidade do produto. A câmara de secagem é utilizada para manter o produto na bandeja. A radiação solar não é diretamente incidente sobre o material a ser seco. O ar é aquecido em um coletor solar e, em seguida, conduzido para uma câmara de secagem onde se encontra o produto a ser desidratado. Neste caso, o secador solar é constituído por coletor solar e uma câmara de secagem.

Em algumas situações o secador solar é denominado sistema de secagem quando além do coletor solar mais a câmara de secagem incluir outros subsistemas auxiliares, por exemplo

o sistema de medição e aquisição de dados e sistemas prévios para redução da umidade do ar de secagem

Um protótipo de secador solar de exposição indireta é mostrado na Fig. 2.3.

Figura 2.3 - Protótipo de secador solar de exposição indireta - GEDS/UFCG.



Fonte: Nunes (2016).

2.3 O sol como fonte de energia

No mundo globalizado, os setores industriais, comerciais e de serviços estão cada vez mais comprometidos com o desenvolvimento sustentável, focando seus processos em mecanismos que promovam a preservação das condições ambientais, sem abdicar de uma produção com redução de custos que favoreça uma maior rentabilidade.

Para determinar a rentabilidade de um processo de secagem de um produto agrícola, deve ser levado em consideração, dentre outros parâmetros, a qualidade final do produto seco, a quantidade de energia gasta e o tempo utilizado neste processo.

Para apresentar os resultados obtidos no desenvolvimento de um equipamento voltado à produção de frutas desidratadas, é preciso expor a teoria que embasa esse contexto de rentabilidade atrelado ao uso de energias “limpas”.

Segundo Grilo (2007) é a partir do sol que as plantas e os animais se desenvolvem e são seus resíduos que geram as fontes não renováveis, como petróleo, carvão e gás natural. Assim,

também, é a radiação solar que induz a movimentação do ar ambiente gerando os ventos que são usados na produção de energia eólica, também provoca a evaporação das águas possibilitando a geração da energia hidrelétrica, caracterizando-se, também, como origem das energias renováveis. Dessa forma, a energia solar é a origem de quase todas as outras fontes de energia.

O emprego de fontes não renováveis, como as baseadas em combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural) intensificam os riscos ambientais, enquanto que a utilização de fontes renováveis (solar, eólica, hidráulica) amenizam esses danos.

Daí decorre, nos tempos modernos, a busca incansável por mecanismos de geração de energia à base de fontes alternativas que amenizem os impactos ambientais. Em muitas partes do mundo, há uma consciência crescente de que as energias renováveis têm um papel importante a desempenhar na extensão da tecnologia para o agricultor em países em desenvolvimento, aumentando sua produtividade.

Como exemplo de restrição ao uso de energia de origem fóssil no processamento de alimentos, por determinação do Conselho Nacional de Petróleo, em 1980 foi proibida a utilização de qualquer derivado do petróleo na secagem de cereais, madeira e fumo, forçando os setores de armazenamento e secagem de produtos agrícolas a encontrar alternativas energéticas que substituíssem os combustíveis fósseis.

A energia solar representa uma das fontes mais limpas em relação ao impacto ambiental, o que deve ser considerado no momento de escolha de investimentos neste setor, além de, em si, ser gratuita, estando, portanto, imune as flutuações nos preços das outras formas de energia. Pode ser convertida e usada de várias formas diferentes: fornecimento de eletricidade, calefação, resfriamento, transporte, iluminação e potência mecânica. Sem contar que a maioria dos métodos usados gera poucos problemas ambientais.

A desvantagem da energia solar está no fato de não ser de fluxo contínuo, embora seja possível coletar e armazenar. Trata-se de uma energia intermitente, com fluxo interrompido pelas noites e pelos dias nublados (Peneiro et al., 2010).

As formas mais usuais de utilização tecnológica da energia solar, atualmente, são através da arquitetura bioclimática, energia solar fototérmica e energia solar fotovoltaica. Partindo deste princípio, observa-se a busca por mecanismos de captação e conversão direta da energia solar, a fim de ser viabilizada sua aplicação nas necessidades humanas.

Em meio às diferentes formas de aproveitamento dessa energia, pode-se destacar o aproveitamento térmico e a transformação direta em energia elétrica como formas básicas que podem ser aplicadas nos procedimentos de secagem de alimentos.

2.3.1 Energia solar fototérmica

Essa forma térmica de aproveitar o potencial energético do sol ocorre devido à absorção da radiação solar que chega à superfície terrestre com o uso de coletores solares ou de concentradores solares.

Ao ser emitida pelo sol, a radiação solar se propaga na forma de radiação eletromagnética com qualidade espectral em várias faixas de comprimento de onda. A radiação solar que chega à superfície da terra, ao nível do solo, tem comprimento de onda na faixa de 0,10 a 2,50 micrômetros, ou seja, é predominantemente radiação ultravioleta, radiação visível e radiação infravermelha (Grilo, 2007).

Essa radiação ao incidir sobre o coletor de energia solar atravessa a cobertura transparente sendo absorvida no interior do coletor solar, tendo como consequência o aumento da temperatura no interior do mesmo. Esse fenômeno conhecido como efeito estufa é o princípio de funcionamento dos sistemas de aquecimento que utilizam energia solar fototérmica.

A energia obtida por meio de coletores solares é utilizada para o aquecimento de água ou ar, a temperaturas relativamente baixas com a finalidade de suprir, principalmente, as necessidades residenciais. No entanto, o uso desse mecanismo nos setores industriais está tendo uma demanda cada vez maior.

Para aproveitar a energia solar a temperaturas mais elevadas faz-se necessário a utilização de concentradores solares, cujo princípio de funcionamento é a convergência da radiação solar, por meio de superfícies refletoras, de uma grande área para uma área muito menor, aumentando a temperatura incidente nessa área final.

2.3.2 Energia solar fotovoltaica

Segundo o CRESESB (2019), a primeira vez que foi verificada a conversão direta de luz em energia elétrica foi em 1839, pelo físico Edmond Becquerel, onde se observou que, quando exposto à luz, ocorria uma diferença de potencial nas extremidades de um material semiconductor.

Com o advento dos programas espaciais, os investimentos em sistemas fotovoltaicos impulsionaram essa tecnologia e, associado à crise mundial de energia, possibilitou a utilização deste mecanismo não apenas para os programas espaciais, mas para suprir o fornecimento energético no meio terrestre.

Os módulos fotovoltaicos consistem na interligação de células solares que, por sua vez, são compostas de uma fina camada de silício tipo N (material resultado do acréscimo de fósforo ao cristal de silício puro) e outra mais espessa de silício tipo P (silício puro acrescido de boro), que separadamente são eletricamente neutras, mas juntas geram um campo elétrico.

Ao incidirem sobre as células fotovoltaicas, os fótons que integram a luz solar se chocam com os elétrons do silício energizando-os e transformando-os em condutores. Por meio de outro condutor externo à célula, conecta-se a camada negativa à positiva, gerando-se, assim, um fluxo de elétrons na conexão, ou seja, uma corrente elétrica.

2.4 Planejamento experimental [*Design of Experiments* - DOE]

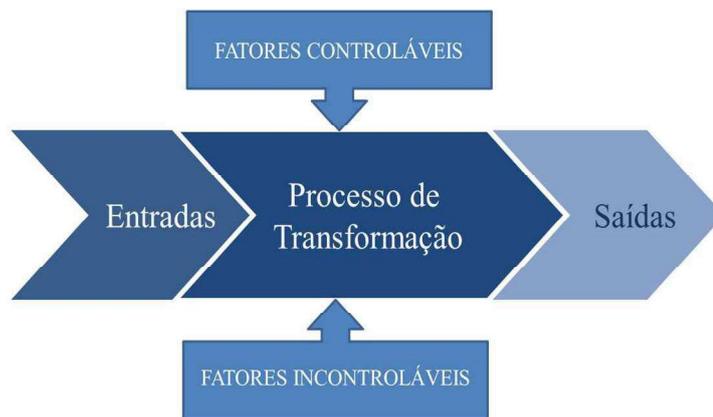
A necessidade crescente da otimização de produtos e processos, minimizando custos e tempos, maximizando rendimentos, produtividade e qualidade de produtos, tem levado profissionais de diferentes formações a buscarem técnicas sistemáticas de planejamento de experimentos. (Rodrigues e Iemma, 2014)

O planejamento experimental é um método estatístico ativo: nele realiza-se uma série de ajustes no processo, fazendo mudanças nas entradas e observando as mudanças

correspondentes nas saídas, o que produzirá informação que pode levar à melhoria do processo, podendo, também, ser muito úteis no estabelecimento de controle estatístico de um processo, pois os métodos de planejamento experimental podem ser usados para indicar essas variáveis influentes no processo.

Os experimentos planejados são uma poderosa ferramenta para melhoria de processo onde o resultado depende de diversas variáveis ou da combinação destas. Neles se induzem mudanças deliberadas ou estímulos nas variáveis de entrada (*inputs*) do processo ou sistema, de tal forma que seja possível observar e identificar os efeitos nas respostas ou nas variáveis de saída (*outputs*), conforme Fig.2.4.

Figura 2.4 - Modelo geral de um sistema de transformação.



Fonte: Adaptado de Montgomery (2017).

Segundo Montgomery (2017), as técnicas de planejamento e análise de experimentos são utilizadas basicamente para melhorar as características de qualidade dos produtos ou processos de fabricação, reduzir o número de testes e otimizar o uso de recursos da empresa (material, tempo dos funcionários, disponibilidade de equipamentos, etc.).

Em Montgomery (2017) é fornecido um roteiro para elaboração de um planejamento de experimentos, as etapas que o compõe são abordadas na seguinte ordem:

1ª) Reconhecimento e relato do problema. Torna-se bastante difícil reconhecer e aceitar a existência de um problema, se não ficar claro para todos qual é o problema, quais são os objetivos a serem alcançados com a solução do mesmo não teremos

resultados esperados com o planejamento. É de fundamental importância a participação de todos no entendimento do problema, Manutenção, Engenharia, Qualidade e principalmente os Operadores. A participação dos operadores é de grande importância pela sua habilidade prática e sensibilidade quando da análise das diversas variáveis do processo.

2ª) Escolha dos fatores e dos níveis. Devem ser levados em conta os intervalos sobre os Intervalos sobre os quais esses fatores irão variar, e os níveis específicos em que cada rodada será realizada. É importante investigar todos os fatores que possam ser importantes e não deixar ser influenciado por experiências passadas. Quando o objetivo é a varredura dos fatores ou caracterização do processo, é, em geral, melhor manter baixo o número de níveis de fatores.

3ª) Seleção da variável resposta. Na seleção da variável resposta, muitas vezes, a média ou o desvio padrão (ou ambos) da característica medida será a variável resposta. Respostas múltiplas não são raras. A capacidade do medidor é, também, um fator importante. Se a capacidade do medidor é baixa, então apenas efeitos grandes serão detectados pelo experimento ou será necessária replicação adicional.

4ª) Escolha do planejamento experimental. A escolha do planejamento envolve consideração pelo tamanho da amostra (número de replicações), seleção de uma ordem adequada de rodadas para as tentativas experimentais, ou se a formação de blocos ou outras restrições de aleatorização estão envolvidas.

5ª) Realização do experimento. Quando da realização do experimento, é de vital importância monitorar o processo, para garantir que tudo esteja sendo feito de acordo com o planejamento. Erros no procedimento experimental neste estágio, em geral, destruirão a validade do experimento.

6ª) Análise dos dados. Métodos estatísticos devem ser usados para analisar os dados, de modo que os resultados e conclusões sejam objetivos.

7ª) Conclusões e recomendações. Uma vez analisados os dados, o experimento deve acarretar conclusões práticas sobre os resultados e recomendar um curso de ação. Métodos gráficos são, em geral, usados neste estágio, particularmente na apresentação dos resultados para outras pessoas.

2.5 Prospecção tecnológica

Na premissa de buscar o que está sendo produzido sobre a temática de secagem por meio da utilização de secadores solar, foi realizado um levantamento tecnológico dos pedidos de patentes depositados em diferentes bancos de dados de propriedades industriais.

Também conhecido por prospecção tecnológica, esse levantamento é de fundamental importância, pois, como aborda Amparo et al. (2012), visa incorporar informações ao processo de gestão tecnológica.

Tal levantamento foi realizado ainda em 2016, nos bancos de dados do Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), da base norte americana, a *United States Patent and Trademark Office* (USPTO) e da base europeia, *European Patent Office* (Espacenet) e atualizado em 2020.

As pesquisas pelas palavras-chave “Secador” e “Solar” foram realizadas, simultaneamente, por busca avançada através do emprego do operador lógico *and* e acrescidos de * (para determinação das buscas por palavras com mesmo radical), considerando todos os documentos que apresentem esses termos no título e/ou resumo, consequentemente traduzidos para “*Solar*” and “*Dryer*” nas pesquisas nos bancos internacionais.

O primeiro registro de patente ocorreu em 1976, solicitado por Everitt e Stanley, nos Estados Unidos, desde então com o aumento da população, a busca por alimentos saudáveis, custo reduzido de transporte reduzido, produtos com maior tempo de prateleira dentre outros fatores, as pesquisas e inovações acerca dos secadores solares veem crescendo ano após ano.

Na busca preliminar com as palavras chaves foram encontradas 272 patentes registradas na Espacenet, 19 patentes registradas na USPTO e 20 patentes registradas no INPI.

No entanto, fez-se um refinamento dos dados a partir da análise preliminar das patentes por título e triagem a partir da leitura dos resumos, sendo excluídos pedidos que continham as palavras chave pesquisadas, mas não estavam relacionadas com os equipamentos pesquisados -qual seja, equipamentos secadores solar.

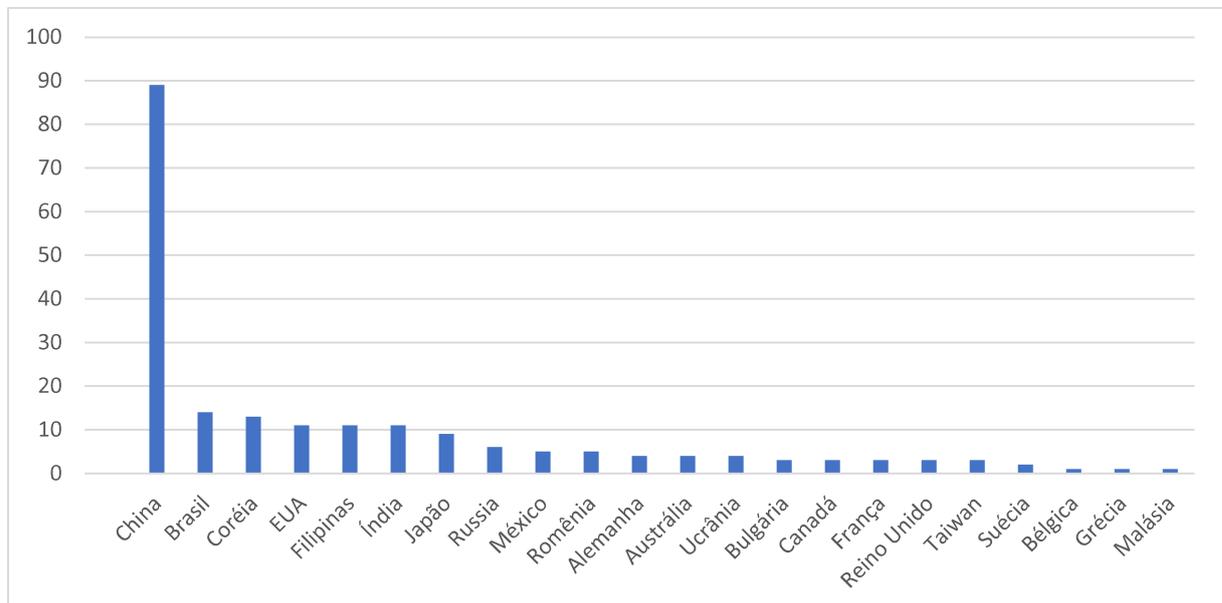
Na Tab. 2.1 são apresentados os resultados do levantamento, estratificados de acordo com a base de dados e os termos empregado na busca.

Tabela 2.1 – Quantidade de patentes de equipamentos secadores solar.

| Termo Pesquisado | Banco de Patentes | | |
|-------------------------|-------------------|-------|-----------|
| | INPI | USPTO | Espacenet |
| “Secador*” and “Solar*” | 14 | - | - |
| “Solar*” and “Dryer*” | - | 10 | 168 |

Fonte: Próprio autor.

Das 192 (cento e noventa e duas) patentes depositadas nos diferentes bancos de dados, 03 (três) não apresentavam siglas de países de origem, sendo 02 (duas) registradas na Organização Mundial de Propriedade Intelectual, que utiliza a sigla WO, e 01 (uma) na Organização Europeia de Patentes, que utiliza a sigla EP, restando 189 (cento e oitenta e nove) passíveis de atribuição de países de origem. No Gráf. 2.1 são apresentadas as quantidades de patentes por países.

Gráfico2.1 – Quantidade de patentes de equipamentos secadores solar por países.

Fonte: Próprio autor.

Destes 189 (cento e oitenta e nove) pedidos de patente, 116 (cento e dezesseis), o que corresponde a aproximadamente 61,4% dos depósitos, foram submetidos após o ano de 2010,

representando, portanto, um crescimento recente nos estudos de desenvolvimento de novos equipamentos.

É possível extrair que, embora muitas pesquisas estejam sendo realizadas com a finalidade de melhoramento deste tipo de equipamento, ainda existe amplo campo de desenvolvimento a ser trilhado.

Quando analisados os depósitos de patentes de origem brasileira que, mesmo timidamente, aparece em 2º (segundo) lugar no número de patentes de secadores solar, o que demonstra que o tema ora em desenvolvimento apresenta relevância nacionalmente, mas constando apenas com 02 (dois) modelo de utilidade (associada a uma patente de invenção previamente existente) e 12 (doze) patentes de invenção (quando existe alto grau de inventividade em uma invenção).

2.6 A importância econômica e nutricional das frutas

No Brasil, a base agrícola da cadeia produtiva de frutas já ultrapassou os 2,5 milhões de hectares cultivados, sendo responsável pela geração de, aproximadamente, seis milhões de empregos diretos. Consequentemente, o segmento da fruticultura está entre os principais geradores de renda, de empregos e de desenvolvimento rural. Com um volume estimado de 43 milhões de toneladas produzidas, a fruticultura tem permitido o país a ocupar o terceiro lugar no ranking mundial de produtores de frutas, com uma produção que supera os US\$ 26 bilhões (IBGE, 2017).

Segundo Malta et al. (2020), existem evidências convincentes de que o consumo de frutas e verduras também diminui o risco de diabetes e obesidade. Sendo assim, Gomes et al. (2014a) afirmam que além de representarem uma importante parcela na economia de um país, as frutas exercem um papel fundamental na nutrição humana, sendo fonte indispensável de vitaminas, minerais e fibras.

Malta et al. (2020) também sustentam que as frutas tem potencial na diminuição do risco de Doenças Crônicas Não Transmissíveis (DCNT) e, por isso, indica promover o consumo das mesmas como prioridade nas políticas nutricionais, alimentares e agrícolas. O consumo

insuficiente de frutas e hortaliças é apontado como um dos dez principais fatores de risco para a ocorrência de DCNT, sendo atribuído como responsável por 11% dos acidentes vasculares cerebrais, 19% dos casos de câncer gastrointestinal e 31% das doenças cardíacas isquêmicas.

A Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda um consumo mínimo de pelo menos cinco porções diárias de frutas e hortaliças, o que equivale a 400 g diárias. Estima-se que a ingestão de quantidades adequadas poderia evitar 1,7 milhões de mortes e 16 milhões de incapacitados anualmente no mundo (OMS, 2010). No entanto, estima-se que o consumo de frutas no Brasil corresponda a menos da metade das recomendações nutricionais relatadas (Silva et al., 2016), sendo ainda mais deficiente entre as famílias de baixa renda.

Um fator que acentua ainda mais o problema da desnutrição humana é a diminuição da disponibilidade de alimentos, agravada pela expansão da população mundial. Esse desequilíbrio entre a população e a oferta de alimentos é crescente, mas pode ser minimizado através da redução das perdas que ocorrem nas diferentes etapas da obtenção dos alimentos, desde a produção até o consumo.

Os alimentos contêm atividade biológica, levando à perda de qualidade e redução da vida de prateleira (Gomes et al., 2014b). Em todas as fases de seu processamento, os alimentos estão suscetíveis a processos deteriorantes e de contaminação, causadas principalmente por microrganismos, enzimas e reações do oxigênio com o ar, modificando suas estruturas primárias (Nespolo et al., 2015).

Para tanto, faz-se necessário o emprego de tecnologias de fácil domínio que promovam a diminuição do desperdício de frutas e hortaliças, que ocasionam, em curto prazo, enormes impactos para o País.

Com essa iniciativa, pode-se haver uma diminuição de custos operacionais e uma maior disponibilização de alimentos saudáveis ao consumidor, gerando uma melhor remuneração ao produtor rural, uma maior estabilização de preços ao consumidor e uma maior garantia nutricional à população.

A relevância da tecnologia de alimentos está no desenvolvimento de métodos e processos que possam reduzir as perdas, aumentando o aproveitamento de subprodutos, e, principalmente, permitindo maior disponibilidade desses, devido ao aumento da sua “vida de prateleira”, sem abrir mão da qualidade.

O século XX foi marcado pela implantação da área de tecnologia de alimentos, cuja industrialização em massa só foi possível graças a adoção de métodos de preservação e

conservação por ela instituídos. Esses métodos modernos, desde os mais simples até os mais elaborados, proporcionaram maior variedade de produtos de alta qualidade (Leonardi e Azevedo, 2018).

Conservação consiste em manter o alimento o mais estável possível, mesmo em condições nas quais isso não seria viável e têm por objetivo evitar as alterações nos alimentos, sejam elas de origem microbiana, enzimática, física ou química, oferecendo ao indivíduo alimentos, e produtos alimentícios, não só dotados de qualidades nutritivas, sensoriais, mas, principalmente, isentos de microrganismos nocivos e suas toxinas. (*Food Ingredients Brazil*, 2012).

Assim, pode-se dizer que conservar é manter as características do alimento estáveis, por isso, é importante ressaltar que o alimento a ser conservado precisa chegar à etapa de conservação com boa qualidade, uma vez que o processo de conservação não reverte o quadro de deterioração já iniciado, podendo apenas retardá-lo. Acompanhando esse progresso, a indústria também ofereceu novas perspectivas para a melhor apresentação dos produtos e manutenção de suas condições sensoriais e nutritivas (Nespolo et al., 2015).

2.6.1 O abacaxi

Da família das bromeliáceas, o abacaxizeiro (*Ananascomosus (L) Merril*) é classificado como uma planta monocotiledônea, herbácea e perene. Tem elevada demanda e alta rentabilidade no cenário agrícola de frutas e sua cultura é o segundo cultivo tropical de importância mundial.

Por apresentarem ótimas qualidades sensoriais, decorrente do sabor e aroma característicos, sendo, também, considerada boa fonte de vitaminas, açúcares e fibra, o abacaxi é bastante apreciado para o consumo tanto *in natura* como industrializado e é indicado para auxiliar no processo digestivo humano.

Para Aguiar et al. (2014), o abacaxi pode ser usado nas mais diversas formas de processamento industrial, podendo ser utilizado em pedaços, em calda, sucos, pedaços

cristalizados, geleias, licor, vinho, etc., obtendo-se como subproduto da industrialização álcool, rações para animais, enzimas de uso medicinal, dentre outros.

O período de colheita do abacaxi varia de acordo com o grau de tecnologia empregada na plantação, podendo ser ofertado durante todo o ano se for utilizadas técnicas de irrigação e reguladores de florescimento.

No entanto, mesmo com a utilização de tecnologias apropriadas, o cultivo nos períodos de entressafra do abacaxi pode acarretar na perda de qualidade do produto final, chegando a acontecer a diminuição de, aproximadamente, 30% de massa. Portanto, para aquisição de uma safra melhor, recomenda-se que a colheita ocorra entre os meses de novembro a abril, com pico de janeiro a março (Gomes, 2015).

Por se tratar de um fruto não climatérico, o abacaxi deixa de formar açúcares após sua retirada do abacaxizeiro, portanto, não continua amadurecendo após a colheita, fazendo-se necessária sua colheita após seu completo desenvolvimento fisiológico, colhendo-se os frutos em estágios de maturação diferentes de acordo com sua destinação e a distância do mercado consumidor (Reinhardt, 2018).

Contudo, o abacaxi apresenta elevado conteúdo de umidade, sendo, portanto, altamente perecível, ocasionando perdas significativas entre a colheita e a mesa do consumidor. Daí, a necessidade da utilização de processos capazes de conservar tais produtos e que garantam a oferta do produto ao longo de todo o ano. Na Tab. 2.2 estão apresentados alguns valores encontrados para o teor de umidade do abacaxi *in natura* reportados na literatura.

Tabela 2.2 - Teor de umidade do abacaxi *in natura*.

| Tabela | Teor de Umidade [%] | Referência |
|---------------|----------------------------|---------------------|
| IBGE | 85,4 | IBGE (2017) |
| TACO | 86,3 | NEPA/Unicamp (2011) |
| TBCA | 87,02 | USP e FoRC (2019) |

Fonte: Próprio autor.

Com elevada apreciação do ponto de vista nutricional tanto no consumo interno quanto na exportação, o cultivo do abacaxi destaca-se no ponto de vista socioeconômico pois se caracteriza como uma atividade de elevada absorção de mão de obra, contribuindo para o

mercado de trabalho de estáveis e temporários e, conseqüentemente, promovendo geração de renda e a fixação do homem no campo (Silva e Rodrigues, 2018).

Pelos dados da Organização da Agricultura e Alimentação (FAO, 2019), apenas os cinco principais produtores mundiais de abacaxi superaram a produção de 12,9 milhões de toneladas de abacaxi no ano de 2018, representando quase metade da produção mundial que foi de cerca de 27,9 milhões de toneladas.

Na Tab. 2.3 está o ranking dos principais produtores de abacaxi do mundo, com suas respectivas produções. Destaca-se a produção do Brasil, ocupando o 3º lugar neste ranking, sendo responsável por, aproximadamente, 9,5% da produção mundial, ficando atrás, apenas, da Costa Rica e das Filipinas, respectivamente com 12,3% e 9,8% de toda a produção do mundo.

Tabela 2.3 – Ranking dos principais produtores de abacaxi do mundo.

| Ordem | País | Produção [toneladas] |
|--------------|---------------|-----------------------------|
| 1º | Costa Rica | 3.418.155 |
| 2º | Filipinas | 2.730.985 |
| 3º | Brasil | 2.650.479 |
| 4º | Tailândia | 2.113.380 |
| 5º | China | 2.005.555 |

Fonte: Adaptado de FAO (2019).

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019), através da pesquisa de Produção Agrícola Municipal – PAM, integrada ao Levantamento Sistemático da Produção Agrícola - LSPA, o estado da Paraíba ocupa o 2º lugar na lista dos estados maiores produtor de abacaxi no cenário nacional, com uma produção superior as 334,8 mil toneladas (o equivalente a 18,9% da produção nacional), ficando atrás apenas do Pará (com 426,8 mil toneladas) e seguido pelo estado de Minas Gerais, com 192,2 mil toneladas (10,9% do total de frutos produzidos no Brasil).

Com este quantitativo, a Paraíba representa mais de 50% da produção do Nordeste, permitindo à região o segundo lugar no ranking da participação regional em relação à produção nacional de abacaxi em 2018.

Na Tab. 2.4 está o ranking da participação regional na safra de abacaxi no país, com suas respectivas proporções na produção.

Tabela 2.4 – Ranking da participação regional na produção nacional de abacaxi.

| Ordem | País | Participação na Safra [%] |
|--------------|-----------------|----------------------------------|
| 1º | Norte | 34,1 |
| 2º | Nordeste | 33,6 |
| 3º | Sudeste | 26,9 |
| 4º | Centro-Oeste | 4,3 |
| 5º | Sul | 1,1 |

Fonte: Adaptado de IBGE (2019).

2.6.2 Frutas desidratadas

Segundo Couto et al. (2019), tem crescido significativamente o mercado consumidor de produtos naturais e a adoção de uma dieta rica em frutas, percebendo-se, portanto, uma mudança alimentar na população. Conseqüentemente, esses consumidores têm buscado tanto produtos *in natura* quanto minimamente processados, desejando-se que estes mantenham as características de sabor e, principalmente, características nutricionais do alimento originário.

Verifica-se que a produção de frutas desidratadas tem conseguido aceitação do mercado consumidor e se caracterizado como um importante ramo no comércio de alimentos saudáveis, agregando valor ao produto e permitindo uma oferta de alimentos adequada à demanda nutricional requerida.

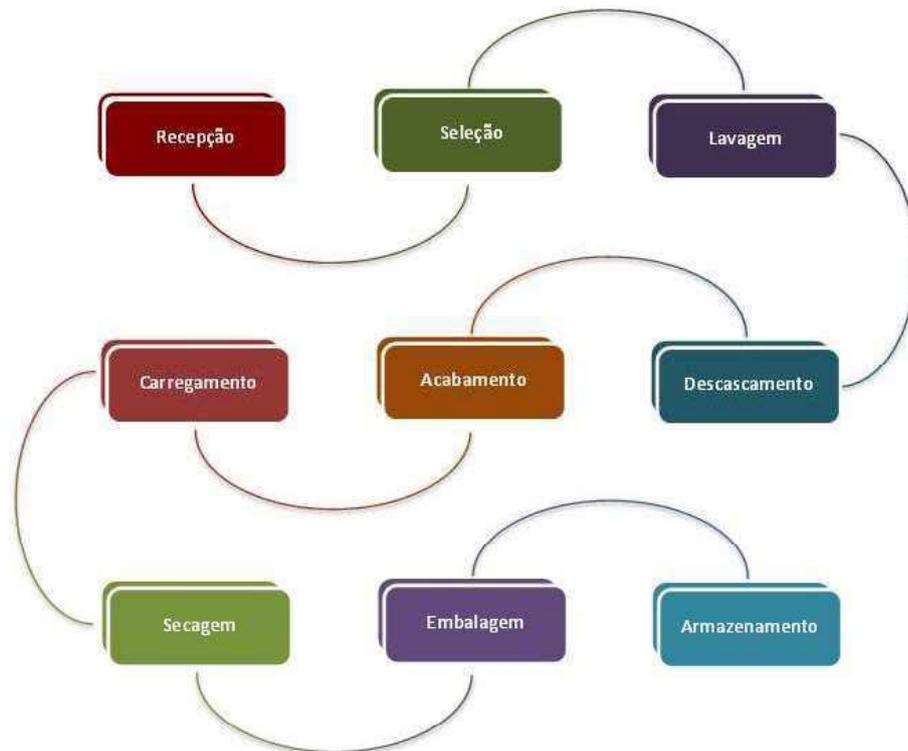
Nesse sentido, o processo termodinâmico da secagem permite estabilizar a atividade microbológica e reduzir as reações químicas e enzimáticas, permitindo a disponibilidade do fruto durante todo o ano, além de reduzir sua massa e, conseqüentemente, os custos de armazenamento e de transporte, sem afetar suas características organolépticas nem sua qualidade nutricional.

Desta forma, as frutas desidratadas representam uma fonte concentrada de calorias, fibras, vitaminas, açúcar natural e alguns nutrientes, além de terem um prazo de validade muito maior que as frutas frescas, devido à diminuição da concentração da água no produto.

A associação de operações e processos adequados durante a fabricação de determinado alimento pode garantir a manutenção da qualidade no produto final. No entanto, mesmo o processamento de frutas desidratadas agregando valor ao produto, só se terá como resultado final frutas secas saudáveis e saborosas se forem utilizadas durante o processamento frutas de qualidade, pois a qualidade final do produto que passará pelo processo de secagem depende da matéria prima utilizada.

Para Gomes (2015), o processo de produção de frutas desidratadas segue uma sequência de etapas que vai desde a recepção da fruta *in natura* em estágio de maturação adequado, que lhe permita bom sabor, até seu correto armazenamento, em local capaz de evitar os efeitos de reidratação, conforme proposta na Fig. 2.1, de modo que garanta a disponibilização de um produto de qualidade e que, atendendo as exigências legais, esteja pronto para transporte e comercialização:

Figura 2.1 - Fluxograma para produção de frutas desidratadas.



Fonte: Gomes (2015).

Para a secagem, indicam-se a escolha de frutas de maior importância econômicas, sendo as mais adequadas para o processamento a banana, a uva, a ameixa, a manga, a maçã e o abacaxi.

Para garantir qualidade e atender aos padrões que observem às normas de qualidade e higiene estabelecidas pela legislação, as frutas desidratadas, isto é, secas, são obtidas com frutas maduras, inteiras ou em pedaços e esse processo envolve tecnologias apropriadas, garantindo um produto saudável.

No que se refere ao processamento industrial, seja em grande ou pequena escala, há a necessidade que o desenvolvimento dessas tecnologias contribua para minimizar os efeitos adversos provocados nos alimentos pelo processamento, de forma a atender a crescente exigência por produtos de melhor qualidade por parte dos consumidores.

Esse é o caso das frutas desidratadas utilizadas para consumo imediato ou como ingredientes na formulação de diversos tipos de alimentos, tais como, em produtos de confeitaria, sorvetes, sobremesas, saladas de frutas e iogurte.

Em todos os casos é desejável que os ingredientes mantenham a cor, o aroma, e o sabor o mais próximo da fruta *in natura*, preferencialmente sem a utilização de aditivos, e proporcionando uma textura agradável ao alimento depois do processamento.

Capítulo III
MATERIAIS E MÉTODOS

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos adequados à realização de um trabalho de pesquisa científica parte da necessidade de resolver os questionamentos em torno do objeto de estudo. Na busca de determinar a melhor solução aos problemas apresentados, faz-se indispensável a realização de uma revisão literária e uma prospecção tecnológica a fim de perceber como os demais pesquisadores estão lidando com a matéria e quais campos de pesquisa apresentam maior potencial de exploração.

Concomitantemente, executou-se os procedimentos de desenvolvimento do equipamento proposto para viabilizar a realização de testes experimentais nos processos estudados.

Após a determinação de cada variável a ser analisada, foi utilizado o planejamento experimental fatorial para analisar as influências de cada fator sobre o rendimento térmico do sistema e, conseqüentemente, determinou-se o melhor dimensionamento e composição de cada elemento do secador solar.

A partir dos testes experimentais foram realizadas as análises necessárias verificando a competitividade técnica do equipamento desenvolvido, ressaltando as vantagens e desvantagens em relação a outros secadores utilizados para a mesma finalidade, propiciando o melhoramento do sistema.

Posteriormente, o secador solar em desenvolvimento foi testado na secagem de abacaxi, permitindo analisar a cinética de secagem do produto e a viabilidade técnica e econômica do sistema.

3.1 Caracterização do local de realização dos experimentos

As atividades do desenvolvimento desta pesquisa foram conduzidas no Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas (LEMT), da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica

(UAEM), do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) em Campina Grande-PB, onde se dispõe de estrutura física e de pessoal adequada aos procedimentos de pesquisa.

Os experimentos de campo foram realizados na cidade de Patos - PB, cuja incidência de radiação solar é elevada e mais regular. O município de Patos está inserido na área geográfica de abrangência do semiárido brasileiro, na mesorregião do Sertão Paraibano, situado na porção central do estado (Borges et al., 2018), distante cerca de 180 km de Campina Grande - PB (Queiroga, 2019).

Na Tab. 3.1 estão os dados, para cidade de Patos, de temperaturas ao longo do ano a partir de uma série histórica de dados observados num intervalo de 30 anos e de irradiação solar diária média a partir de um total de 17 anos de imagens de satélites.

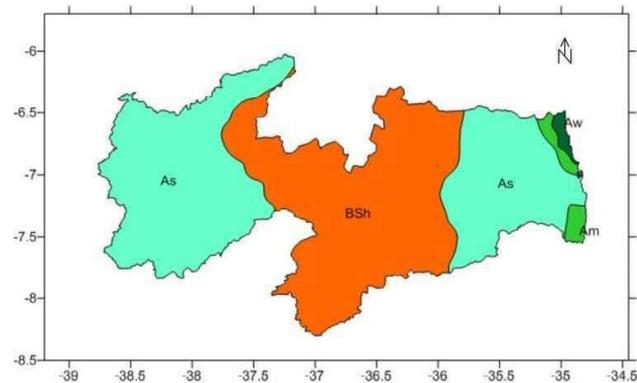
Tabela 3.1 - Dados climatológicos da cidade de Patos - PB

| Meses | Temperatura Média | Temperatura Média | Irradiação Solar Diária |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| | Mínima (°C) | Máxima (°C) | Média (kWh/m².dia) |
| Jan | 22 | 33 | 6,28 |
| Fev | 22 | 33 | 6,23 |
| Mar | 22 | 32 | 6,33 |
| Abr | 21 | 31 | 5,96 |
| Mai | 21 | 31 | 5,23 |
| Jun | 20 | 29 | 4,79 |
| Jul | 20 | 30 | 5,09 |
| Ago | 20 | 31 | 5,89 |
| Set | 20 | 33 | 6,46 |
| Out | 21 | 34 | 6,59 |
| Nov | 22 | 35 | 6,64 |
| Dez | 22 | 33 | 6,39 |
| Média | 21,08 | 32,08 | 5,99 |

Fonte: Adaptado de StormGeo (2020); CRESESB (2019).

Segundo Alvares et al. (2014), a classificação climática de Köppen-Geiger adequada para o clima da região é *BSh* – clima semiárido, quente e seco no período de junho a dezembro e de chuvas escassas de janeiro a maio.

Figura 3.1 - Classificação climática de Köppen-Geiger no estado da Paraíba.



Fonte: Francisco et al. (2017).

3.2 Modelos de secadores desenvolvidos pelo GEDS/UFCG

Na busca de proporcionar o desenvolvimento de um modelo de secador solar que atenda às necessidades dos produtores da região, há dez anos o GEDS/UFCG vem pesquisando inovações que possam representar melhorias na eficiência dos equipamentos. Dentre as várias pesquisas realizadas, pode-se elencar os principais modelos desenvolvidos:

- Secadores de exposição direta:
 - ✓ Caixa retangular em MDF com cobertura de vidro (Silva, 2008);
 - ✓ Caixa ergonômica hexagonal em MDF com cobertura de policarbonato (Lacerda, 2014).
 - ✓ Caixa retangular em MDF com cobertura de policarbonato (Conceição, 2019);

- Secadores de exposição indireta:
 - ✓ Coletor e câmara de secagem em MDF com acoplamento dos componentes por tubos de PVC e suprimento do aquecimento por GLP (Júnior, 2012);
 - ✓ Coletor e câmara de secagem em MDF com acoplamento dos componentes por encaixe inclinado e convecção forçada acionada por painel fotovoltaico (Gomes, 2015);
 - ✓ Coletor e câmara de secagem em MDF e superfície capacitiva no coletor solar (Nunes, 2016);
 - ✓ Coletor e câmara de secagem em MDF com controle das propriedades termodinâmicas (Melo, 2016).
 - ✓ Coletor e câmara de secagem em MDF com sistema de aquisição de dados automatizado de perda de massa (Trajano, 2017);

Nas inovações já apresentadas e nas pesquisas que estão sendo desenvolvidas, verificou-se empiricamente que as principais variáveis que influenciam o rendimento dos equipamentos propostos estão atreladas a fatores de temperatura, umidade relativa e velocidade do fluido de trabalho.

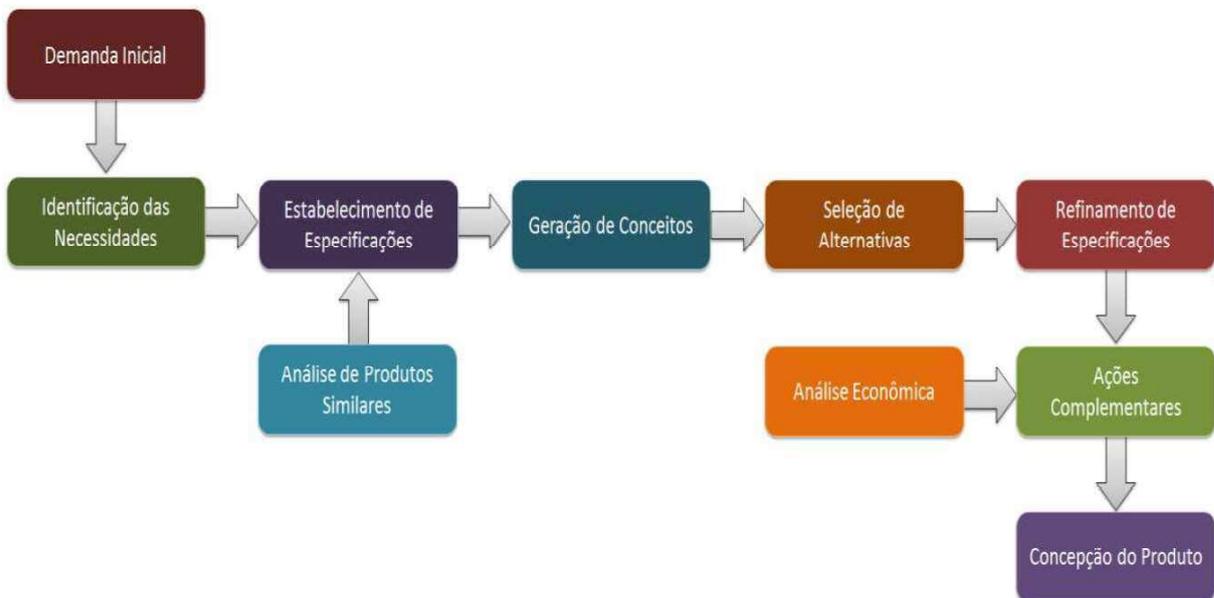
Portanto, a partir deste entendimento, as inovações propostas para o equipamento ora desenvolvido permitiram avaliar as influências das variáveis já analisadas em modelos anteriores e determinar um modelo otimizado, sem, contudo, deixar de se verificar a propositura de adequação de novos componentes.

3.3 Desenvolvimento do secador solar de frutas

A concepção de uma máquina compreende uma sequência de etapas que, se observadas cautelosamente, chega-se, conseqüentemente, a obtenção de um novo equipamento ou na

otimização de um já existente. Na Fig. 3.2, são apresentadas as mais importantes etapas do processo de desenvolvimento de um produto e que será trilhado na concepção do sistema de secagem objeto desse trabalho.

Figura 3.2 - Etapas do processo de desenvolvimento de um produto.



Fonte: Gomes (2015).

Seguindo a demanda de desenvolver um sistema de secagem a ser utilizado na produção de frutas desidratadas, cujo processo necessita ocorrer de forma gradual, com parâmetros específicos de temperatura, a fim de evitar a caramelização durante a secagem, o que impede a retirada da água do produto, e por base nos modelos que já foram ou estão sendo desenvolvidos pela equipe do GEDS/UFCG e demais pesquisadores da área de investigação de tecnologia solar, é possível estabelecer as especificações dos modelos mais adequados a demanda inicial.

Dentre os modelos já desenvolvidos que se enquadram nas especificações estabelecidas, escolheu-se um sistema de secagem composto por coletor solar e câmara de secagem. Diante disso, propôs-se a metodologia do planejamento experimental fatorial como alternativa para o refinamento das especificações, de forma a tornar possível analisar quais fatores de dimensionamento e composição são estatisticamente significantes na escolha de um melhor modelo.

Sendo assim, determinam-se as variáveis descritas na secção 3.4 a serem analisadas e, com os resultados encontrados, realizaram-se as análises de viabilidade técnica e econômica

culminando na concepção de um produto de inovação a ser submetido à apreciação em depósito de patente.

Na fase de determinação do protótipo otimizado do equipamento, os testes foram conduzidos por componentes, sem a necessidade de carga de material a ser desidratado, avaliando-se, apenas a energia fornecida ao processo e os aspectos construtivos.

3.4 Planejamento experimental fatorial proposto

O planejamento experimental foi conduzido a partir da predeterminação de níveis (N) para cada fator (K), denotando-se um esquema fatorial completo por N^K , onde o resultado dessa expressão determina o número de ensaios a serem analisados para determinação das influências estatísticas ou não de cada fator.

No entanto, como o número de ensaios cresce exponencialmente à medida na qual se aumenta o número de níveis e fatores, fica economicamente inviável a utilização de esquema completo para 6 ou mais fatores com 2 níveis ($2^6 = 64$ ensaios) e para 4 ou mais fatores com 3 níveis ($3^4 = 81$ ensaios), necessitando, nesse caso, da realização de delineamentos prévios executados com base em frações de fatoriais, fatores e/ou níveis, como atenuante para o rápido crescimento no número de ensaios em fatoriais completos.

Com as análises que o trabalho se propõe a realizar, ter-se-ia um planejamento experimental completo de, pelo menos, $2^6 = 64$ ensaios [fatores: volume interno, superfície transparente, isolamento térmico, relação de volume da câmara com o coletor, tipo de câmara e tipo de ventilação; e níveis: máximo e mínimo (sejam eles quantitativos e/ou qualitativos)], chegando a 128 experimentos quando computados as réplicas dos ensaios.

Sendo assim, para minimizar a necessidade de tantos experimentos, decidiu-se fracionar os fatoriais por cada componente do sistema de secagem, restando 03 (três) fatores (isolamento térmico, volume interno e superfície transparente) a serem analisados na determinação do modelo otimizado do coletor solar e 03 (três) fatores (relação de volume da câmara com o coletor, tipo de câmara e tipo de ventilação) analisados na escolha da câmara de secagem, diminuindo para 16 ensaios necessários, o que totaliza, com as réplicas, 32 experimentos.

3.4.1 Planejamento experimental fatorial para o coletor solar

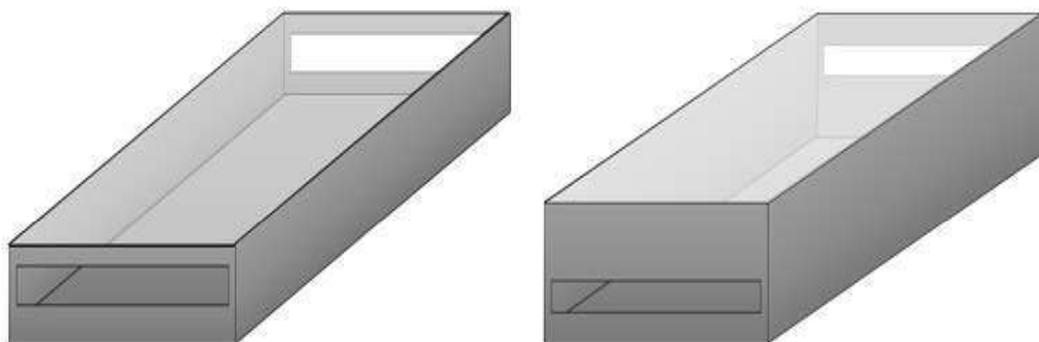
No desenvolvimento do componente no qual se capta a energia responsável pelo aquecimento do ar de secagem, ou seja, o coletor solar, propôs-se que seu dimensionamento otimizado fosse resultante da combinação do volume interno, com diferentes tipos de material transparente na cobertura e diferentes materiais da estrutura de isolamento.

Para determinação do melhor coletor solar plano, através da realização do planejamento experimental na análise do volume interno, material isolante e superfície transparente, delineou-se algumas variáveis afim de minimizar os custos de confecção dos protótipos sem, contudo, prejudicar o estudo.

Fixou-se as dimensões das superfícies transparentes em 0,80 m de largura e 1,25 m de comprimento, totalizando 1,00 m² de área de captação da energia solar. Desta forma, para variar os volumes dos coletores solares, a altura dos mesmos ficou em 0,10 m e 0,20 m, correspondendo, respectivamente, aos coletores de 100 e 200 litros.

Logo, para atender às obrigações do planejamento experimental fatorial, foram confeccionados 04 (quatro) “carcaças” de coletores solares com os volumes e materiais analisados (dois de madeira com 100 e 200 litros e dois de poliestireno expandido com 100 e 200 litros) e 02 (duas) “coberturas” para essas estruturas (uma de vidro e outra de policarbonato alveolar).

Figura 3.3 - Desenho esquemático dos coletores solares.



a) coletor solar de 100 litros

b) coletor solar de 200 litros

Fonte: Próprio autor.

O que permitiu alcançar 08 (oito) coletores solares necessários, ficando estes distribuídos da seguinte forma:

- a) **Coletor Solar 1:** volume de 200 litros, cobertura de policarbonato e estrutura de madeira;
- b) **Coletor Solar 2:** volume de 100 litros, cobertura de policarbonato e estrutura de madeira;
- c) **Coletor Solar 3:** volume de 200 litros, cobertura de vidro e estrutura de madeira;
- d) **Coletor Solar 4:** volume de 100 litros, cobertura de vidro e estrutura de madeira;
- e) **Coletor Solar 5:** volume de 200 litros, cobertura de policarbonato e estrutura de isopor;
- f) **Coletor Solar 6:** volume de 100 litros, cobertura de policarbonato e estrutura de isopor;
- g) **Coletor Solar 7:** volume de 200 litros, cobertura de vidro e estrutura de isopor;
- h) **Coletor Solar 8:** volume de 100 litros, cobertura de vidro e estrutura de isopor;

Desta forma, a análise fatorial no desenvolvimento do coletor solar contará com 03 (três) fatores, cujos níveis foram estimados quantitativamente em máximo e mínimo (volume interno) e quantitativamente entre dois materiais nos demais fatores, portanto, 02 (dois) níveis, resultando num planejamento fatorial $2^3 = 8$ ensaios para o coletor solar, totalizando, portanto, 16 experimentos com a realização das réplicas.

a) Codificação das variáveis no coletor solar:

- ✓ Volume interno: +1 [200 litros] e -1 [100 litros];
- ✓ Superfície transparente: +1 [policarbonato alveolar] e -1 [vidro];
- ✓ Isolante Térmico: +1 [madeira maciça] e -1 [isopor].

b) Matriz de planejamento para o coletor solar:

Tabela 3.2 - Matriz de planejamento experimental para o coletor solar

| Ensaio | Variáveis | | | Respostas |
|--------|-----------------|----------------------------|---------------------|------------------|
| | Volume | Superfície Transparente | Isolante Térmico | $\eta_{t_{col}}$ |
| 1 | +1 [200 litros] | +1 [Policarbonato] | +1 [Madeira] | |
| 2 | -1 [100 litros] | +1 [Policarbonato] | +1 [Madeira] | |
| 3 | +1 [200 litros] | -1 [Vidro] | +1 [Madeira] | |
| 4 | -1 [100 litros] | -1 [Vidro] | +1 [Madeira] | |
| 5 | +1 [200 litros] | +1 [Policarbonato] | -1 [isopor] | |
| 6 | -1 [100 litros] | +1 [Policarbonato] | -1 [isopor] | |
| 7 | +1 [200 litros] | -1 [Vidro] | -1 [isopor] | |
| 8 | -1 [100 litros] | -1 [Vidro] | -1 [isopor] | |

Fonte: Próprio autor.

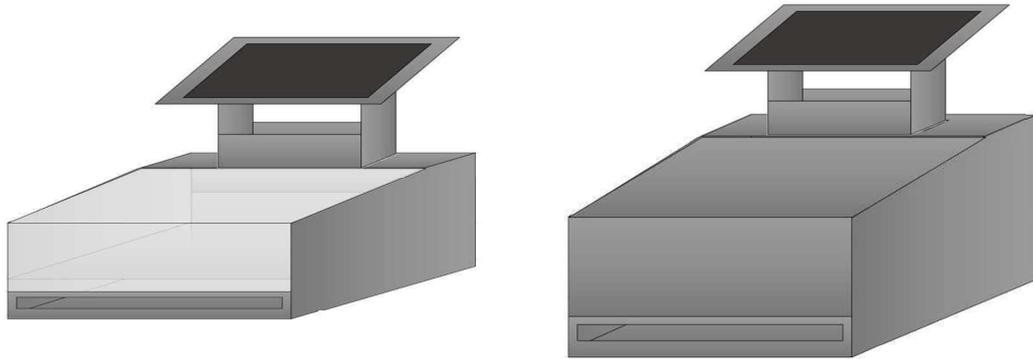
3.4.2 Planejamento experimental fatorial para a câmara de secagem

Para a câmara de secagem foram analisadas a relação de volume desta com o coletor solar otimizado e o seu tipo: se indireto (quando a câmara de secagem é isolada termicamente) ou misto (quando a câmara de secagem também apresenta superfície transparente que recebe radiação solar e continua promovendo o aquecimento do fluido de trabalho), além do tipo de ventilação natural ou forçada.

Logo, para determinação da melhor câmara de secagem, através da realização do planejamento experimental na análise da relação de volume com o coletor solar (metade do volume ou mesmo volume), do tipo de secador (se misto ou indireto) e do tipo de ventilação (natural, sem o acionamento do sistema de exaustão auxiliar, ou forçada, com o acionamento).

Para atender ao delineamento proposto, foi necessário confeccionar 02 (duas) estruturas de câmara de secagem (mesmo volume ou metade do volume do coletor solar, ambas do material resultante do planejamento experimental do coletor solar) e 04 (quatro) coberturas para essas estruturas (uma do mesmo material isolante e outra do mesmo material da superfície transparente do coletor para cada estrutura), além de uma chaminé, com coolers acionados por um mini painel fotovoltaico, funcionando, portanto, como sistema exaustor auxiliar.

Figura 3.4 - Desenho esquemático das câmaras de secagem.



a) câmara de secagem de 50 litros, mista b) câmara de secagem de 100 litros, indireta

Fonte: Próprio autor.

Resultando, portanto, da totalização das combinações permitidas, 08 (oito) especificações de câmaras de secagem, ficando assim distribuídas:

- a) **Câmara de Secagem 1:** mesmo volume do coletor, indireto e com ventilação forçada;
- b) **Câmara de Secagem 2:** metade do volume do coletor, indireto e com ventilação forçada;
- c) **Câmara de Secagem 3:** mesmo volume do coletor, misto e com ventilação forçada;
- d) **Câmara de Secagem 4:** metade do volume do coletor, misto e com ventilação forçada;
- e) **Câmara de Secagem 5:** mesmo volume do coletor, indireto e com ventilação natural;
- f) **Câmara de Secagem 6:** metade do volume do coletor, indireto e com ventilação natural;
- g) **Câmara de Secagem 7:** mesmo volume do coletor, misto e com ventilação natural;
- h) **Câmara de Secagem 8:** metade do volume do coletor, misto e com ventilação natural;

Portanto, a análise fatorial no desenvolvimento da câmara de secagem contará com 03 (três) fatores, cujos níveis foram estimados quantitativamente em máximo e mínimo (relação de volume) ou qualitativamente em indireto ou misto (tipo de secador) e forçada ou natural (tipo de ventilação), portanto, 02 (dois) níveis, resultando num planejamento fatorial $2^3 = 8$ ensaios para a câmara de secagem, totalizando, portanto, com a realização das réplicas, 16 experimentos.

a) Codificação das variáveis na câmara de secagem:

- ✓ Relação de volume: +1 [mesmo volume do coletor] e -1 [metade volume do coletor];
- ✓ Tipo de secador: +1 [indireto] e -1 [misto];
- ✓ Tipo de ventilação: +1 [forçada] e -1 [natural]

b) Matriz de planejamento para a câmara de secagem:

Tabela 3.3 - Matriz de planejamento experimental para a câmara de secagem

| Ensaio | Variáveis | | | Respostas |
|--------|-------------------|---------------|---------------------|------------------|
| | Relação de Volume | Tipo | Sistema de Exaustão | $\eta_{t_{cam}}$ |
| 9 | +1 [mesmo] | +1 [indireto] | +1 [com] | |
| 10 | -1 [metade] | +1 [indireto] | +1 [com] | |
| 11 | +1 [mesmo] | -1 [misto] | +1 [com] | |
| 12 | -1 [metade] | -1 [misto] | +1 [com] | |
| 13 | +1 [mesmo] | +1 [indireto] | -1 [sem] | |
| 14 | -1 [metade] | +1 [indireto] | -1 [sem] | |
| 15 | +1 [mesmo] | -1 [misto] | -1 [sem] | |
| 16 | -1 [metade] | -1 [misto] | -1 [sem] | |

Fonte: Próprio autor.

3.5 Materiais utilizados

Os materiais utilizados para construção do coletor solar e da câmara de secagem foram selecionados de maneira a atender requisitos básicos para desenvolver um equipamento capaz

de promover a secagem de frutas e, principalmente, que possa ter sua tecnologia disseminada junto a pequenos produtores da agricultura familiar e/ou cooperativas, permitindo-os desenvolver seus próprios equipamentos.

Assim, em todo processo de otimização, empregou-se técnicas de carpintaria de fácil domínio além de matérias primas facilmente encontradas na região, buscando, sempre, facilitar a construção do sistema de secagem, resultando num equipamento que agregasse elevada eficiência energética e baixo custo.

3.5.1 Isolantes térmicos

Na estrutura dos componentes foram testados madeira maciça de Pinus de reflorestamento e poliestireno expandido - isopor (Fig. 3.5), ambos com 25 mm de espessura, o que melhora a alta capacidade de isolamento térmico que os materiais dos mesmos já dispõem.

Figura 3.5 - Isolantes térmicos.



a) Poliestireno expandido



b) Madeira maciça de Pinus

Fonte: Próprio autor.

Para garantir a estabilidade estrutural dos coletores de poliestireno expandido, além de melhorar a higiene do processo e a transferência de calor para o fluido de trabalho, os coletores solares foram revestidos com chapas de alumínio de 0,5 mm de espessura e fixados com cantoneiras e perfis de alumínio.

Figura 3.6 - Revestimento de alumínio e acabamento com cantoneiras.



a) Revestimento interno em alumínio

b) Acabamento em alumínio

Fonte: Próprio autor.

3.5.2 Superfícies transparentes

Como superfície transparente, utilizada na captação dos raios solares, foram testados o emprego de policarbonato alveolar e vidro (Fig. 3.7), ambos na espessura de 4 mm, em dimensões de 0,80 m de largura por 1,25 m de comprimento, totalizando, portanto, 1,00 m² de área de captação de energia solar.

Figura 3.7 - Superfícies transparentes.



a) Policarbonato alveolar

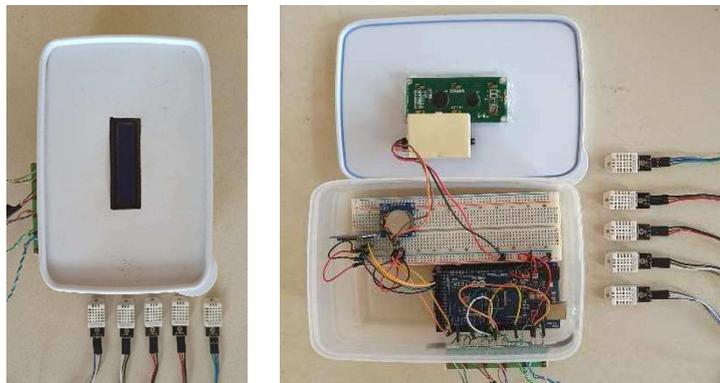
b) Vidro

Fonte: Próprio autor.

3.5.3 Componentes eletrônicos

Para o monitoramento das propriedades termodinâmicas do fluido de trabalho, foi desenvolvido um sistema de monitoramento e aquisição de dados (SMAD) por meio da utilização de uma plataforma de prototipagem eletrônica tipo Arduino com sensores de medição de temperatura e umidade do tipo DHT 22 (Fig. 3.8).

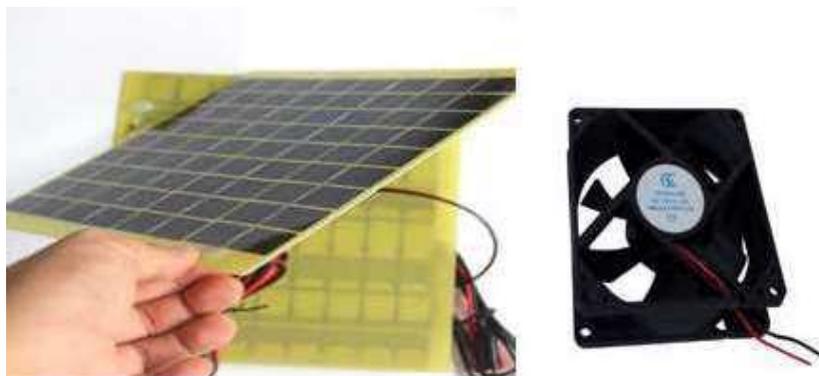
Figura 3.8 - Sistema de monitoramento e aquisição de dados - SMAD.



Fonte: Próprio autor.

Além do SMAD, o sistema de secagem utiliza-se de *coolers* eletrônicos de 12V como mecanismo de exaustão e um mini painel solar de 12V e 10W (Fig. 3.9) como sistema fotovoltaico *off grid* para alimentação dos componentes.

Figura 3.9 - Mini painel fotovoltaico e cooler.



Fonte: Próprio autor.

3.5.4 Frutas

Os frutos utilizados durante a realização dos testes serão adquiridos no comércio local, junto a pequenos produtores da região, nas feiras livres da cidade, estando ausente de danos físicos e/ou deterioração provenientes de insetos e em perfeito estado de maturação.

Figura 3.10 - Abacaxi Pérola.



Fonte: Próprio autor.

3.6 Eficiência do processo de secagem

A eficiência do processo de secagem será avaliada através da medição da variação das massas do produto a ser seco, através da Eq. 3.3, que apresenta os parâmetros necessários a essa determinação.

$$\eta_p = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{m_{\text{água inicial}}} \cdot 100 \quad (3.3)$$

Onde,

η_p = eficiência do processo [%];

$m_{inicial}$ = massa inicial do produto [kg];

m_{final} = massa final do produto [kg];

$m_{\acute{a}gua\ inicial}$ = massa inicial de água presente no produto a ser secado [kg].

3.7 Determinação das curvas de secagem

Para obtenção das curvas que indicam a relação entre a razão de umidade em função do tempo de secagem de secagem em cada experimento, denominadas de curvas de cinéticas de secagem, serão calculadas a Razão de Umidade, através da Eq. 3.1, plotada em gráfico em função do tempo de secagem.

$$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (3.1)$$

Onde,

RU = razão de umidade, base seca;

X = teor de umidade, base seca;

X_e = teor de umidade de equilíbrio, base seca;

X_0 = teor de umidade inicial, base seca.

Os dados experimentais referentes à variação da massa do produto durante o processo de secagem, em intervalos regulares de 60 (sessenta) minutos, serão obtidos com o uso de uma balança digital, modelo KC 01, marca Western.

A avaliação do processo de secagem foi obtida comparando-se os valores experimentais com o modelo matemático empírico de Page (Eq. 3.2), pois é o que melhor se ajusta à cinética de secagem do abacaxi dentre os comumente utilizados na literatura (Alexandre, 2009).

$$RU = \exp(-K \cdot t^n) \quad (3.2)$$

Onde,

K = constante de secagem [min^{-1}];

n = parâmetro do modelo;

t = tempo de secagem [min].

Os parâmetros necessários à determinação das curvas de secagem (razão de umidade e tempo) foram calculados por meio do *software Microsoft Excel* versão 2019 e ajustados ao modelo matemático de Page utilizando-se o programa computacional *Statistica* versão 7.0, onde se determinou os respectivos coeficientes de determinação (R^2), verificando-se a predição ou não do processo por meio do modelo matemático analisado.

3.8 Rendimento térmico do equipamento

A partir do conceito básico de rendimento termodinâmico, como sendo a razão entre a potência entregue pelo sistema e a potência disponível ao mesmo, Varella e Guerra (2014) afirmaram que o rendimento de um secador solar pode ser determinado pela Eq. 3.4.

$$\eta_t = \frac{P_u}{A \cdot I} \cdot 100 \quad (3.4)$$

Onde,

η_t = rendimento do secador solar [%];

P_u = potência transferida ao fluido de trabalho [W];

A = área de cobertura transparente [m^2];

I = radiação solar incidente [W/m^2].

A potência transferida ao fluido de trabalho, também chamada de potência útil, é determinada pela Eq. 3.5, e representa a quantidade de energia transferida ao fluido de trabalho, neste caso, o ar ambiente:

$$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.5)$$

Onde,

\dot{m} = vazão mássica do fluido de trabalho [kg/s];

c_p = calor específico do fluido de trabalho [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$];

ΔT = variação de temperatura [K].

Dessa forma, o rendimento térmico de um secador solar é expresso em função da potência útil, da radiação solar incidente, da área de cobertura transparente e, conseqüentemente, da vazão do fluido de trabalho, do calor específico do mesmo e da variação de temperatura obtida.

Para determinação da radiação solar incidente, serão adotadas duas metodologias. Nos testes realizados em Campina Grande - PB o LEMT dispõe de uma estação meteorológica com um piranômetro e nos testes realizados na cidade de Patos - PB os dados utilizados são os disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)¹ para radiação solar através do seu portal na internet. Sendo, a radiação solar média, calculada como determina a Eq. 3.6.

¹Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, órgão do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, que fornece informações meteorológicas à sociedade brasileira através das suas estações meteorológicas distribuídas pelo país, cujos dados estão disponíveis em
<<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>

$$\overline{Rad} = \frac{\sum Rad}{n} \quad (3.6)$$

Onde,

\overline{Rad} = radiação solar média [W/m²];

Rad = radiação solar verificada [Wh/m²];

n = número de verificações [h].

A vazão mássica a ser obtida através da medição da velocidade do ar que passará através da seção da chaminé, será verificada por meio de um anemômetro digital portátil, modelo VEC-GM 8901, marca Vectus, sendo calculada pela Equação 3.7.

$$\dot{m} = v_{ar} \cdot A_2 \cdot \rho \quad (3.7)$$

Onde,

v_{ar} = velocidade do ar [m/s];

A_2 = área da seção transversal da chaminé [m²];

ρ = massa específica do ar [kg/m³].

A variação de temperatura nos diversos pontos de interesse, dado pela Equação 3.8, foram medidas em intervalos regulares a cada 30 (trinta) minutos com um sistema de aquisição de dados.

$$\Delta T = T_{t+\Delta t} - T_t \quad (3.8)$$

Onde,

$T_{t+\Delta t}$ = Temperatura num instante $t + \Delta t$ [K];

T_t = Temperatura num instante t [K].

Capítulo IV
RESULTADOS E DISCUSSÕES

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados ora apresentados representam a aplicação da metodologia do planejamento experimental fatorial no dimensionamento dos componentes de um sistema de secagem solar de frutas, para inferência da significância estatística das variáveis analisadas através das respostas de eficiência energética.

Após a determinação do protótipo otimizado, mostra-se os resultados do processo de secagem de abacaxi através da avaliação da cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page, comprovando a viabilidade técnica da utilização desse sistema na produção de frutas desidratadas.

Por fim, verifica-se a viabilidade econômica do equipamento por meio da análise do retorno de investimento do equipamento quando comparados os custos de fabricação, manutenção e operação do sistema e o faturamento alcançado com a comercialização de frutas secas.

4.1 Ensaio experimentais para o coletor solar

Entre os dias 02 e 10 de dezembro de 2019 foram realizados testes de aquecimento dos coletores solares sem carga de abacaxi, verificando a variação de temperatura alcançada entre a temperatura ambiente e a temperatura dos coletores solares.

Os testes seguiram em ordem aleatória, sempre aos pares (devido a limitação da quantidade de coberturas, ficando um equipamento com cobertura de vidro e o outro com cobertura de policarbonato), com exposições durante o período de 04 (quatro) horas, sempre das 10:00 h às 14:00 h e os resultados coletados das 10:30 h (após 30 minutos de estabilização do aquecimento) às 14:00 h (ao final do ensaio), em intervalos regulares de 30 (trinta) minutos.

Na segunda-feira, 02/12/2019, foram realizados os ensaios 01 e 07, cujas especificações, mostradas na Fig. 4.1, são, respectivamente, volume de 200 litros + cobertura de policarbonato + madeira e volume de 200 litros + cobertura de vidro + poliestireno.

Figura 4.1 - Ensaios 01 e 07 (02/12/2019).



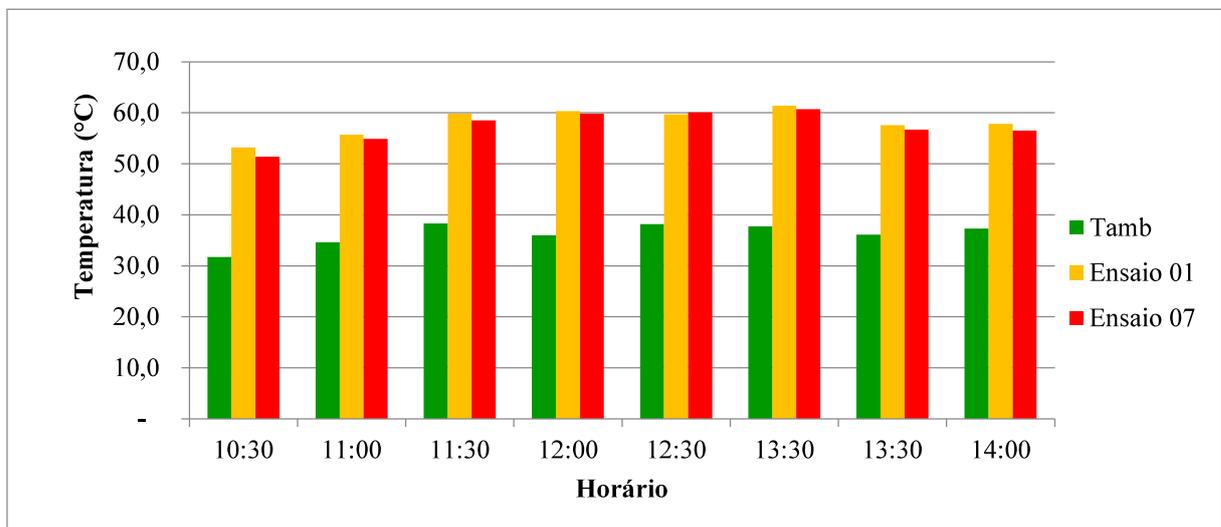
a) Ensaio 01

b) Ensaio 07

Fonte: Próprio autor.

Nestes ensaios foram atingidas as máximas variação de temperatura de 24,3°C no ensaio 01 e 23,8°C no ensaio 07, ambos às 12:00 h. No coletor de 200 litros/madeira/policarbonato obteve-se uma média de variação de temperatura de 22,0°C, enquanto que no de 200 litros/poliestireno/vidro o valor foi de 21,1°C. Esses dados são mostrados no Gráf. 4.1.

Gráfico 4.1 - Variação de temperatura nos ensaios 01 e 07 (02/12/2019).



Fonte: Próprio autor.

Na terça-feira, 03/12/2019, foram realizados os ensaios 02 e 08, cujas especificações, mostradas na Fig. 4.2, são, respectivamente, volume de 100 litros + cobertura de policarbonato + madeira e volume de 100 litros + cobertura de vidro + poliestireno.

Figura 4.2 - Ensaios 02 e 08 (03/12/2019).



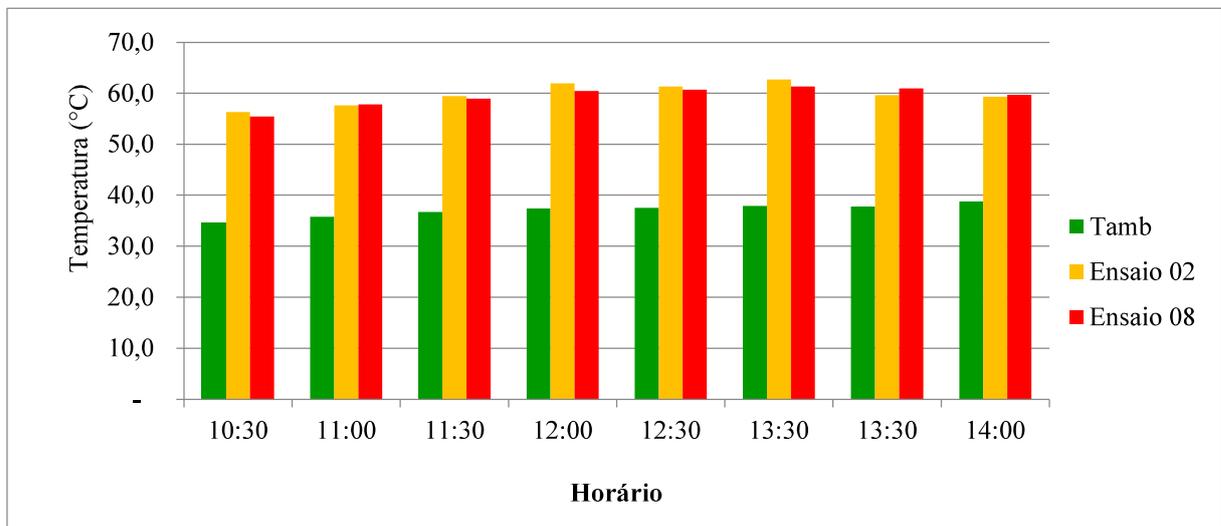
a) Ensaio 02

b) Ensaio 08

Fonte: Próprio autor.

Nestes ensaios atingiu-se a máxima variação de temperatura de $24,8^{\circ}\text{C}$ no ensaio 02 e $23,4^{\circ}\text{C}$ no ensaio 08, ambos às 13:00 h. No coletor de 100 litros/madeira/policarbonato obteve-se uma média de variação de temperatura de $22,7^{\circ}\text{C}$, enquanto que no de 100 litros/poliestireno/vidro foi de $22,3^{\circ}\text{C}$. Esses dados são mostrados no Gráf. 4.2.

Gráfico 4.2 - Variação de temperatura nos ensaios 02 e 08 (03/12/2019).



Fonte: Próprio autor.

Na quarta-feira, 04/12/2019, foram realizados os ensaios 03 e 05, cujas especificações, mostradas na Fig. 4.3, são, respectivamente, volume de 200 litros + cobertura de vidro + madeira e volume de 200 litros + cobertura de policarbonato + poliestireno.

Figura 4.3 - Ensaios 03 e 05 (04/12/2019).



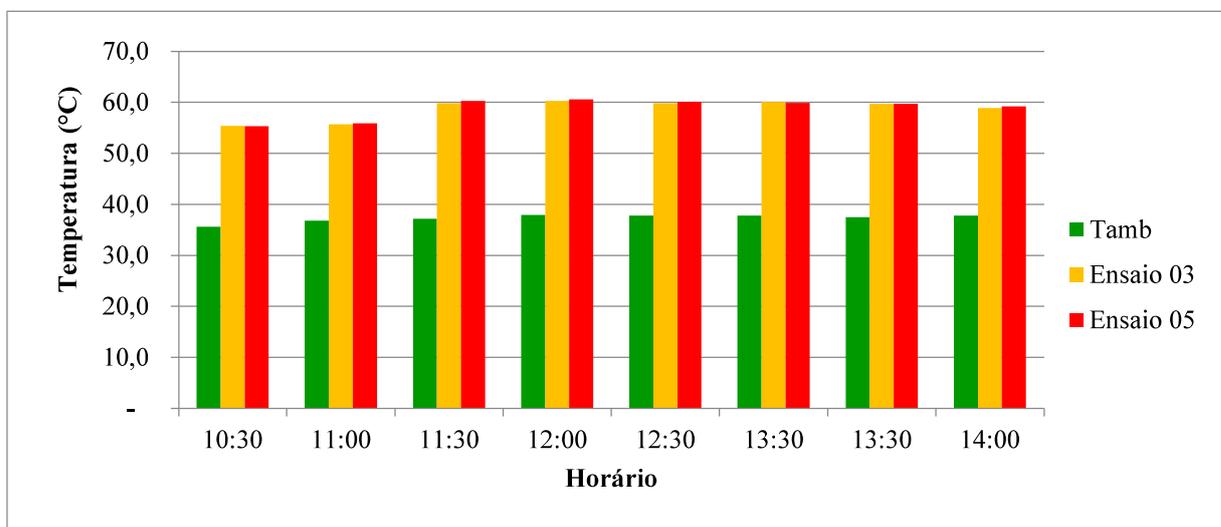
a) Ensaio 03

b) Ensaio 05

Fonte: Próprio autor.

Nestes ensaios atingiu-se a máxima variação de temperatura de 22,6°C no ensaio 03 e 23,1°C no ensaio 05, ambos às 11:30 h. No coletor de 200 litros/madeira/vidro obteve-se uma média de variação de temperatura de 21,4°C, enquanto que no de 200 litros/poliestireno/policarbonato foi de 21,6°C. Esses dados são mostrados no Gráf. 4.3.

Gráfico 4.3 - Variação de temperatura nos ensaios 03 e 05 (04/12/2019).



Fonte: Próprio autor.

Na quinta-feira, 05/12/2019, foram realizados os ensaios 04 e 06, cujas especificações, mostradas na Fig. 4.4, são, respectivamente, volume de 100 litros + cobertura de vidro + madeira e volume de 100 litros + cobertura de policarbonato + poliestireno.

Figura 4.4 - Ensaios 04 e 06 (05/12/2019).



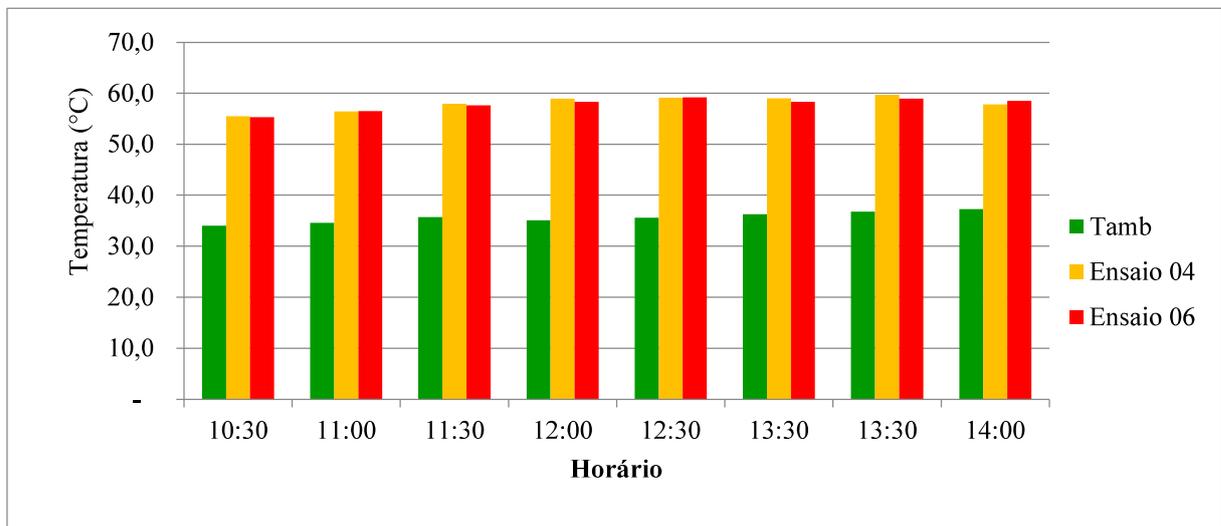
a) Ensaio 04

b) Ensaio 06

Fonte: Próprio autor.

Nestes ensaios atingiu-se a máxima variação de temperatura de 23,8°C no ensaio 04 e 23,6°C no ensaio 06, às 12:00 h no primeiro e às 12:30 h no segundo. No coletor de 100 litros/madeira/vidro obteve-se uma média de variação de temperatura de 22,4°C, enquanto que no de 100 litros/poliestireno/policarbonato foi de 22,2°C. Conforme mostrados no Gráf. 4.3.

Gráfico 4.4 - Variação de temperatura nos ensaios 04 e 06 (05/12/2019).



Fonte: Próprio autor.

Entre os dias 06 e 10/12/2019, seguiram-se os ensaios com a realização das réplicas dos ensaios para os coletores solares e os resultados encontram-se disponíveis no Apêndice A, com os quais se podem extrair as informações que estão inseridas na Tab. 4.1:

Tabela 4.1 – Variações de temperatura e radiação para os ensaios dos coletores solares.

| Ensaio | Datas dos Experimentos | | $\overline{\Delta T}$ [K] | | \overline{Rad} [W/m ²] | |
|--------|------------------------|------------|---------------------------|------|--------------------------------------|--------|
| 1 | 02/12/2019 | 06/12/2019 | 22,0 | 22,1 | 981,21 | 994,71 |
| 2 | 03/12/2019 | 09/12/2019 | 22,7 | 22,8 | 978,17 | 983,15 |
| 3 | 04/12/2019 | 10/12/2019 | 21,4 | 21,3 | 978,22 | 980,37 |
| 4 | 05/12/2019 | 07/12/2019 | 22,4 | 22,3 | 994,18 | 975,56 |
| 5 | 04/12/2019 | 07/12/2019 | 21,6 | 21,7 | 978,22 | 975,56 |
| 6 | 05/12/2019 | 10/12/2019 | 22,2 | 22,3 | 994,18 | 980,37 |
| 7 | 02/12/2019 | 09/12/2019 | 21,1 | 21,0 | 981,21 | 983,15 |
| 8 | 03/12/2019 | 06/12/2019 | 22,3 | 22,2 | 978,17 | 994,71 |

Fonte: Próprio autor.

Na Tab. 4.2 estão apresentados os dados referentes às propriedades do ar de secagem para os coletores solares sem sistema de exaustão auxiliar.

Tabela 4.2 - Propriedades do ar de secagem.

| Parâmetro | Valor | Unidade |
|------------------|--------|-------------------|
| Velocidade | 0,2000 | m/s |
| Massa Específica | 1,2754 | kg/m ³ |
| Calor Específico | 1,0048 | kJ/kg.K |

Fonte: Adaptado de Mohan et al. (2018).

Desta forma, têm-se, através da aplicação das Eq. 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7, os valores referentes ao rendimento térmico obtido pelos coletores solares em cada experimento, possibilitando,

portanto, o preenchimento da matriz do planejamento experimental para o coletor solar, Tab. 4.3.

Tabela 4.3 - Resultado da matriz do DOE para o coletor solar.

| Ensaio | Variáveis | | | Respostas | |
|--------|-----------------|----------------------------|---------------------|------------------|-------|
| | Volume | Superfície Transparente | Isolante Térmico | $\eta_{t_{col}}$ | |
| 1 | +1 [200 litros] | +1 [Policarbonato] | +1 [Madeira] | 21,55 | 21,35 |
| 2 | -1 [100 litros] | +1 [Policarbonato] | +1 [Madeira] | 22,30 | 22,29 |
| 3 | +1 [200 litros] | -1 [Vidro] | +1 [Madeira] | 21,03 | 20,88 |
| 4 | -1 [100 litros] | -1 [Vidro] | +1 [Madeira] | 21,66 | 21,97 |
| 5 | +1 [200 litros] | +1 [Policarbonato] | -1 [Poliestireno] | 21,22 | 21,38 |
| 6 | -1 [100 litros] | +1 [Policarbonato] | -1 [Poliestireno] | 21,46 | 21,86 |
| 7 | +1 [200 litros] | -1 [Vidro] | -1 [Poliestireno] | 20,67 | 20,53 |
| 8 | -1 [100 litros] | -1 [Vidro] | -1 [Poliestireno] | 21,91 | 21,45 |

Fonte: Próprio autor.

Esses resultados foram submetidos ao tratamento *experimental design* com a utilização do *software Statistic 7.0*, permitindo, assim, extrair as informações estatísticas necessárias à interpretação do dimensionamento deste componente, os quais passam a ser apresentados a partir da análise de variância (Tabela ANOVA), da verificação da significância estatística pelo Diagrama de Pareto, bem como das superfícies de respostas a partir das observações por base nos níveis de cada fator.

Pela Tabela ANOVA, cujos dados estão apresentados na Tab. 4.4, verifica-se que os 03 (três) fatores analisados no planejamento experimental para os coletores solares - volume , superfície transparente e material - apresentaram significância estatística, admitindo, desta forma, para os experimentos realizados, a determinação do melhor coletor solar através da análise da combinação desses fatores.

Tabela 4.4-Tabela ANOVA - DOE para o coletor solar.

| Fonte de Variação | Soma de Quadrados | Graus de Liberdade | Quadrado Médio | Estatística F |
|---|-------------------|--------------------|----------------|---------------|
| Volume [1] | 2,472756 | 1 | 2,472756 | 54,01570 |
| Sup. Transp. [2] | 0,684756 | 1 | 0,684756 | 14,95804 |
| Material [3] | 0,406406 | 1 | 0,406406 | 8,87767 |
| [1] x [2] | 0,135056 | 1 | 0,135056 | 2,95021 |
| [1] x [3] | 0,017556 | 1 | 0,017556 | 0,38350 |
| [2] x [3] | 0,021756 | 1 | 0,021756 | 0,47525 |
| Resíduos | 0,412006 | 9 | 0,045778 | --- |
| Total | 4,150294 | 15 | --- | --- |
| R ² (Coeficiente de Correlação ou % de Variação Explicada) | | | 90,07% | |

Fonte: Próprio autor.

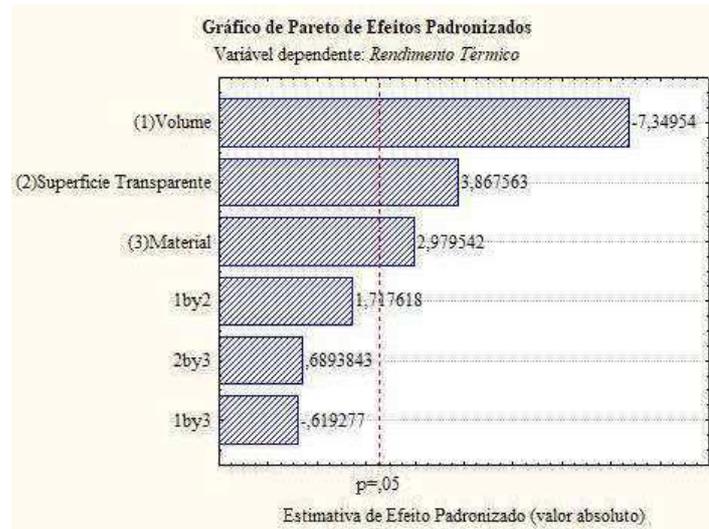
Dos fatores analisados, os que apresentaram maior significância estatística foram o volume e a superfície transparente, e, por fim, o material isolante, o que demonstra que os materiais utilizados em cada um dos níveis codificados desempenharam satisfatoriamente as funções a que se destinaram.

Pela Tabela ANOVA ainda se pode analisar que as interações entre os fatores não apresentaram significância estatística, o que não inviabilizada a determinação do modelo otimizado, visto que todas as variáveis independentes foram significativas.

Essa interpretação é comprovada quando analisado o Diagrama de Pareto para os efeitos das variáveis analisadas, apresentado no Gráf. 4.5, no qual se observa que para o Grau de Liberdade (GL) 15, a uma probabilidade de 5%, têm-se que o valor de t-Student² ($t_{0,05;15} = 2,1314$), restando como significativas as variáveis analisadas em cada um dos 03 (três) fatores (volume, superfície transparente e material) e não significativos as interações entre eles.

² Distribuição de t-Student segundo os graus de liberdade e uma dada probabilidade num teste bicaudal (Rodrigues & Iemma, 2014).

Gráfico 4.5 - Gráfico de Pareto de efeitos padronizados para o coletor solar.

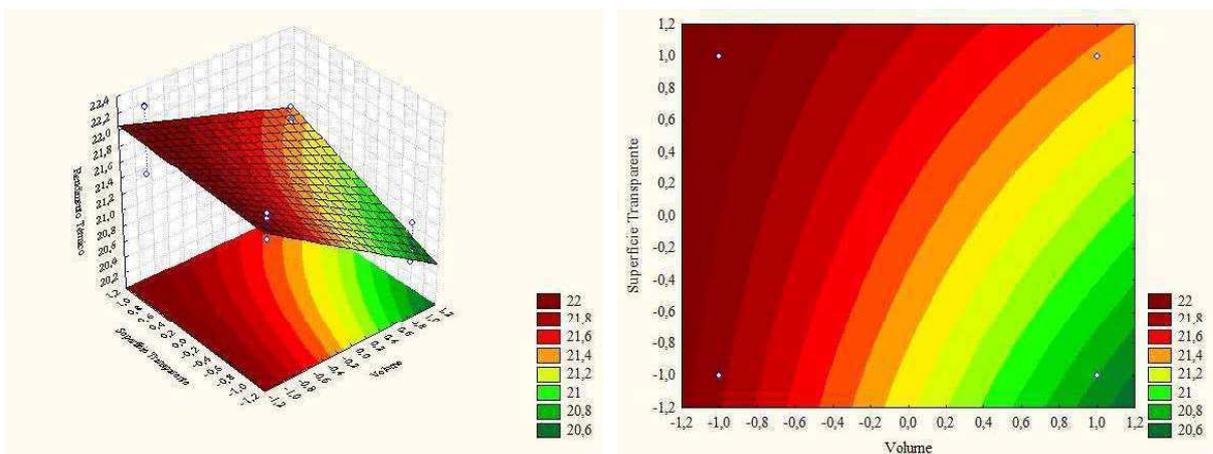


Fonte: Próprio autor.

Nos Gráf. 4.6, 4.7 e 4.8 são exibidas as superfícies de respostas que demonstram o comportamento do coletor solar em relação ao rendimento térmico quando combinadas, respectivamente, as variáveis volume com superfície transparente, volume com material isolante e superfície transparente com material isolante.

Como se pode observar no Gráf. 4.6, o rendimento térmico é mais elevado na especificação de volume codificada por [-1], ou seja, 100 (cem) litros e apresenta tendência de crescimento quando combinado com a superfície transparente codificada por [+1], policarbonato alveolar.

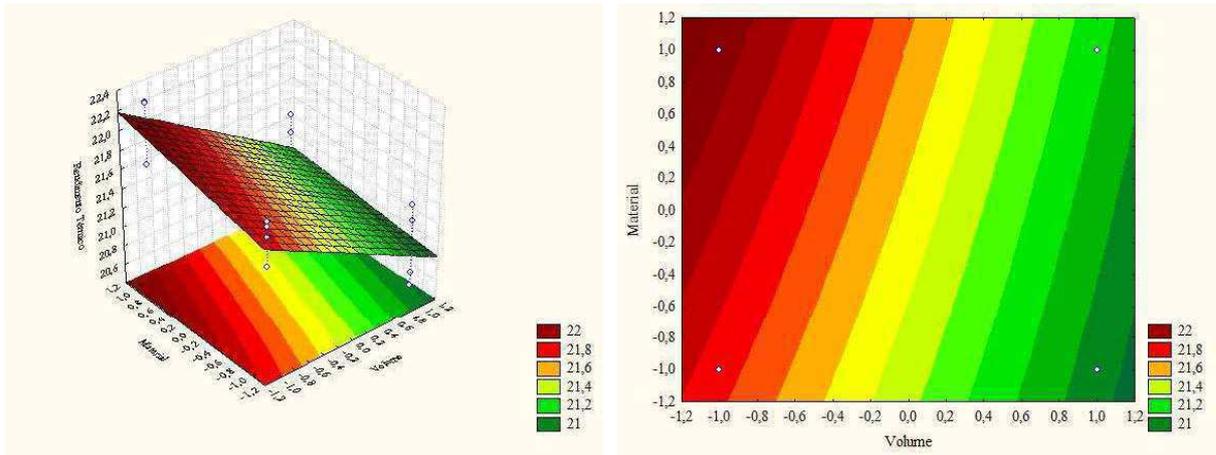
Gráfico 4.6 - Superfícies de resposta [volume x superfície transparente].



Fonte: Próprio autor.

De maneira análoga, no Gráf. 4.7, observa-se que o rendimento térmico continua mais elevado na especificação de volume codificada por [-1], ou seja, 100 (cem) litros e apresenta tendência de crescimento quando combinado com o material isolante codificado por [+1], madeira maciça de Pinus.

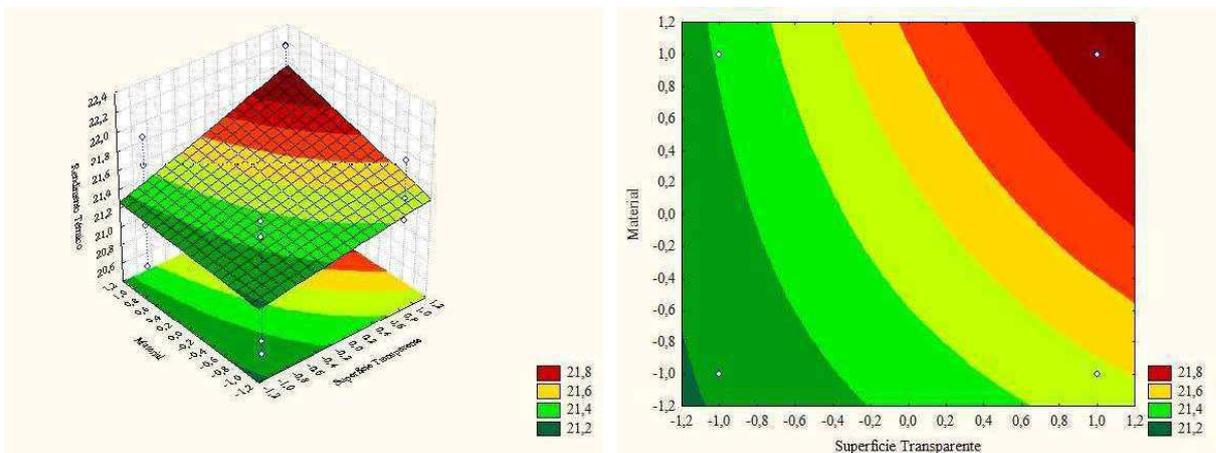
Gráfico 4.7 - Superfícies de resposta [volume x material isolante].



Fonte: Próprio autor.

Já no Gráf. 4.8, observa-se que o rendimento térmico apresenta ligeiro crescimento na especificação de superfície transparente codificada por [+1], ou seja, policarbonato alveolar e apresenta valor mais elevado quando combinado com o material isolante codificado por [+1], madeira maciça de Pinus.

Gráfico 4.8 - Superfícies de resposta [superfície transparente x material isolante].



Fonte: Próprio autor.

Logo, o coletor solar otimizado sugerido pela análise do planejamento experimental fatorial foi a de codificação dos fatores como sendo volume [-1], superfície transparente [+1] e material isolante [+1], ou seja, do coletor 02, resultando numa montagem de um coletor de 100 litros, fabricado em madeira maciça de Pinus com cobertura transparente de policarbonato alveolar.

Figura 4.5 - Coletor solar otimizado



Fonte: Próprio autor.

4.2 Ensaios experimentais para a câmara de secagem

Como na análise do planejamento experimental para o coletor solar já houve a determinação do protótipo otimizado que engloba melhor material isolante e superfície transparente, a confecção das câmaras de secagem seguiram a manutenção da padronização das características construtivas.

Entre os dias 19 de outubro e 10 de novembro de 2020 foram realizados os testes de aquecimento com as câmaras de secagem acopladas ao coletor solar, verificando as temperaturas alcançadas no interior do sistema e o rendimento térmico em cada arranjo afim de obter as influências de cada variável no rendimento do sistema.

Na segunda-feira, 19/10/2020, realizou-se o ensaio 10, cujas especificações, mostradas na Fig. 4.6, apresenta câmara de secagem com 50 (cinquenta) litros, do tipo indireta, ou seja, sem captação de energia solar na câmara de secagem, e com sistema de ventilação forçada.

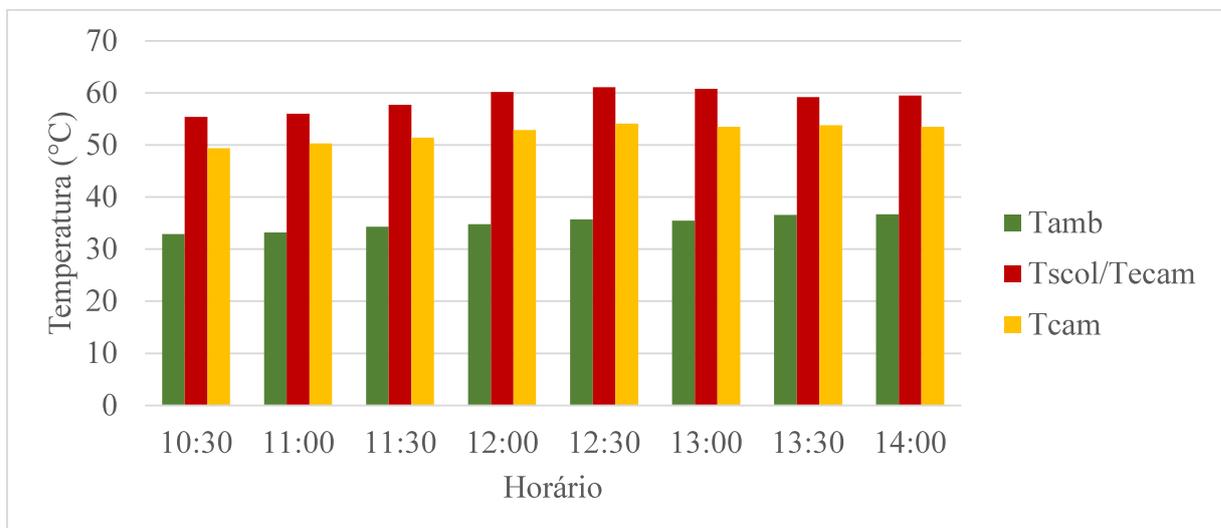
Figura 4.6 - Ensaio 10 (19/10/2020).



Fonte: Próprio autor.

No Gráf. 4.9, pode-se observar os valores obtidos para as temperaturas do ar durante a realização do ensaio 10. Verifica-se que na junção do coletor solar com a câmara de secagem a temperatura média fica em $58,7^{\circ}\text{C}$ e que a câmara de secagem apresenta níveis de temperatura de $52,4 \pm 3^{\circ}\text{C}$, com mínima de $49,4^{\circ}\text{C}$ às 10:30 h e máxima de $54,1^{\circ}\text{C}$ às 12:30 h.

Gráfico 4.9 - Variação de temperatura no ensaio 10 (19/10/2020).



Fonte: Próprio autor.

Na terça-feira, 20/10/2020, realizou-se o ensaio 13, cujas especificações, mostradas na Fig. 4.7, apresenta câmara de secagem com 100 (cem) litros, do tipo indireta, ou seja, sem captação de energia solar na câmara de secagem, e com ventilação natural.

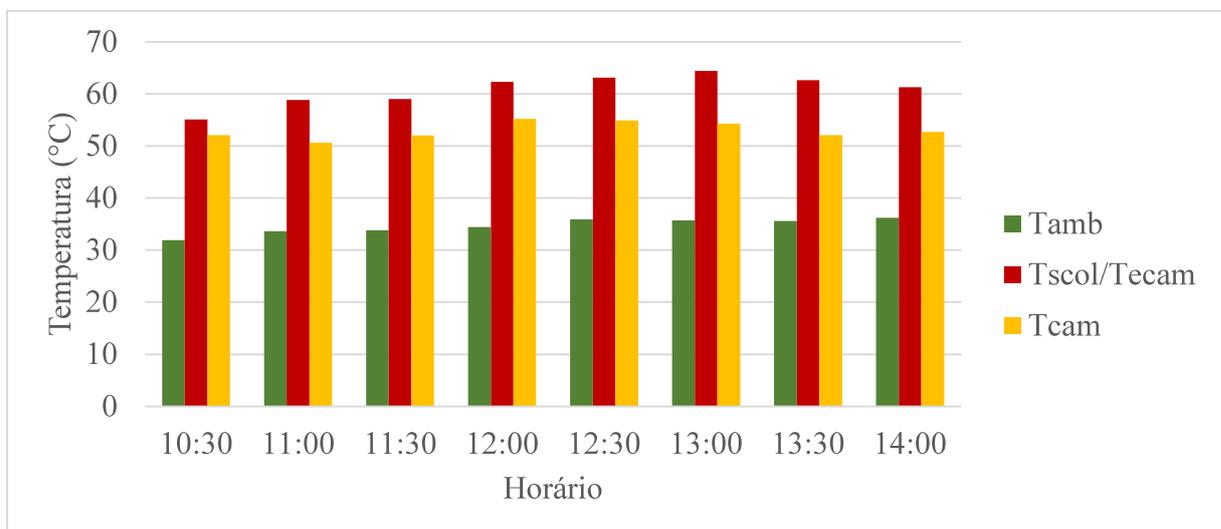
Figura 4.7 - Ensaio 13 (20/10/2020).



Fonte: Próprio autor.

No Gráf. 4.10, pode-se observar os valores obtidos para as temperaturas do ar durante a realização do ensaio 13. Verifica-se que na junção do coletor solar com a câmara de secagem a temperatura média fica em $60,8^{\circ}\text{C}$ e que a câmara de secagem apresenta níveis de temperatura de $53,0 \pm 3^{\circ}\text{C}$.

Gráfico 4.10 - Variação de temperatura no ensaio 13 (20/10/2020).



Fonte: Próprio autor.

Na quarta-feira, 21/10/2020, realizou-se o ensaio 14, cujas especificações, mostradas na Fig. 4., apresenta câmara de secagem com 50 (cinquenta) litros, do tipo indireta, ou seja, sem captação de energia solar na câmara de secagem, e com ventilação natural.

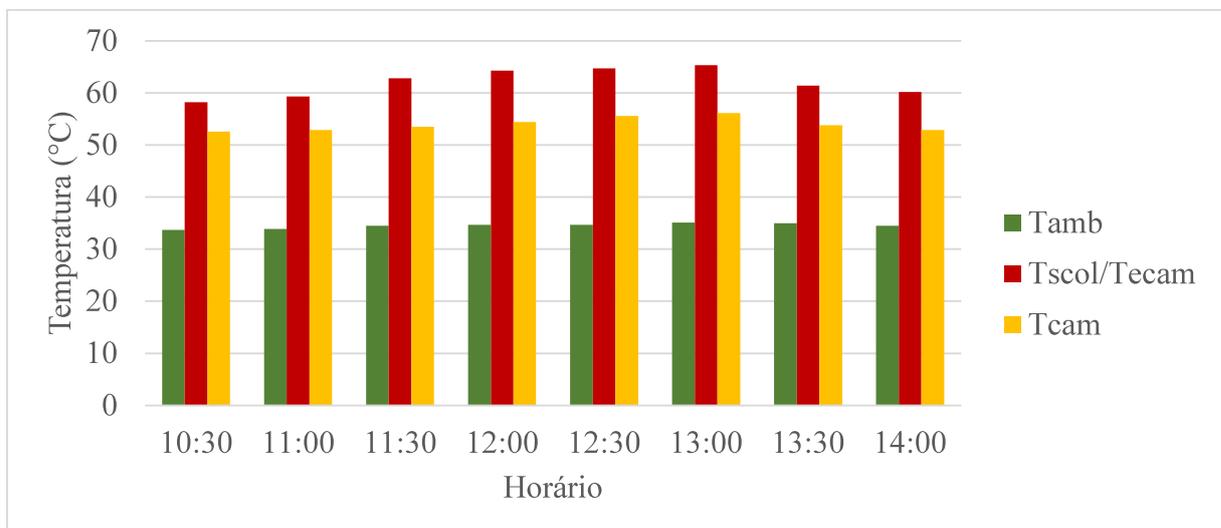
Figura 4.8 - Ensaio 14 (21/10/2020).



Fonte: Próprio autor.

No Gráf. 4.11, pode-se observar os valores obtidos para as temperaturas do ar durante a realização do ensaio 14. Verifica-se que na junção do coletor solar com a câmara de secagem a temperatura média fica em $62,0^{\circ}\text{C}$, e que a câmara de secagem apresenta níveis de temperatura de $54,0 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Gráfico 4.11 - Variação de temperatura no ensaio 14 (21/10/2020).



Fonte: Próprio autor.

Na quinta-feira, 22/10/2020, realizou-se o ensaio 11, cujas especificações, mostradas na Fig. 4.9, apresenta câmara de secagem com 100 (cem) litros, do tipo mista, ou seja, com captação de energia solar também na câmara de secagem, e com sistema de ventilação forçada.

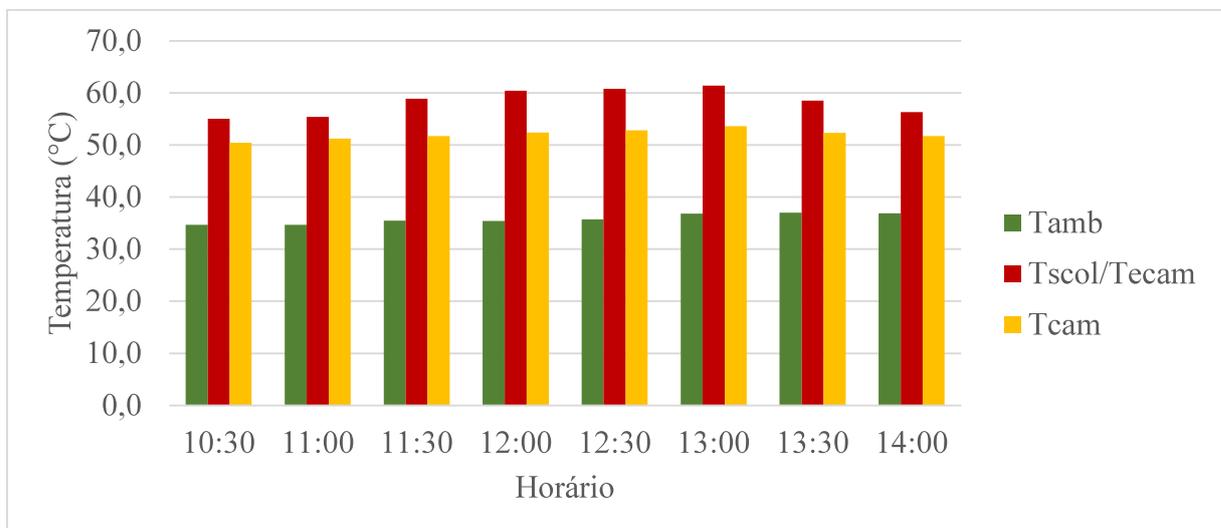
Figura 4.9 - Ensaio 11 (22/10/2020).



Fonte: Próprio autor.

No Gráf. 4.12, pode-se observar os valores obtidos para as temperaturas do ar durante a realização do ensaio 11. Verifica-se que na junção do coletor solar com a câmara de secagem a temperatura média fica em $58,3^{\circ}\text{C}$, e que a câmara de secagem apresenta níveis de temperatura de $52,0 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Gráfico 4.12 - Variação de temperatura no ensaio 11 (22/10/2020).



Fonte: Próprio autor.

Na sexta-feira, 23/10/2020, realizou-se o ensaio 15, cujas especificações, mostradas na Fig. 4.10, apresentam câmara de secagem com 100 (cem) litros, do tipo mista, ou seja, com captação de energia solar também na câmara de secagem, e com ventilação natural.

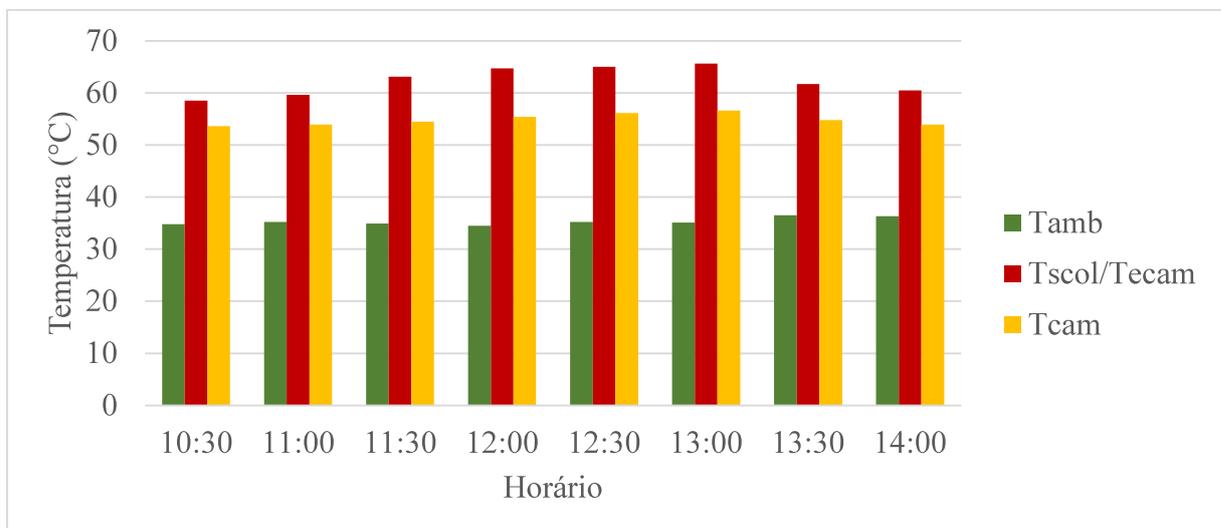
Figura 4.10 - Ensaio 15 (23/10/2020).



Fonte: Próprio autor.

No Gráf. 4.13, pode-se observar os valores obtidos para as temperaturas do ar durante a realização do ensaio 15. Verifica-se que na junção do coletor solar com a câmara de secagem a temperatura média fica em $62,3^{\circ}\text{C}$, e que a câmara de secagem apresenta níveis de temperatura de $54,9 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Gráfico 4.13 - Variação de temperatura no ensaio 15 (23/10/2020).



Fonte: Próprio autor.

No sábado, 24/10/2020, realizou-se o ensaio 16, cujas especificações, mostradas na Fig. 4.11, apresenta câmara de secagem com 50 (cinquenta) litros, do tipo mista, ou seja, com captação de energia solar também na câmara de secagem, e com ventilação natural.

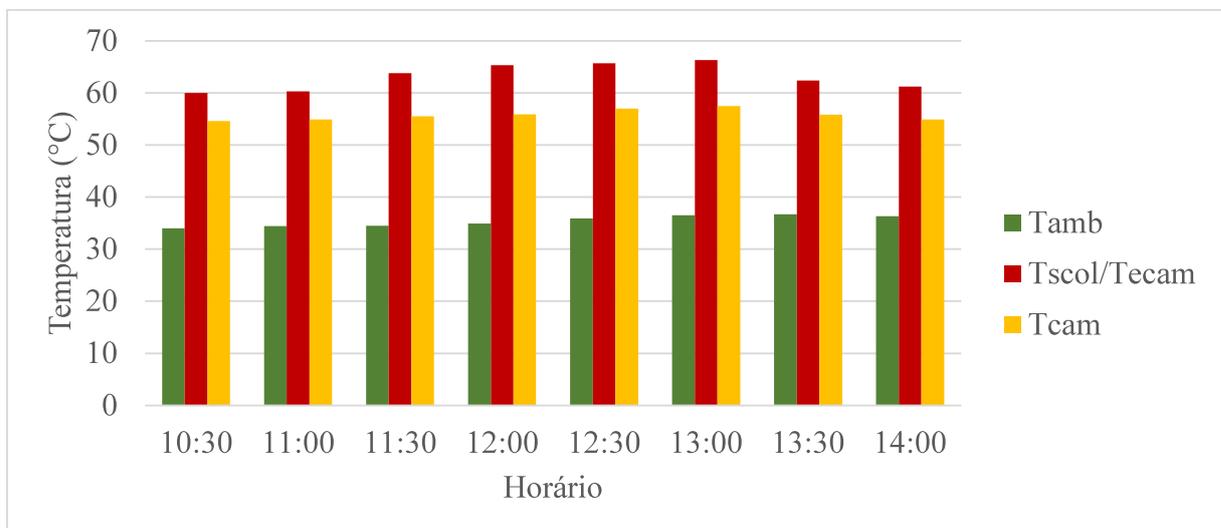
Figura 4.11 - Ensaio 16 (24/10/2020).



Fonte: Próprio autor.

No Gráf. 4.14, pode-se observar os valores obtidos para as temperaturas do ar durante a realização do ensaio 16. Verifica-se que na junção do coletor solar com a câmara de secagem a temperatura média fica em $63,1^{\circ}\text{C}$, e que a câmara de secagem apresenta níveis de temperatura de $55,8\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Gráfico 4.14 - Variação de temperatura no ensaio 16 (24/10/2020).



Fonte: Próprio autor.

No domingo, 25/10/2020, realizou-se o ensaio 09, cujas especificações, mostradas na Fig. 4.12, apresenta câmara de secagem 100 (cem) litros, do tipo indireta, ou seja, sem captação de energia solar na câmara de secagem, e com sistema de ventilação forçada.

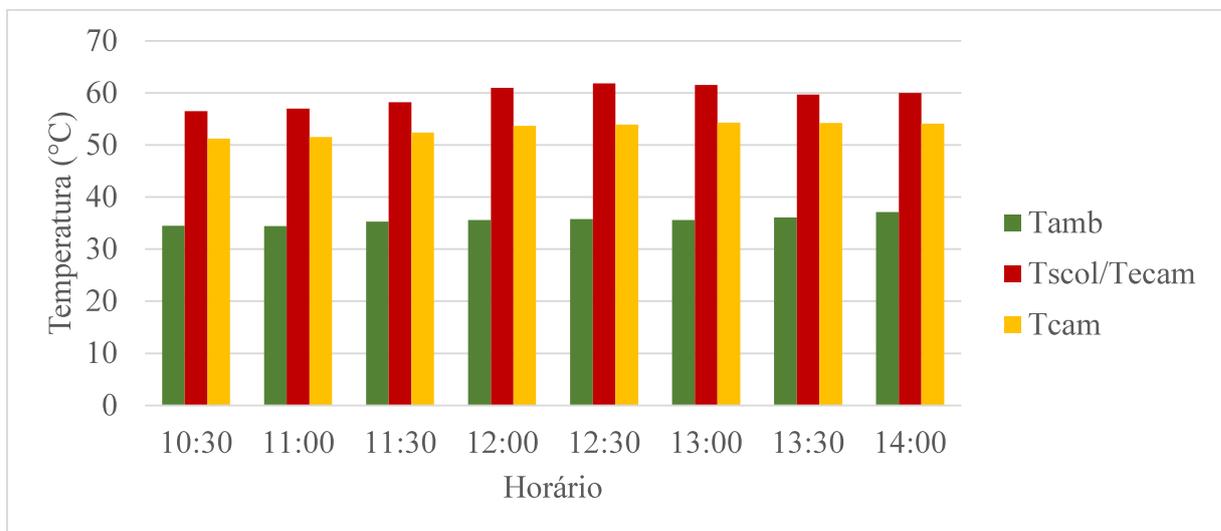
Figura 4.12 - Ensaio 09 (25/10/2020).



Fonte: Próprio autor.

No Gráf. 4.15, pode-se observar os valores obtidos para as temperaturas do ar durante a realização do ensaio 09. Verifica-se que na junção do coletor solar com a câmara de secagem a temperatura média fica em $59,5^{\circ}\text{C}$, e que a câmara de secagem apresenta níveis de temperatura de $53,2\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Gráfico 4.15 - Variação de temperatura no ensaio 09 (25/10/2020).



Fonte: Próprio autor.

Na segunda-feira, 26/10/2020, realizou-se o ensaio 12, cujas especificações, mostradas na Fig. 4.13, apresenta câmara de secagem de 50 (cinquenta) litros, do tipo misto, ou seja, com captação de energia solar também na câmara de secagem, e com sistema de ventilação forçada.

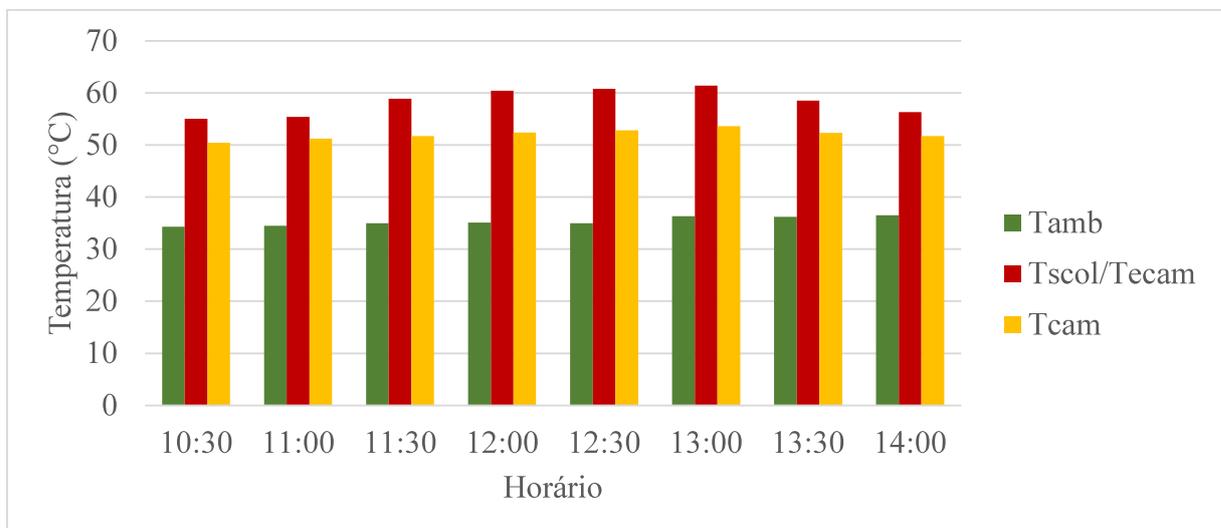
Figura 4.13 - Ensaio 12 (26/10/2020).



Fonte: Próprio autor.

No Gráf. 4.16, pode-se observar os valores obtidos para as temperaturas do ar durante a realização do ensaio 12. Verifica-se que na junção do coletor solar com a câmara de secagem a temperatura média fica em $58,3^{\circ}\text{C}$, e que a câmara de secagem apresenta níveis de temperatura de $52,0 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Gráfico 4.16 - Variação de temperatura no ensaio 12 (26/10/2020).



Fonte: Próprio autor.

Entre os dias 03 e 10/11/2020, seguiram-se os experimentos com a realização das réplicas dos ensaios para as câmaras de secagem e os resultados encontram-se disponíveis no Apêndice B, com os quais se pode extrair as informações que estão inseridas na Tab. 4.5:

Tabela 4.5 - Variações de temperatura e radiação para os ensaios das câmaras.

| Ensaio | Datas dos Experimentos | | \overline{Rad} [W/m ²] | | $\overline{\Delta T_{col}}$ [K] | | $\overline{\Delta T_{cam}}$ [K] | |
|--------|------------------------|------------|--------------------------------------|-------|---------------------------------|------|---------------------------------|------|
| 09 | 25/10/2020 | 10/11/2020 | 938,4 | 927,0 | 23,9 | 24,3 | -6,3 | -6,2 |
| 10 | 19/10/2020 | 09/11/2020 | 955,5 | 918,0 | 23,8 | 22,9 | -6,4 | -6,0 |
| 11 | 22/10/2020 | 03/11/2020 | 848,3 | 980,8 | 22,5 | 22,8 | -6,3 | -6,1 |
| 12 | 26/10/2020 | 07/11/2020 | 957,4 | 989,4 | 23,0 | 22,5 | -6,3 | -6,0 |
| 13 | 20/10/2020 | 06/11/2020 | 962,3 | 916,0 | 26,2 | 28,2 | -7,8 | -8,0 |
| 14 | 21/10/2020 | 05/11/2020 | 904,0 | 925,5 | 27,5 | 28,4 | -8,1 | -8,2 |
| 15 | 23/10/2020 | 08/11/2020 | 908,0 | 970,2 | 27,0 | 28,6 | -7,5 | -7,4 |
| 16 | 24/10/2020 | 04/11/2020 | 948,5 | 909,7 | 27,7 | 27,1 | -7,4 | -7,3 |

Fonte: Próprio autor.

Na Tab. 4.6 estão expostos os dados referentes às propriedades do ar de secagem para a saída da câmara de secagem onde em alguns experimentos o sistema de exaustão auxiliar era desligado e em outros era acionado.

Tabela 4.6 - Propriedades do ar de secagem com sistema de exaustão.

| Parâmetro | Valor | Unidade |
|-------------------------------|--------|-------------------|
| Velocidade ventilação natural | 0,20 | m/s |
| Velocidade ventilação forçada | 0,30 | m/s |
| Massa Específica | 1,2754 | kg/m ³ |
| Calor Específico | 1,0048 | kJ/kg.K |

Fonte: Próprio autor.

Desta forma, têm-se, através da aplicação das Eq. 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7, os valores referentes ao rendimento térmico obtido pelas câmaras de secagem em cada experimento, possibilitando, portanto, o preenchimento da matriz do planejamento experimental para a câmara de secagem, Tab. 4.7.

Tabela 4.7 - Resultado da matriz do DOE para a câmara de secagem.

| Ensaio | Variáveis | | | Respostas | |
|--------|-----------------|---------------|--------------|---------------|-------|
| | Volume | Tipo | Ventilação | η_{tcam} | |
| 09 | +1 [100 litros] | +1 [indireto] | +1 [forçada] | 73,64 | 74,49 |
| 10 | -1 [50 litros] | +1 [indireto] | +1 [forçada] | 73,11 | 73,80 |
| 11 | +1 [100 litros] | -1 [misto] | +1 [forçada] | 54,55 | 55,49 |
| 12 | -1 [50 litros] | -1 [misto] | +1 [forçada] | 61,53 | 62,15 |
| 13 | +1 [100 litros] | +1 [indireto] | -1 [natural] | 70,23 | 71,63 |
| 14 | -1 [50 litros] | +1 [indireto] | -1 [natural] | 70,55 | 71,13 |
| 15 | +1 [100 litros] | -1 [misto] | -1 [natural] | 54,71 | 56,16 |
| 16 | -1 [50 litros] | -1 [misto] | -1 [natural] | 62,11 | 61,92 |

Fonte: Próprio autor.

Esses resultados foram submetidos ao tratamento *experimental design* com a utilização do *software Statistic 7.0*, permitindo, assim, extrair as informações estatísticas necessárias à interpretação do dimensionamento deste componente, os quais passam a ser apresentados a partir da análise de variância (Tabela ANOVA), da verificação da significância estatística pelo Diagrama de Pareto, bem como das superfícies de respostas a partir das observações por base nos níveis de cada fator.

Pela Tabela ANOVA, cujos dados estão apresentados na Tab. 4.8, verifica-se que os 03 (três) fatores analisados no planejamento experimental para a câmara de secagem – volume, tipo de secador e tipo de ventilação - apresentaram significância estatística, admitindo, desta forma, para os experimentos realizados, a determinação da melhor câmara de secagem através da análise da combinação desses fatores.

Tabela 4.8-Tabela ANOVA - DOE para a câmara de secagem.

| Fonte de Variação | Soma de Quadrados | Graus de Liberdade | Quadrado Médio | Estatística F |
|---|-------------------|--------------------|----------------|---------------|
| Volume [1] | 40,3225 | 1 | 40,3225 | 100,941 |
| Tipo [2] | 755,7001 | 1 | 755,7001 | 1891,773 |
| Ventilação [3] | 6,6564 | 1 | 6,6564 | 16,663 |
| [1] x [2] | 49,7025 | 1 | 49,7025 | 124,422 |
| [1] x [3] | 0,0196 | 1 | 0,0196 | 0,049 |
| [2] x [3] | 10,0489 | 1 | 10,0489 | 25,156 |
| Resíduos | 3,5952 | 9 | 0,3995 | --- |
| Total | 866,0452 | 15 | --- | --- |
| R ² (Coeficiente de Correlação ou % de Variação Explicada) | | | 99,59% | |

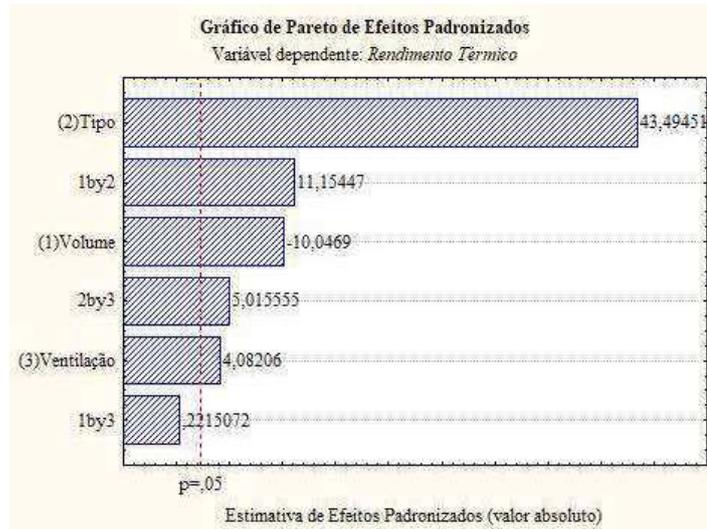
Fonte: Próprio autor.

Dos fatores analisados, o que apresentou maior significância estatística foi o tipo de secador, seguido do volume e, por fim, do tipo de ventilação, sendo que a interação entre os dois primeiros ainda se apresentou mais significativo que os dois últimos fatores.

Pela Tabela ANOVA ainda se pode analisar que a interação entre o volume e o tipo de ventilação não apresentou significância estatística, demonstrando o quão significativo se apresentou o fator tipo de secador, quando todas as suas interações se demonstraram significativas.

Essa interpretação é comprovada quando analisado o Diagrama de Pareto para os efeitos das variáveis analisadas, apresentado no Gráf. 4.17, no qual se observa que para o Grau de Liberdade (GL) 15, a uma probabilidade de 5%, têm-se o valor de t-Student ($t_{0,05;15} = 2,1314$), restando como não significativos apenas a interação do fator 3 (tipo de ventilação) com o fator 1 (volume).

Gráfico 4.17 - Gráfico de Pareto de efeitos padronizados para a câmara de secagem.

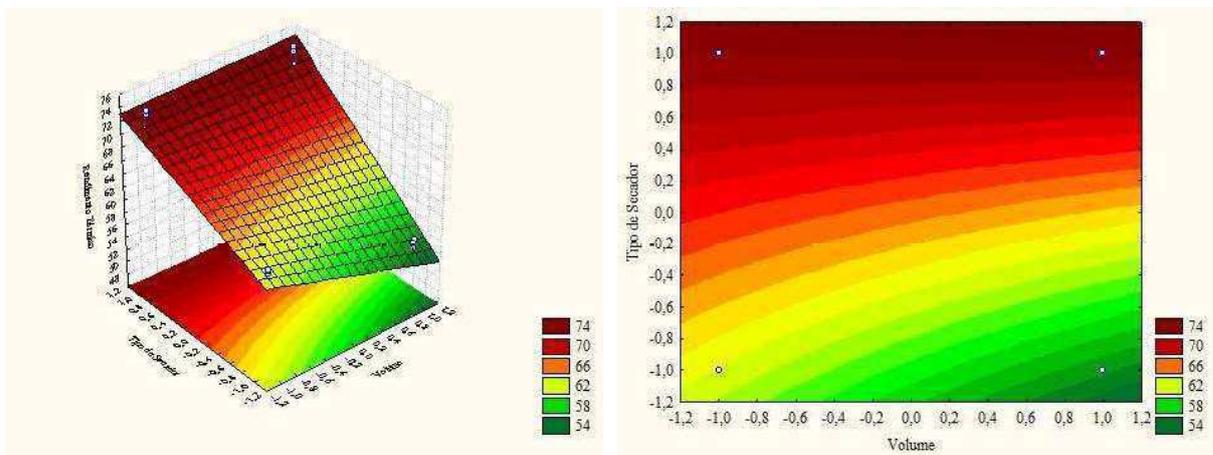


Fonte: Próprio autor.

Nos Gráf. 4.18, 4.19 e 4.20 são exibidas as superfícies de respostas que demonstram o comportamento do rendimento térmico em relação à câmara de secagem quando combinadas, respectivamente, as variáveis volume com tipo de secador, volume com tipo de ventilação e tipo de secador com tipo de ventilação.

Como se pode observar no Gráf. 4.18, o rendimento térmico é mais elevado na especificação de volume codificada por [-1], ou seja, 50 (cinquenta) litros e apresenta tendência de crescimento quando combinado com o tipo de secador codificado por [+1], indireto.

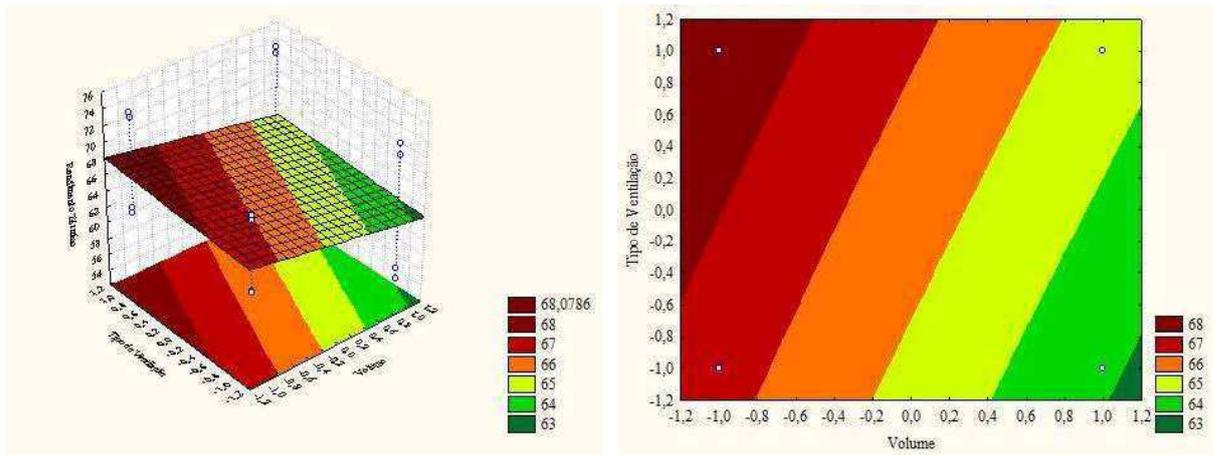
Gráfico 4.18 - Superfícies de resposta [volume x tipo de secador].



Fonte: Próprio autor.

De maneira análoga, no Gráf. 4.19, observa-se que o rendimento térmico continua mais elevado na especificação de volume codificada por [-1], ou seja, 50 (cinquenta) litros e apresenta tendência de crescimento quando combinado com tipo de ventilação codificado por [+1], ventilação forçada.

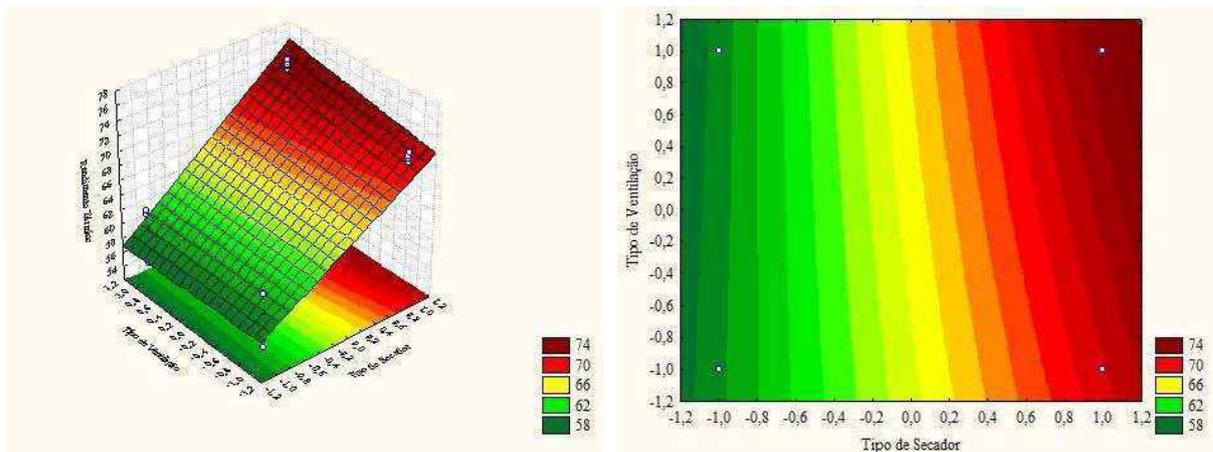
Gráfico 4.19 - Superfícies de resposta [volume x tipo de ventilação].



Fonte: Próprio autor.

Já na Gráf. 4.20, observa-se que o rendimento térmico continua mais elevado na especificação do tipo de secador codificada por [+1], ou seja, indireto e apresenta tendência de crescimento quando combinado com a utilização do tipo de ventilação codificado por [+1], ventilação forçada.

Gráfico 4.20 - Superfícies de resposta [tipo de secador x ventilação].



Fonte: Próprio autor.

Portanto, a câmara de secagem otimizada sugerida pela análise do planejamento experimental fatorial foi a da câmara de secagem 02, cuja codificação dos fatores é: volume [-1], tipo de secador [+1] e tipo de ventilação [+1], resultando numa montagem de uma câmara de secagem de 50 litros, fabricada em madeira maciça de Pinus, do tipo indireta e com ventilação forçada através de *coolers* eletrônicos.

Figura 4.14 - Câmara de secagem otimizada.



Fonte: Próprio autor.

Logo, o dimensionamento e otimização do secador solar através do planejamento experimental fatorial, resulta no coletor solar de 100 litros e câmara de secagem de 50 litros, fabricado em material isolante de madeira maciça de Pinus, superfície transparente de policarbonato alveolar, do tipo indireto e com ventilação forçada através do sistema de exaustão auxiliar de *coolers* acionados por um mini painel fotovoltaico de 10W e 12V.

Figura 4.15 - Secador solar otimizado.



Fonte: Próprio autor.

4.3 Secagem de abacaxi com o secador solar otimizado

Após a determinação do dimensionamento otimizado do sistema de secagem solar, submeteu-se a utilização do secador solar no processo de secagem de abacaxi, a fim de demonstrar a viabilidade técnica do equipamento escolhido e sua funcionalidade operacional, bem como, analisar a cinética de secagem do abacaxi.

Para realização dos experimentos, o abacaxi passou pelas etapas de lavagem, descascamento e corte em rodela, com a retirada do núcleo central, conhecido comercialmente como talo, antes de serem posicionados na bandeja do equipamento.

Os testes foram realizados em 02 (dois) dias, sempre das 08:00 h às 16:00 h, onde entre esses dias o abacaxi era armazenado em sacos de fechamento hermético, etiquetados com as informações do experimento.

Durante os experimentos foram realizadas as medições das seguintes propriedades:

- Temperatura do ar ambiente [T_{amb} (°C)];
- Temperatura do ar no interior do coletor solar [T_{icol} (°C)];
- Temperatura do ar na junção coletor solar / câmara de secagem [$T_{scol/ecam}$ (°C)];
- Temperatura do ar no interior da câmara de secagem [T_{icam} (°C)];
- Temperatura do ar na saída da câmara de secagem [T_{scam} (°C)];
- Massa do abacaxi em processo de secagem [m (g)];
- Velocidade do ar [v_{ar} (m/s)].

Foram efetivados 04 (quatro) experimentos, realizados nos dias 06 a 07 de dezembro de 2020 (EXP1), 11 a 12 de dezembro de 2020 (EXP2), 15 a 16 de dezembro de 2020 (EXP3) e 21 a 22 de dezembro de 2020 (EXP4), os quais seguiram os mesmos procedimentos. Por esse motivo, serão apresentados os dados e cálculos envolvendo o EXP1 na seção 4.3.1 e na 4.3.2 têm-se os resumos dos principais parâmetros de todos os experimentos, estando, portanto, os dados dos demais experimentos disponíveis no Apêndice C.

4.3.1 Experimento realizado em 06 a 07 de dezembro de 2020 - (EXP1)

Na Fig. 4.16 têm-se o abacaxi *in natura* pronto para iniciar o procedimento de secagem e a medição inicial da massa de abacaxi submetida ao processo, iniciado às 08:00 h, do primeiro dia de experimento, e finalizado às 16:00 h do segundo dia.

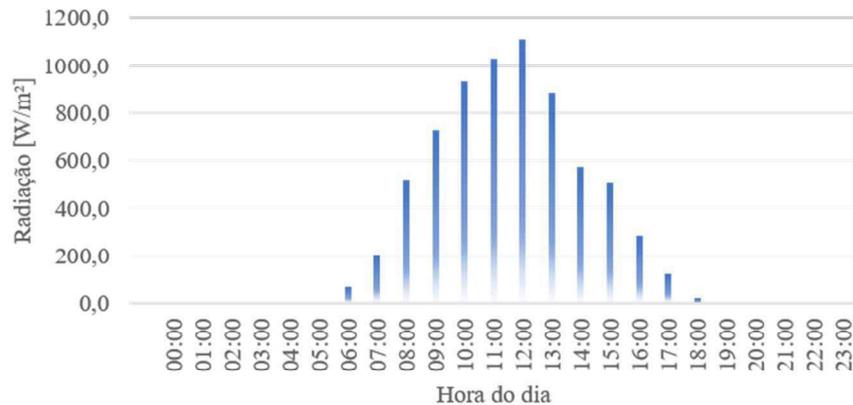
Figura 4.16 - Medição da massa de abacaxi *in natura* no início da secagem.



Fonte: Próprio autor.

O Gráf. 4.21 mostra a média horária da intensidade de radiação solar para o dia 06 de dezembro de 2020, onde se pode observar que a média dessas intensidades é baixa nas primeiras e últimas horas do dia, o que justifica a realização dos testes após o pleno nascer do sol e a interrupção antes do pôr do sol.

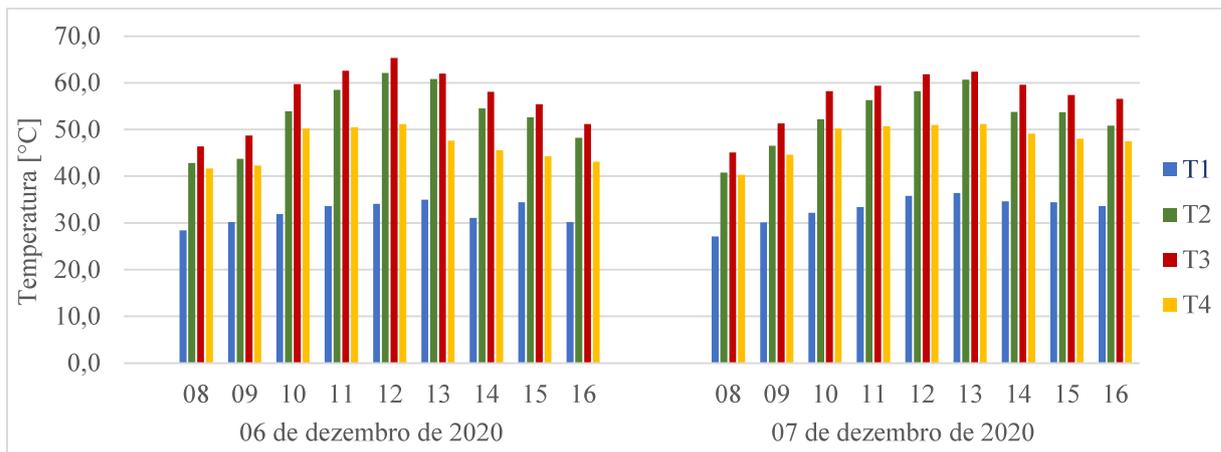
Gráfico 4.21 - Intensidade média da radiação solar no dia 06 de dezembro de 2020.



Fonte: Próprio autor.

No Gráf. 4.22 podem-se observar os valores de temperatura ambiente (T_1) e as alcançadas no secador solar, com sensores colocados no centro do interior do coletor solar (T_2), na junção que une o coletor solar e a câmara de secagem (T_3), e na saída da câmara de secagem (T_4), com as medições distribuídas ao longo dos dois dias de experimento.

Gráfico 4.22 - Distribuição das temperaturas no EXP1.



Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, verifica-se que as temperaturas médias alcançadas foram de 32,6°C para a temperatura ambiente, 56,7°C para o coletor solar e 47,2°C para a câmara de secagem e as amplitudes térmicas, diferença entre a máxima temperatura e a mínima, foram de 9,3°C, 24,5°C

e 10,9°C, respectivamente, o que permite concluir que, com a utilização da câmara de secagem as condições do ar ficam mais uniformes.

Na Tab. 4.9 são apresentados os valores obtidos para massa de abacaxi em intervalos de 60 (sessenta) min. Na mesma tabela são apresentados os valores calculados para as variáveis: velocidade do ar (v_{ar}), massa de água (m_{H_2O}), teor de umidade em base seca (X_{bs}), teor de umidade em base úmida (X_{bu}) e razão de umidade (RU).

Tabela 4.9 - Dados obtidos no experimento realizado nos dias 06 e 07 de dez de 2020.

| Data | Horário | Tempo [min] | v_{ar} [m/s] | m [g] | m_{H_2O} [g] | X_{bs} [$\frac{m_{H_2O}}{m_{ms}}$] | X_{bu} [$\frac{m_{H_2O}}{m}$] | RU |
|--------------|---------|----------------|-------------------|------------|-------------------|---|--------------------------------------|--------|
| 06/12 | 08:00 | 0 | 0,3 | 482,9 | 412,4 | 5,85 | 85,40 | 1,0000 |
| | 09:00 | 60 | 0,3 | 426,4 | 355,9 | 5,05 | 83,47 | 0,8594 |
| | 10:00 | 120 | 0,3 | 374,7 | 304,2 | 4,31 | 81,18 | 0,7307 |
| | 11:00 | 180 | 0,4 | 328,6 | 258,1 | 3,66 | 78,54 | 0,6160 |
| | 12:00 | 240 | 0,4 | 287,9 | 217,4 | 3,08 | 75,51 | 0,5147 |
| | 13:00 | 300 | 0,3 | 252,1 | 181,6 | 2,58 | 72,03 | 0,4256 |
| | 14:00 | 360 | 0,3 | 222,8 | 152,3 | 2,16 | 68,36 | 0,3527 |
| | 15:00 | 420 | 0,3 | 197,6 | 127,1 | 1,80 | 64,32 | 0,2900 |
| | 16:00 | 480 | 0,2 | 176,9 | 106,4 | 1,51 | 60,15 | 0,2385 |
| 07/12 | 08:00 | 480 | 0,2 | 176,4 | 105,9 | 1,50 | 60,03 | 0,2372 |
| | 09:00 | 540 | 0,3 | 158,0 | 87,5 | 1,24 | 55,38 | 0,1914 |
| | 10:00 | 600 | 0,3 | 141,3 | 70,8 | 1,00 | 50,10 | 0,1499 |
| | 11:00 | 660 | 0,4 | 126,6 | 56,1 | 0,80 | 44,31 | 0,1133 |
| | 12:00 | 720 | 0,3 | 114,6 | 44,1 | 0,63 | 38,48 | 0,0834 |
| | 13:00 | 780 | 0,3 | 104,9 | 34,4 | 0,49 | 32,79 | 0,0593 |
| | 14:00 | 840 | 0,3 | 97,3 | 26,8 | 0,38 | 27,54 | 0,0404 |
| | 15:00 | 900 | 0,2 | 92,5 | 22,0 | 0,31 | 23,78 | 0,0284 |
| | 16:00 | 960 | 0,2 | 89,6 | 19,1 | 0,27 | 21,31 | 0,0212 |

Fonte: Próprio autor.

A variação total de massa obtida entre o início e término das medições do experimento foi de 393,3 g, esta foi, portanto, a massa total de água retirada do abacaxi. Considerando que a massa total de água no abacaxi, no início da secagem era de 412,4 g, a eficiência do processo de secagem é obtida pelo quociente entre a massa total de água retirada durante a secagem pela massa de água inicial, dada pela Eq. 3.3.

Logo, substituindo-se os valores obtidos no experimento, na equação, tem-se a eficiência do processo de secagem obtida para o ensaio, dada por:

$$\eta_p = \frac{482,9 - 89,6}{412,4} = 95,37\%$$

Essa elevada eficiência do processo demonstra que com o uso da energia solar é possível obter eficiências equivalentes à de processos de secagem usando eletricidade ou GLP, minimizando, assim, os custos operacionais do processo, o que acarretaria a possibilidade da diminuição de preços para oferta de um alimento saudável a mais pessoas ou aumento dos lucros, além de todo ganho de marketing com a propagação da sustentabilidade desenvolvida.

Para calcular o rendimento térmico do equipamento durante o experimento apresentado, serão utilizadas as Eq. 3.5 e 3.4. Onde, a Eq. 3.5 que quantifica a potência útil apresenta os seguintes valores:

$$P_u = 0,0098 \frac{Kg}{s} * 1004,8 \frac{J}{Kg * K} * 14,6 K = 143,77 W$$

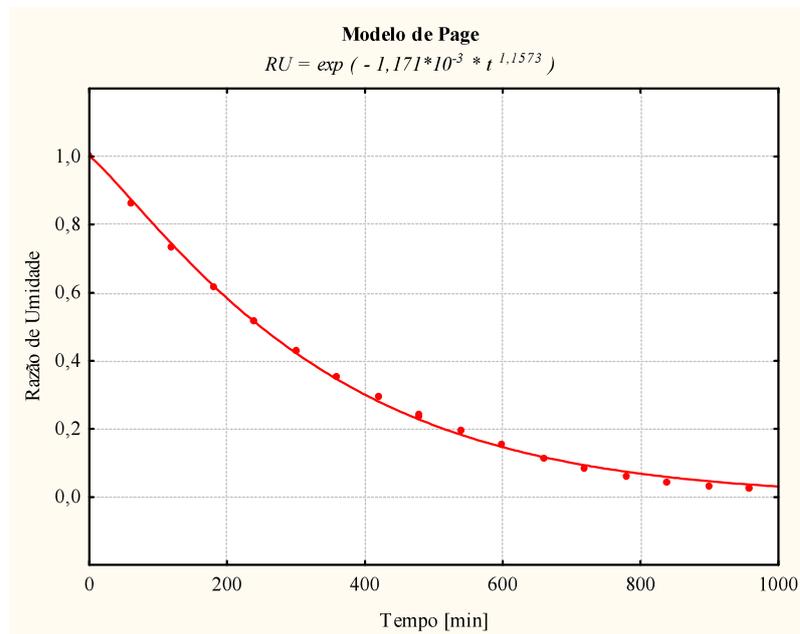
Como o coletor solar mede 0,10 x 0,80 x 1,25 m³, a área de incidência da radiação solar sobre a superfície transparente é de 1,00 m², e média da intensidade da radiação solar para os dias do experimento EXP1 foi de 712,1 W/m², tem-se, substituindo esses valores na Eq. 3.4, o rendimento térmico do equipamento obtido no experimento (η_t), dado por:

$$\eta_{t_{EXP1}} = \frac{143,77 W}{1,00 m^2 * 712,1 W/m^2} = 20,19 \%$$

Portanto, o equipamento proposto apresenta um rendimento térmico e uma eficiência de processo compatíveis com os equipamentos similares encontrados na literatura, o que demonstra a operacionalidade funcional do secador solar otimizado objeto dessa análise.

A cinética de secagem para o EXP 1, mostrada no Gráf. 4.23, é obtida através dos dados apresentados na Tabela 4.9, onde os pontos representam os valores de razão de umidade obtidos experimentalmente e a curva em linha cheia representa a cinética de secagem ajustada pelo modelo matemático de Page.

Gráfico 4.23 - Cinética de secagem do abacaxi ajustada pelo modelo de Page [EXP1].



Fonte: Próprio autor.

4.3.2 Resumo dos rendimentos do equipamento e das eficiências dos processos para os 04 (quatro) experimentos

4.3.2.1 Rendimento térmico do equipamento

Para o cálculo dos rendimentos do equipamento para cada experimento, a média dos parâmetros verificados foram calculados conforme Eq. 4.1.

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=0}^n Y}{n} \quad (4.1)$$

Portanto, na Tab. 4.10 estão explicitadas as médias de alguns parâmetros para as condições de secagem encontradas em cada processo.

Tabela 4.10 - Parâmetros de secagem.

| Experimento | Datas do Experimento | \overline{Rad} [W/m ²] | \overline{T}_{amb} [°C] | \overline{T}_{scam} [°C] | $\overline{\Delta T}$ [K] | $\overline{v_{ar}}$ [m/s] |
|--------------------|-----------------------------|---|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| EXP1 | 06 e 07/12/2020 | 712,1 | 32,6 | 47,2 | 14,6 | 0,3 |
| EXP2 | 11 e 12/12/2020 | 672,5 | 32,4 | 46,1 | 13,7 | 0,3 |
| EXP3 | 15 e 16/12/2020 | 745,2 | 33,7 | 49,0 | 15,3 | 0,3 |
| EXP4 | 21 e 22/12/2020 | 767,2 | 33,7 | 49,4 | 15,7 | 0,3 |

Fonte: Próprio autor.

Com as propriedades do ar de secagem, disponíveis na Tab. 4.6, e os dados dos parâmetros de secagem, Tab. 4.10, têm-se, na Tab. 4.11, os valores referentes à potência útil que representa a energia transferida ao fluido de trabalho durante cada processo de secagem e, conseqüentemente, o rendimento térmico do equipamento.

Tabela 4.11 - Potência útil e rendimento térmico para cada experimento.

| Experimento | Datas do Experimento | $P_u = m * c_p * \Delta T$ [W] | $\eta_t = \frac{P_u}{A * I}$ [%] |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| EXP1 | 06 e 07/12/2020 | 143,77 | 20,19 |
| EXP2 | 11 e 12/12/2020 | 134,90 | 20,06 |
| EXP3 | 15 e 16/12/2020 | 150,66 | 20,22 |
| EXP4 | 21 e 22/12/2020 | 154,60 | 20,15 |
| Média do Rendimento Térmico do Secador Solar de Frutas | | | 20,16 |

Fonte: Próprio autor.

4.3.2.2 Eficiência dos processos de secagem

Na Tab. 4.12, têm-se os valores referentes à massa inicial do produto (m_i), massa final (m_f), e quantidade de água inicial do produto ($m_{0_{H_2O}}$), em cada experimento. Logo, tem-se as eficiências dos processos de secagem para cada processo, permitindo, portanto, calcular a média da eficiência dos processos de secagem.

Tabela 4.12 - Eficiência dos processos de secagem.

| Experimento | Datas do Experimento | m_i [g] | m_f [g] | $m_{0_{H_2O}}$ [g] | η_p [%] |
|---|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|------------------------------------|
| EXP1 | 06 e 07/12/2020 | 482,9 | 89,6 | 412,4 | 95,37 |
| EXP2 | 11 e 12/12/2020 | 453,4 | 87,0 | 387,2 | 94,63 |
| EXP3 | 15 e 16/12/2020 | 443,6 | 84,1 | 378,8 | 94,90 |
| EXP4 | 21 e 22/12/2020 | 384,7 | 70,7 | 328,5 | 95,59 |
| Média das Eficiências dos Processos de Secagem | | | | | 95,12 |

Fonte: Próprio autor.

4.3.2.3 Significância da correlação estatística para os ajustes das cinéticas de secagem

Para verificação da significância da correlação obtida entre os valores preditos e os valores obtidos experimentalmente faz-se necessário analisar os valores encontrados como coeficientes de correlação (R^2). Na Tab. 4.13 são apresentados os valores dos parâmetros do modelo matemático e de correlação para cinética de secagem ajustada ao modelo de Page para cada experimento.

Tabela 4.13 - Coeficientes das cinéticas de secagem pelo modelo de Page.

| Experimento | Datas do Experimento | Modelo de Page [$RU = \exp(-K * t^n)$] | | |
|---|----------------------|--|---------|--------------|
| | | K [min^{-1}] | n | R^2 |
| EXP1 | 06 e 07/12/2020 | 0,001171 | 1,15730 | 99,93 |
| EXP2 | 11 e 12/12/2020 | 0,000503 | 1,26163 | 99,72 |
| EXP3 | 15 e 16/12/2020 | 0,001650 | 1,11893 | 99,96 |
| EXP4 | 21 e 22/12/2020 | 0,001233 | 1,14609 | 99,84 |
| Média do coeficiente de correlação | | | | 99,86 |

Fonte: Próprio autor.

Segundo Rodrigues e Iemma (2014), para que uma equação possa ser utilizada na predição de um processo, o coeficiente de correlação entre os valores preditos e os valores obtidos experimentalmente deve ser superior a 95%.

Portanto, com uma média de 99,86%, o modelo de Page serve para prever o momento no qual o processo de secagem atingirá o teor de umidade desejado e demonstra ser recomendado para análise do processo de secagem de abacaxi.

4.4 Análise da Viabilidade Econômica

Os custos referentes à fabricação de um equipamento levam em consideração o valor pago pelos materiais utilizados mais o valor cobrado pela mão-de-obra realizada por um profissional qualificado.

Na Tab. 4.14 são apresentados os valores gastos com cada material, bem como as quantidades necessárias e o valor pago para o profissional responsável pela confecção do equipamento, calculado como sendo, aproximadamente, 25% dos gastos com material.

Tabela 4.14 - Planilha de custos para fabricação do secador solar.

| Item | Unidade | Preço Unid. [US\$] | Quantidade | Valor [US\$] | |
|----------------------------|-------------------|--------------------|------------|--------------|---------------|
| Madeira de Pinus | m ² | 9,00 | 4,00 | 36,00 | |
| Policarbonato alveolar | m ² | 15,00 | 1,00 | 15,00 | |
| Alumínio | m ² | 18,50 | 1,50 | 27,75 | |
| Cantoneira L | m | 2,00 | 7,00 | 14,00 | |
| Cantoneira U 1” | m | 3,00 | 5,50 | 16,50 | |
| Cantoneira U 1/2” | m | 2,50 | 2,00 | 5,00 | |
| Fita de isolamento térmico | m | 1,00 | 5,50 | 5,50 | |
| Tela de Nylon | m ² | 1,50 | 0,50 | 0,75 | |
| Mini painel fotovoltaico | unid. | 12,00 | 1,00 | 12,00 | |
| Coolers | unid. | 3,75 | 4,00 | 15,00 | |
| Outros materiais | --- | --- | --- | 10,00 | |
| | | | | Subtotal | 157,50 |
| Mão de obra | 25±5% do Subtotal | | | | 39,50 |
| TOTAL | | | | | 197,00 |

Fonte: Próprio autor.

Com a popularização do consumo das frutas desidratadas nos últimos anos, o preço do produto caiu e, de acordo com a pesquisa de mercado realizada, atualmente, o abacaxi desidratado está sendo vendido a granel por, aproximadamente, US\$ 25,00/kg (vinte e cinco dólares por quilograma). Como é possível obter uma produção superior a 250 g por processo, tem-se um faturamento médio de R\$ 6,25/batelada (seis dólares e vinte e cinco centavos por batelada).

Logo, descontados os preços da matéria prima, embalagens e transporte, pode-se estimar que o investimento na confecção do secador solar de frutas tem seu retorno estimado, com a comercialização de frutas secas, em 150 (cento e cinquenta) dias de operação, ou seja, 75 (setenta e cinco) bateladas de secagem de abacaxi.

Capítulo IV
CONCLUSÕES

5 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos, foi possível concluir que o planejamento experimental fatorial de cada componente do secador solar de frutas demonstrou, estatisticamente, a influência do dimensionamento dos fatores analisados no rendimento térmico do equipamento, sendo, portanto, capaz de indicar a escolha de um modelo otimizado em relação aos fatores analisados.

Os coletores solares analisados apresentaram rendimento térmico que variaram em torno de $21,46 \pm 1\%$, o que mostra que todos os modelos analisados apresentaram desempenho satisfatório para composição do sistema de secagem.

O arranjo que apresentou melhor desempenho quando combinados cada fator foi a do coletor solar com volume de 100 litros, fabricado com madeira de Pinus e com superfície transparente de policarbonato alveolar.

O rendimento térmico das câmaras de secagem analisadas variou entre $58,58 \pm 4\%$ quando do tipo misto e $72,33 \pm 2\%$ quando do tipo indireto, o que já sinalizava melhor desempenho para o tipo indireto. Assim, o planejamento experimental fatorial mostrou que a câmara de secagem com volume de 50 litros, fabricada em madeira maciça de Pinus, do tipo indireta e com ventilação forçada apresentou-se como a mais adequada à composição do sistema de secagem. Neste caso a melhor relação entre os volumes do coletor em relação à câmara de secagem foi de 0,5 (50 litros/100 litros).

O planejamento experimental fatorial utilizado para o dimensionamento dos componentes do sistema de secagem otimizado chegou a um secador solar com as seguintes características: coletor solar de 100 litros e câmara de secagem de 50 litros, fabricado em madeira maciça de Pinus, com policarbonato alveolar como superfície transparente, do tipo indireto, ou seja, sem captação de energia solar na câmara de secagem, e com sistema de exaustão auxiliar do ar de secagem com ventilação forçada através de *coolers*.

O secador solar otimizado, desenvolvido e testado no processo de desidratação de abacaxi, mostrou-se compatível com os resultados esperados, funcionando plenamente e produzindo como resultado um produto final de elevado padrão de qualidade.

Os coeficientes de correlação encontrados nas análises de curvas de secagem, foram sempre superiores a 99%, comprovando que o modelo empírico de Page é aceitável para prever o tempo necessário para secagem de abacaxi. O abacaxi seco com cerca de 25% de umidade em base úmida foi obtido com um tempo médio de 16 (dezesesseis) horas de secagem solar.

A média do rendimento térmico obtida para 04 (quatro) experimentos foi de, aproximadamente, 20,16%, o que demonstra que o sistema de captação da energia solar otimizado é capaz de realizar, com eficiência, o processo de aquecimento do ar utilizado durante o processo de secagem e que a câmara de secagem viabilizou a realização de um processo de secagem mais uniforme.

A eficiência mássica do processo de secagem usando energia solar foi superior a 95%, isso comprova a viabilidade técnica e operacional do equipamento, garantindo que o sistema de secagem objeto desse estudo foi eficiente para a desidratação de abacaxi.

O equipamento desenvolvido foi construído com materiais de baixo custo, facilmente encontrados no comércio local, como forma de garantir um equipamento que possa ter sua tecnologia disseminada e que atenda à demanda dos produtores da região.

Sua operação e manutenção foram executadas sem necessidade de ações de elevada complexidade, o que comprovam sua facilidade de construção e operação, tornando-o uma tecnologia apropriada para inserção no ambiente comercial.

Os investimentos com a construção, manutenção e operação do sistema de secagem são muito baixos. O tempo de retorno do investimento ficou em torno de cinco meses de efetiva comercialização de frutas secas, o que demonstra a viabilidade econômica do secador solar desenvolvido.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

Como sugestão de trabalhos que podem ser executados a partir das análises aqui demonstradas, propõe-se:

- Promover testes experimentais, em outras localidades do Brasil, que contemple as diversas estações do ano: inverno, primavera, verão e outono, para observar a influência dos dados meteorológicos locais no desempenho do sistema de secagem;
- Analisar, por meio de planejamento experimental fatorial com componentes acessórios (capacitor térmico e desumidificador), se a inserção de tais elementos e suas contribuições no rendimento térmico são significativos e justificam o investimento necessário;
- Promover testes do equipamento no processo de desidratação de outras frutas, comprovando a viabilidade técnica da utilização do secador na secagem frutas;
- Realizar estudos demorados e de longa duração para observar o ciclo de vida desses sistemas de secagem solar que permitam determinar a vida útil do secador solar e o custo de manutenção ao longo do tempo de operação;
- Redesenho do secador solar utilizando técnicas de Desenho Industrial, como já experimentado no secador solar de exposição direta, para adequação do projeto proposto às exigências ergonômicas de manejo.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, A. T. E.; GONÇALVES, C.; PATERNIANI, M. E. A. G. Z.; TUCCI, M. L. S.; CASTRO, C. E. F. (Org.) **Instruções Agrícolas para as Principais Culturas Econômicas**. 7ª Ed, Campinas-SP, Instituto Agrônômico, 452 p. 2014.

ALMEIDA, D. S. F.; CHAVES, V. F.; SANT'ANNA, L. S. Agricultor Familiar e Produtor Rural no Brasil: os efeitos jurídicos de sua formalização como empresários individuais. **Revista Jurídica da Presidência**, Brasília-DF, v. 20, n. 120, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.20499/2236-3645.RJP2018v20e120-1248> Acesso em: 20 mar. 2020

ALEXANDRE, H. V.; GOMES, J. P.; NETO, A. L. B.; SILVA, F. L. H.; ALMEIDA, F. A. C. Cinética de Secagem de Abacaxi Cv Pérola em Fatias. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. Campina Grande, PB, v. 11, n. 2, p. 123-128, 2009.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. *Köppen's climate classification map for Brazil*. **Meteorologische Zeitschrift (Contributions to Atmospheric Sciences)**, v. 22, n. 6, p. 711–728, Stuttgart (Alemanha), 2014. Disponível em: [DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507](https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507). Acesso em: 24 de abr. 2020.

AMPARO, K. K. S.; RIBEIRO, M. C. O.; GUARIEIRO, L. L. N. Estudo de Caso Utilizando Mapeamento de Prospecção Tecnológica como Principal Ferramenta de Busca Científica. **Perspectivas em Ciência da Informação**, v. 17, p. 195-209, 2012.

BARROS, D. F., SOUZA, M. J. C. Sustentabilidade Energética: um estudo da viabilidade econômica e financeira do uso de energia renovável para agricultura familiar na cidade de Mirassol d'Oeste-MT. **Revista Educação Ambiental em Ação**. Nº 68, Ano XVIII, 2019. Disponível em: <http://www.revistaaea.org/artigo.php?idartigo=3742>. Acesso em: 11 dez. 2019

BELIK, Walter. **Estratégias para Redução de Perdas e Desperdício de Alimentos**. 2019. In: MELO, E. V. Perdas e Desperdício de Alimentos: estratégias para redução. Brasília-DF, 2019. Disponível em [https://esalqlog.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/Livro_Perdas%20e%20Desperd%3%adcio%20de%20Alimentos_CamaraLegislativa2019%20\(2\).pdf](https://esalqlog.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/Livro_Perdas%20e%20Desperd%3%adcio%20de%20Alimentos_CamaraLegislativa2019%20(2).pdf). Acesso em: 11 dez. 2019

BORGES, D. A. B.; LIMA, E. R. V.; SANTOS, J. S.; CUNHA, M. C. L.; CASTRO, A. A. B. C. Análise da Arborização Urbana na Cidade de Patos/PB. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 04, p. 1343-1359, Recife-PE, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/234646/30611>. Acesso em: 24 de abr. 2020.

BRAGA, B., ZATORRE, N., SANTOS, G., CASTRO, P. Uma Visão da Agricultura Familiar no Município de Seropédica. **Cadernos de Agroecologia**, v. 10, n. 01, 2015. ISSN 2236-7934. Disponível em: <http://revistas.aba-agroecologia.org.br/index.php/cad/article/view/20434>. Acesso em: 26 mar. 2020.

BRASIL. **Resolução RDC nº 272/05 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária**. Aprova o Regulamento Técnico para Produtos de Vegetais, Produtos de Frutas e Cogumelos Comestíveis. Diário Oficial: Brasília-DF, 23 de set. 2005.

CONCEIÇÃO, João André Soares e Sousa da. **Estudos para Otimização de um Secador Solar que utiliza Sílica Gel usado para Produção de Banana Passa**. 2019, Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. Campina Grande-PB, 2019.

COSTA, Antônio Raimundo da Silva. **Sistema de Secagem Solar para Frutos Tropicais e Modelagem da Secagem de Banana em Um Secador de Coluna Estática**. 2008, 169 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, RN, 2008.

COUTO, L. A.; COQUEIRO, J. S.; COSTA, M. L. X.; BRANDÃO, M. R. S.; CAFIEIRO, C. S. P. Análise Microbiológica e Físico-química de Banana Desidratada Submetida a Diferentes Tratamento. **Global Science and Technology**. Rio Verde-GO, v. 12, n. 03, p. 53-65, 2019. Disponível em <https://rv.ifgoiano.edu.br/periodicos/index.php/gst/article/view/1157/683>. Acesso em 27 fev. 2020

CRESESB. **Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Salvo Brito**. Disponível em: www.cresesb.cepel.br. 2019. Acesso em 24 de abr. 2020.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Pérdidas y desperdicios de alimentos en América Latina y el Caribe: Boletín 4**. 2017. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i7248s.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2019.

_____. **Agricultura familiar e sistemas alimentares inclusivos para o desenvolvimento rural sustentável**. 2018. Disponível em: <http://www.fao.org/americas/prioridades/agricultura-familiar/pt/>. Acesso em: 25mar. 2020.

_____. **Countries / Production Quantily / Pineapples / 2018**. 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 30mar. 2020.

FOOD INGREDIENTS BRAZIL. **Dossiê. Conservação de Alimentos**. n. 22, São Paulo, 2012. Disponível em: http://revista-fi.com.br/upload_arquivos/201606/2016060607896001464976217.pdf. Acesso em: 11 dez. 2019

FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D.; LIMA, E. R. V. **Potencial Pedológico das Terras do Estado da Paraíba para as Principais Culturas Agrícolas**. EDUFPG, 102 p., Campina Grande, PB, 2017.

GOMES, Ítalo de Andrade. **Desenvolvimento Experimental de um Secador Solar de Frutas com Aproveitamento Multienergético**. 2015, 121 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. Campina Grande-PB, 2015.

GOMES, Í. A.; NUNES, A. G.; GRILO, M. B. **Testes Experimentais em um Secador Termo Solar de Exposição Indireta Usado para Produzir Banana-passa**. In: V Congresso Brasileiro de Energia Solar, V CBES, 2014, Recife-PE. *Anais...*, Vol. 1, p. 1-8, Recife: ABENS, 2014.

_____. **Testes experimentais em um secador solar de exposição indireta usado para produção de abacaxi desidratado**. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, CONTECC, 2014, Teresina, PI. Inovação Tecnológica para o Desenvolvimento Nacional. Vol. 1, p. 1-4, 2014b.

GRILO, Marcelo Bezerra. **Fundamentos da Energia Solar: conceitos básicos e aplicações**. 1ª edição, Campina Grande: Editora da Universidade Federal de Campina Grande, EDUFCG, 60 p., 2007.

GRILO, M. B.; LEITE, A. P. F.; ANDRADE, R. R. D.; BELO, F. A.; MEUNIER, F. Experimental Thermodynamic Cycles and Performance Analysis of a Solar Powered Adsorptive Icemaker in Hot Humid Climate. *Renewable Energy*, v. 32, p. 697 - 712, 2007.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola: pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil**. Rio de Janeiro-RJ, Vol. 30, n. 12, 112 p., 2017.

_____. **Produção Agrícola Municipal: culturas temporárias e permanentes**. Rio de Janeiro-RJ, Vol. 46, 2019.

JUNIOR, A. O. P., SOARES, J. B., OLIVEIRA, R. G., QUEIROZ, R. P. **Indicadores energéticos para o desenvolvimento sustentável: uma análise a partir do Plano Nacional de Energia**. In: PEREIRA, T. C. G. Energias Renováveis: políticas públicas e planejamento energético, COPEL, Curitiba-RS, 2014. Disponível em:http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/942/1/Energias%20Renov%C3%A1veis_Pereira%2C%20Thulio%20C%C3%ADcero%20Guimar%C3%A3es_2014.pdf. Acesso em: 11 dez. 2019.

JUNIOR, José Jorge da Silva. **Estudo para Determinação do Modelo Matemático Representativo da Secagem da Banana usando Energia Solar e Gás Liquefeito de Petróleo**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. Campina Grande-PB. 2012.

LACERDA, Angelina Farias. **Redesenho do Secador Solar Compacto para Produção de Banana-passa**. 2014, 46 p., Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Desenho Industrial). Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. Campina Grande, PB, 2014.

LEONARDI, J. G.; AZEVEDO, B. M. Métodos de Conservação de Alimentos. Teresina-PI, **Revista Saúde em Foco**. Ed. 10, 2018.

LIMA, Antônio Gilson Barbosa de. **Fenômeno de Difusão em Sólidos Esferoidais Prolatos. Estudo de caso: secagem de banana**. 1999, 265 p., Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas-SP, 1999.

LIMA, Wellington Sousa. **Análise de Sistema de Secagem: solar, elétrico e misto na produção de banana passa**. 2017, 259 p., Tese (Doutorado em Engenharia Processos). Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, PB, 2017.

LUNKES, E. L.; WINGERT, S.; VOGT, V. F. **Avaliação Físico-química de Morangos Submetidos a Diferentes Métodos de Desidratação Osmótica e Secagem**. São Miguel do Oeste-PR, 2019, 51 p., Trabalho de Conclusão de Curso (Superior de Tecnologia em Alimentos) – Instituto Federal de Santa Catarina, Campus São Miguel do Oeste, 2019.

MACHADO, Antônio Vitor. **Estudo da secagem do pedúnculo do caju em sistema convencional e solar: modelagem e simulação do processo**. 2009, 143 p., Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, RN, 2009.

MALTA, D. C.; BERNAL, R. T. I.; NETO, E. V.; CURCI, K. A.; PASINATO, M. T. M.; LISBÔA, R. M.; CACHAPUZ, R. F.; COELHO, K. S. C.; SANTOS, F. P.; FREITAS, M. I. F. Doenças Crônicas Não Transmissíveis e fatores de risco e proteção em adultos com ou sem plano de saúde. **Ciências e Saúde Coletiva**. n. 25(8), 2020. <https://doi.org/10.1590/1413-81232020258.32762018>

MELO, Caio Tácito Miranda Castro Bezerra de. **Desenvolvimento e Estudo Experimental de Secador Solar de Frutas Aplicado à Secagem de Banana**. 2016, 150 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, 2016.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and Analysis of Experiments**. 9ª ed., New York: Ed. John Wiley & Sons, 752 p, 2017.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D.; BAILEY, M. B.; **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. Eighth edition. Nova Jersey. John Wiley & Sons, 2109 p, 2018.

NEPA/UNICAMP - Núcleo de Estudos e Pesquisas em Alimentação da Universidade Estadual de Campinas. **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TACO)**. 4ª ed, Universidade de Campinas - UNICAMP, Campinas-SP, 164 p., 2011.

NESPOLO, C. R.; OLIVEIRA, F. A.; PINTO, F. S. T.; OLIVEIRA, F. C. **Práticas em Tecnologia de Alimentos**. Porto Alegre, RS: Artmed Editora, 220 p., 2015.

NUNES, Antonio Gomes. **Desenvolvimento Experimental de um Secador Solar Multienergético para Secagem de Frutas**. 2016, 199 p., Tese (Doutorado em Engenharia Processos) Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, PB 2016.

NUNES, A. G.; GOMES, I. A.; GRILO, M. B. **Testes Experimentais com Secador Solar de Exposição Direta para Desidratação de Abacaxi**. In: VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2014, Uberlândia, MG. CONEM 2014, *Anais...*, Vol. 8, p. 1-7, 2014.

NUNES, A. G.; GOMES, I. A.; JUNIOR, J. S. S.; GRILO, M. B. Estudos para Determinação do Modelo Matemático Representativo de Experimentos com Secagem de Banana Usando Energia Solar e Gás Liquefeito de Petróleo. **Revista Magistra**, UFSC, Ilhéus, BA. Vol. 25, número especial, 2013.

PENEIRO, J. C.; MELO, L. P.; CORADI, T. B. Construção de Aquecedor Solar de Baixo Custo Sem Cobertura: análise experimental da eficiência térmica para vários ensaios. **Revista de Ciência e Tecnologia**. V.10, n. (1), p. 18-34, Nova Iguaçu-RJ, 2010.

PEREIRA, Thulio Cícero Guimarães. **Energias Renováveis: políticas públicas e planejamento energético**, Curitiba, RS. Ed. COPEL, 305 p., 2014. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/942/1/Energias%20Renov%C3%A1veis_Pereira%2C%20Thulio%20C%3%ADcero%20Guimar%C3%A3es_2014.pdf. Acesso em: 11 dez. 2019.

QUEIROGA, Daniel Queiroga. **Índice de Calor e Desconforto Térmico Humano nas Condições de Ambiente Natural em Patos, PB, Brasil**. 2019, 41 p., Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia). Universidade Federal Rural do Semiárido - UFERSA, Caraúbas - RN, 2019.

REINHARDT, D. H. R. C.; BARTHOLOMEW, D. P. B.; SOUZA, F. V. D.; CARVALHO, A. C. P. P. de; PÁDUA, T. R. P. P.; JUNGHANS, D. T.; MATOS, A. P. *Advances in pineapple plant propagation*. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 40, n. 6, 2018.

RIZVI, Syed. S. H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H.; DATTA, A. K.; AHMED, J. (Ed.). **Engineering Properties of Foods**, 4rd ed. Boca Raton: CRC Press, c. 11, p. 359-435. 2014.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos**. 4^a ed., São Paulo, SP: Cárita, 2014.

SILVA, E. B.; SCOTON, M. L. R. P. D.; DIAS, E. M.; PEREIRA, S. L.; **Automação e Sociedade: quarta revolução industrial, um olhar para o Brasil**. Rio de Janeiro, RJ: Brasport, 2018.

SILVA, F. M. A.; SMITH-MENEZES, A.; DUARTE, M. F. S. Consumo de Frutas e Vegetais Associado a Outros Comportamentos de Risco em Adolescentes no Nordeste do Brasil. **Revista Paulista de Pediatria**. Vol. 34, n. 3, p. 309-315, 2016.

SILVA, Jorge Eduardo Alves da. **Desenvolvimento de um secador solar de baixo custo: testes de campo e inovações**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande-PB, 2008.

SILVA, L. L.; RODRIGUES, L. P. M. **Importância Socioeconômica da Produção do Abacaxi no Município de Araçagi-PB**. XIX Encontro Nacional de Geógrafos. Pensar e Fazer Geografia Brasileira no Século XXI: escalas, conflitos socioespaciais e crise estrutural na nova geopolítica mundial, João Pessoa, PB. anais do XIX ENG. 2018.

SILVA, Tiago Soares da. **Estudo de um secador solar fabricado a partir de sucata de tambor de polietileno**. 2013, 78 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal-RN, 2013.

SILVEIRA, Luciano Roberto da. **Modelagem de um secador solar de produtos agrícolas com sistema de armazenagem de energia térmica**. 2016, 61 p., Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas). Universidade de São Paulo - USP, Piracicaba-SP, 2016.

STORMGEO COMPANY. **Climatologia – Patos, PB**. Climatempo (site). 2020. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/climatologia/1233/patos-pb>. Acesso em: 24 de abr. 2020.

TIEPOLO, G. M., JÚNIOR, O. C. **Tendências e Perspectivas para as Fontes Renováveis de Energia no Planejamento Energético Brasileiro**. In: PEREIRA, T. C. G. Energias Renováveis: políticas públicas e planejamento energético, Curitiba, RS COPEL, 2014
Disponível em:
http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/942/1/Energias%20Renov%C3%A1veis_Pereira%2C%20Thulio%20C%3%ADcero%20Guimar%C3%A3es_2014.pdf. Acesso em: 11 dez. 2019.

TRAJANO, Tarcísio Oliveira. **Desenvolvimento de um Sistema Automatizado para Medir a Variação de Massa na Câmara de Secagem de um Secador Solar de Frutas**. 2017, 82 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande-PB, 2017.

USP - Universidade de São Paulo; FoRC - *Food Research Center*. **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TBCA)**. Versão 7.0. São Paulo, 2019. Disponível em: <http://www.fef.usp.br/tbca>. Acesso em: 30 mar. 2020

VARELLA, F. K. O. M.; GUERRA, M. I. S. Análise do Desempenho Térmico de um Sistema de Aquecimento Solar de Baixo Custo na Cidade de Mossoró (RN). **Holos**. Natal, RN Ano 30, v. 4, p. 241-268. 2014.

APÊNDICE A
DADOS DOS ENSAIOS PARA DOE DOS COLETORES SOLARES

Tabela A.1 - Planilha de dados dos ensaios 01 e 07 (02/12/2019).

| DATA | HORÁRIO | Radiação [W/m ²] | ENSAIO 01 | | | | ENSAIO 07 | | | | |
|---------------|---------------|---------------------------------|----------------|----------------------------|----------------------|----------------|----------------------------|----------------------|----------------|----------------------------|----------------------|
| | | | Volume: | Superfície Transparente | Material Isolante | Volume: | Superfície Transparente | Material Isolante | Volume: | Superfície Transparente | Material Isolante |
| | | | 200 litros | Policarbonato | Madeira | 200 litros | Vidro | Isopor | | | |
| 02/12/2019 | 10:30 | --- | T_{amb} [°C] | T_{col} [°C] | ΔT [°C] | T_{amb} [°C] | T_{col} [°C] | ΔT [°C] | T_{col} [°C] | ΔT [°C] | |
| | 11:00 | 1015,63 | 31,7 | 53,2 | 21,5 | 31,7 | 51,4 | 19,7 | 51,4 | 19,7 | |
| | 11:30 | --- | 34,6 | 55,7 | 21,1 | 34,6 | 54,9 | 20,3 | 54,9 | 20,3 | |
| | 12:00 | 1035,93 | 38,3 | 59,8 | 21,5 | 38,3 | 58,5 | 20,2 | 58,5 | 20,2 | |
| | 12:30 | --- | 36,0 | 60,3 | 24,3 | 36,0 | 59,8 | 23,8 | 59,8 | 23,8 | |
| | 13:00 | 991,62 | 38,2 | 59,7 | 21,5 | 38,2 | 60,1 | 21,9 | 60,1 | 21,9 | |
| | 13:30 | --- | 37,7 | 61,4 | 23,7 | 37,7 | 60,7 | 23,0 | 60,7 | 23,0 | |
| | 14:00 | 881,65 | 36,1 | 57,6 | 21,5 | 36,1 | 56,7 | 20,6 | 56,7 | 20,6 | |
| | Média | 981,21 | 37,3 | 57,8 | 20,5 | 37,3 | 56,5 | 19,2 | 56,5 | 19,2 | |
| | Máximo | 1035,93 | 36,2 | 58,2 | 22,0 | 36,2 | 57,3 | 21,1 | 57,3 | 21,1 | |
| Mínimo | 881,65 | 31,7 | 53,2 | 20,5 | 31,7 | 51,4 | 19,2 | 51,4 | 19,2 | | |

Fonte: Próprio autor.

Tabela A.2 - Planilha de dados dos ensaios 02 e 08 (03/12/2019).

| DATA | HORÁRIO | Radiação [W/m ²] | ENSAIO 02 | | | | ENSAIO 08 | | | | |
|---------------|---------------|---------------------------------|----------------|----------------------------|----------------------|----------------|----------------------------|----------------------|----------------|----------------------------|----------------------|
| | | | Volume: | Superfície Transparente | Material Isolante | Volume: | Superfície Transparente | Material Isolante | Volume: | Superfície Transparente | Material Isolante |
| | | | 100 litros | Policarbonato | Madeira | 100 litros | Vidro | Isopor | | | |
| 03/12/2019 | 10:30 | --- | T_{amb} [°C] | T_{col} [°C] | ΔT [°C] | T_{amb} [°C] | T_{col} [°C] | ΔT [°C] | T_{col} [°C] | ΔT [°C] | |
| | 11:00 | 1017,70 | 34,6 | 56,3 | 21,7 | 34,6 | 55,4 | 20,8 | 55,4 | 20,8 | |
| | 11:30 | --- | 35,8 | 57,6 | 21,8 | 35,8 | 57,8 | 22,0 | 57,8 | 22,0 | |
| | 12:00 | 1038,30 | 36,7 | 59,4 | 22,7 | 36,7 | 58,9 | 22,2 | 58,9 | 22,2 | |
| | 12:30 | --- | 37,4 | 61,9 | 24,5 | 37,4 | 60,4 | 23,0 | 60,4 | 23,0 | |
| | 13:00 | 984,49 | 37,5 | 61,3 | 23,8 | 37,5 | 60,7 | 23,2 | 60,7 | 23,2 | |
| | 13:30 | --- | 37,9 | 62,7 | 24,8 | 37,9 | 61,3 | 23,4 | 61,3 | 23,4 | |
| | 14:00 | 872,22 | 37,8 | 59,6 | 21,8 | 37,8 | 60,9 | 23,1 | 60,9 | 23,1 | |
| | Média | 978,17 | 38,8 | 59,3 | 20,5 | 38,8 | 59,7 | 20,9 | 59,7 | 20,9 | |
| | Máximo | 1038,30 | 37,1 | 59,8 | 22,7 | 37,1 | 59,4 | 22,3 | 59,4 | 22,3 | |
| Mínimo | 872,22 | 34,6 | 62,7 | 24,8 | 34,6 | 61,3 | 23,4 | 61,3 | 23,4 | | |
| | | | 56,3 | 56,3 | 20,5 | 34,6 | 55,4 | 20,8 | 55,4 | 20,8 | |

Fonte: Próprio autor.

Tabela A.3 - Planilha de dados dos ensaios 03 e 05 (04/12/2019).

| DATA | HORÁRIO | Radiação [W/m ²] | ENSAIO 03 | | | | ENSAIO 05 | | | |
|---------------|----------------|---------------------------------|----------------|----------------------------|----------------------|----------------|----------------------------|----------------------|--|--|
| | | | Volume: | Superfície Transparente | Material Isolante | Volume: | Superfície Transparente | Material Isolante | | |
| | | | 200 litros | Vidro | Madeira | 200 litros | Polycarbonato | Isopor | | |
| 04/12/2019 | 10:30 | --- | T_{amb} [°C] | T_{col} [°C] | ΔT [°C] | T_{amb} [°C] | T_{col} [°C] | ΔT [°C] | | |
| | 11:00 | 1029,68 | 35,6 | 55,4 | 19,8 | 35,6 | 55,3 | 19,7 | | |
| | 11:30 | --- | 36,8 | 55,7 | 18,9 | 36,8 | 55,9 | 19,1 | | |
| | 12:00 | 1049,96 | 37,2 | 59,8 | 22,6 | 37,2 | 60,3 | 23,1 | | |
| | 12:30 | --- | 37,9 | 60,3 | 22,4 | 37,9 | 60,6 | 22,7 | | |
| | 13:00 | 995,63 | 37,8 | 59,8 | 22,0 | 37,8 | 60,1 | 22,3 | | |
| | 13:30 | --- | 37,8 | 60,1 | 22,3 | 37,8 | 59,9 | 22,1 | | |
| | 14:00 | 837,61 | 37,5 | 59,7 | 22,2 | 37,5 | 59,7 | 22,2 | | |
| Média | 978,22 | 37,8 | 58,9 | 21,1 | 37,8 | 59,2 | 21,4 | | | |
| Máximo | 1049,96 | 37,3 | 58,7 | 21,4 | 37,3 | 58,9 | 21,6 | | | |
| Mínimo | 837,61 | 37,9 | 60,3 | 22,6 | 37,9 | 60,6 | 23,1 | | | |
| | | | 35,6 | 55,4 | 18,9 | 35,6 | 55,3 | 19,1 | | |

Fonte: Próprio autor.

Tabela A.4 - Planilha de dados dos ensaios 04 e 06 (05/12/2019).

| DATA | HORÁRIO | Radiação [W/m ²] | ENSAIO 04 | | | | ENSAIO 06 | | | | |
|---------------|---------------|---------------------------------|----------------|----------------------------|----------------------|----------------|----------------------------|----------------------|----------------|----------------------------|----------------------|
| | | | Volume: | Superfície Transparente | Material Isolante | Volume: | Superfície Transparente | Material Isolante | Volume: | Superfície Transparente | Material Isolante |
| | | | 100 litros | Vidro | Madeira | 100 litros | Polycarbonato | Isopor | | | |
| 05/12/2019 | 10:30 | --- | T_{amb} [°C] | T_{col} [°C] | ΔT [°C] | T_{amb} [°C] | T_{col} [°C] | ΔT [°C] | T_{col} [°C] | ΔT [°C] | |
| | 11:00 | 918,40 | 34,0 | 55,5 | 21,5 | 34,0 | 55,3 | 21,3 | 55,3 | 21,3 | |
| | 11:30 | --- | 34,6 | 56,4 | 21,8 | 34,6 | 56,5 | 21,9 | 56,5 | 21,9 | |
| | 12:00 | 1014,30 | 35,7 | 57,9 | 22,2 | 35,7 | 57,6 | 21,9 | 57,6 | 21,9 | |
| | 12:30 | --- | 35,1 | 58,9 | 23,8 | 35,1 | 58,3 | 23,2 | 58,3 | 23,2 | |
| | 13:00 | 1033,57 | 35,6 | 59,1 | 23,5 | 35,6 | 59,2 | 23,6 | 59,2 | 23,6 | |
| | 13:30 | --- | 36,3 | 59,0 | 22,7 | 36,3 | 58,3 | 22,0 | 58,3 | 22,0 | |
| | 14:00 | 1010,45 | 36,8 | 59,7 | 22,9 | 36,8 | 58,9 | 22,1 | 58,9 | 22,1 | |
| | Média | 994,18 | 37,3 | 57,8 | 20,5 | 37,3 | 58,5 | 21,2 | 58,5 | 21,2 | |
| | Máximo | 1033,57 | 35,7 | 58,0 | 22,4 | 35,7 | 57,8 | 22,2 | 57,8 | 22,2 | |
| Mínimo | 918,40 | 34,0 | 55,5 | 20,5 | 34,0 | 55,3 | 21,2 | 55,3 | 21,2 | | |

Fonte: Próprio autor.

Tabela A.5 - Planilha de dados dos ensaios das réplicas 01 e 08 (06/12/2019).

| DATA | HORÁRIO | Radiação [W/m ²] | RÉPLICA 01 | | | | RÉPLICA 08 | | | | |
|------------|---------|---------------------------------|----------------|----------------------------|----------------------|----------------|----------------------------|----------------------|----------------|----------------------------|----------------------|
| | | | Volume: | Superfície Transparente | Material Isolante | Volume: | Superfície Transparente | Material Isolante | Volume: | Superfície Transparente | Material Isolante |
| | | | 200 litros | Policarbonato | Madeira | 100 litros | Vidro | Isopor | 200 litros | Vidro | Isopor |
| | | | T_{amb} [°C] | T_{col} [°C] | ΔT [°C] | T_{amb} [°C] | T_{col} [°C] | ΔT [°C] | T_{amb} [°C] | T_{col} [°C] | ΔT [°C] |
| 06/12/2019 | 10:30 | --- | 32,9 | 52,9 | 20,0 | 32,9 | 53,7 | 20,8 | | | |
| | 11:00 | 1020,38 | 33,4 | 54,8 | 21,4 | 33,4 | 56,1 | 22,7 | | | |
| | 11:30 | --- | 35,3 | 57,6 | 22,3 | 35,3 | 57,1 | 21,8 | | | |
| | 12:00 | 1050,82 | 35,8 | 60,2 | 24,4 | 35,8 | 58,6 | 22,8 | | | |
| | 12:30 | --- | 35,4 | 60,5 | 25,1 | 35,4 | 58,9 | 23,5 | | | |
| | 13:00 | 1012,48 | 36,9 | 61,3 | 24,4 | 36,9 | 59,4 | 22,5 | | | |
| | 13:30 | --- | 36,3 | 57,4 | 21,1 | 36,3 | 59,1 | 22,8 | | | |
| | 14:00 | 895,16 | 37,1 | 55,4 | 18,3 | 37,1 | 57,9 | 20,8 | | | |
| Média | | 994,71 | 35,4 | 57,5 | 22,1 | 35,4 | 57,6 | 22,2 | | | |
| Máximo | | 1050,82 | 37,1 | 61,3 | 25,1 | 37,1 | 59,4 | 23,5 | | | |
| Mínimo | | 895,16 | 32,9 | 52,9 | 18,3 | 32,9 | 53,7 | 20,8 | | | |

Fonte: Próprio autor.

Tabela A.6 - Planilha de dados dos ensaios das réplicas 04 e 05 (07/12/2019).

| DATA | HORÁRIO | Radiação [W/m ²] | RÉPLICA 04 | | | | RÉPLICA 05 | | | | |
|------------|---------|---------------------------------|------------|----------------------------|----------------------|------------|----------------------------|----------------------|----------------|----------------------------|----------------------|
| | | | Volume: | Superfície Transparente | Material Isolante | Volume: | Superfície Transparente | Material Isolante | Volume: | Superfície Transparente | Material Isolante |
| | | | 100 litros | Vidro | Madeira | 200 litros | Polycarbonato | Isopor | T_{amb} [°C] | T_{col} [°C] | ΔT [°C] |
| 07/12/2019 | 10:30 | --- | 34,6 | 56,1 | 21,5 | 34,6 | 54,6 | 20,0 | | | |
| | 11:00 | 903,98 | 35,2 | 57,5 | 22,3 | 35,2 | 55,2 | 20,0 | | | |
| | 11:30 | --- | 36,7 | 58,3 | 21,6 | 36,7 | 59,5 | 22,8 | | | |
| | 12:00 | 1006,11 | 37,9 | 59,4 | 21,5 | 37,9 | 59,8 | 21,9 | | | |
| | 12:30 | --- | 37,1 | 60,0 | 22,9 | 37,1 | 59,3 | 22,2 | | | |
| | 13:00 | 978,59 | 36,2 | 59,6 | 23,4 | 36,2 | 59,1 | 22,9 | | | |
| | 13:30 | --- | 36,5 | 59,5 | 23,0 | 36,5 | 58,9 | 22,4 | | | |
| | 14:00 | 1013,54 | 37,3 | 59,1 | 21,8 | 37,3 | 58,4 | 21,1 | | | |
| | Média | 975,56 | 36,4 | 58,7 | 22,3 | 36,4 | 58,1 | 21,7 | | | |
| | Máximo | 1013,54 | 37,9 | 60,0 | 23,4 | 37,9 | 59,8 | 22,9 | | | |
| Mínimo | 903,98 | 34,6 | 56,1 | 21,5 | 34,6 | 54,6 | 20,0 | | | | |

Fonte: Próprio autor.

Tabela A.7 - Planilha de dados dos ensaios das réplicas 02 e 07 (09/12/2019).

| DATA | HORÁRIO | Radiação [W/m ²] | RÉPLICA 02 | | | | RÉPLICA 07 | | | | |
|------------|---------------|---------------------------------|----------------|----------------------------|----------------------|----------------|----------------------------|----------------------|----------------|----------------------------|----------------------|
| | | | Volume: | Superfície Transparente | Material Isolante | Volume: | Superfície Transparente | Material Isolante | Volume: | Superfície Transparente | Material Isolante |
| | | | 100 litros | Policarbonato | Madeira | 200 litros | Vidro | Isopor | | | |
| 09/12/2019 | 10:30 | --- | T_{amb} [°C] | T_{col} [°C] | ΔT [°C] | T_{amb} [°C] | T_{col} [°C] | ΔT [°C] | T_{col} [°C] | ΔT [°C] | |
| | 11:00 | 869,62 | 32,7 | 55,0 | 22,3 | 32,7 | 50,8 | 18,1 | 50,8 | 18,1 | |
| | 11:30 | --- | 33,8 | 56,3 | 22,5 | 33,8 | 54,2 | 20,4 | 54,2 | 20,4 | |
| | 12:00 | 1055,90 | 35,7 | 58,0 | 22,3 | 35,7 | 57,8 | 22,1 | 57,8 | 22,1 | |
| | 12:30 | --- | 36,5 | 60,5 | 24,0 | 36,5 | 59,1 | 22,6 | 59,1 | 22,6 | |
| | 13:00 | 1082,73 | 36,8 | 59,9 | 23,1 | 36,8 | 59,4 | 22,6 | 59,4 | 22,6 | |
| | 13:30 | --- | 37,1 | 61,2 | 24,1 | 37,1 | 59,7 | 22,6 | 59,7 | 22,6 | |
| | 14:00 | 924,35 | 36,1 | 58,2 | 22,1 | 36,1 | 56,0 | 19,9 | 56,0 | 19,9 | |
| | Média | 983,15 | 35,8 | 57,9 | 22,1 | 35,8 | 55,8 | 20,0 | 55,8 | 20,0 | |
| | Máximo | 1082,73 | 35,6 | 58,4 | 22,8 | 35,6 | 56,6 | 21,0 | 56,6 | 21,0 | |
| | Mínimo | 869,62 | 32,7 | 55,0 | 22,1 | 32,7 | 50,8 | 18,1 | 50,8 | 18,1 | |

Fonte: Próprio autor.

Tabela A.8 - Planilha de dados dos ensaios das réplicas 03 e 06 (10/12/2019).

| DATA | HORÁRIO | Radiação [W/m ²] | RÉPLICA 03 | | | | RÉPLICA 06 | | | | |
|---------------|---------------|---------------------------------|----------------|----------------------------|----------------------|----------------|----------------------------|----------------------|----------------|----------------------------|----------------------|
| | | | Volume: | Superfície Transparente | Material Isolante | Volume: | Superfície Transparente | Material Isolante | Volume: | Superfície Transparente | Material Isolante |
| | | | 200 litros | Vidro | Madeira | 100 litros | Polycarbonato | Isopor | | | |
| 10/12/2019 | 10:30 | --- | T_{amb} [°C] | T_{col} [°C] | ΔT [°C] | T_{amb} [°C] | T_{col} [°C] | ΔT [°C] | T_{amb} [°C] | T_{col} [°C] | ΔT [°C] |
| | 11:00 | 1042,93 | 33,4 | 53,2 | 19,8 | 33,4 | 54,8 | 21,4 | 33,4 | 54,8 | 21,4 |
| | 11:30 | --- | 34,8 | 53,4 | 18,6 | 34,8 | 56,0 | 21,2 | 36,3 | 57,1 | 20,8 |
| | 12:00 | 1071,28 | 36,3 | 57,4 | 21,1 | 37,0 | 57,8 | 20,8 | 37,0 | 57,8 | 20,8 |
| | 12:30 | --- | 37,2 | 57,4 | 20,2 | 37,2 | 58,7 | 21,5 | 35,8 | 57,8 | 22,0 |
| | 13:00 | 905,54 | 35,8 | 57,7 | 21,9 | 33,1 | 58,4 | 25,3 | 32,3 | 58,0 | 25,7 |
| | 13:30 | --- | 33,1 | 57,3 | 24,2 | 32,3 | 56,5 | 24,2 | 35,0 | 56,3 | 21,3 |
| | 14:00 | 901,73 | 32,3 | 56,5 | 24,2 | 32,3 | 56,5 | 24,2 | 37,2 | 57,7 | 24,2 |
| | Média | 980,37 | 35,0 | 56,3 | 21,3 | 35,0 | 57,3 | 22,3 | 32,3 | 54,8 | 20,8 |
| | Máximo | 1071,28 | 37,2 | 57,7 | 24,2 | 37,2 | 58,7 | 25,7 | 32,3 | 54,8 | 20,8 |
| Mínimo | 901,73 | 32,3 | 53,2 | 18,6 | 32,3 | 54,8 | 20,8 | 32,3 | 54,8 | 20,8 | |

Fonte: Próprio autor.

APÊNDICE B
DADOS DOS ENSAIOS PARA DOE DAS CÂMARAS DE SECAGEM

Tabela B.1 - Planilha de dados do ensaio 10 (19/10/2020).

| ENSAIO 10 | | Volume: 50 litros | | | Tipo: Indireto | | Ventilação: Forçada | | |
|------------------|--------------|------------------------------|----------------|--------------------------|----------------|----------------------|----------------------|-------------|--|
| Data | Horário | R_{ad} [W/m ²] | T_{amb} [°C] | T_{scol}/T_{ecam} [°C] | T_{cam} [°C] | ΔT_{col} [K] | ΔT_{cam} [K] | | |
| 19/10/2020 | 10:30 | --- | 32,9 | 55,4 | 49,4 | 22,5 | -6,0 | | |
| | 11:00 | 1039,1 | 33,2 | 56,0 | 50,3 | 22,8 | -5,7 | | |
| | 11:30 | --- | 34,3 | 57,7 | 51,4 | 23,4 | -6,3 | | |
| | 12:00 | 1029,9 | 34,8 | 60,2 | 52,9 | 25,4 | -7,3 | | |
| | 12:30 | --- | 35,7 | 61,1 | 54,1 | 25,4 | -7,0 | | |
| | 13:00 | 952,3 | 35,5 | 60,8 | 53,5 | 25,3 | -7,3 | | |
| | 13:30 | --- | 36,6 | 59,2 | 53,8 | 22,6 | -5,4 | | |
| | 14:00 | 800,6 | 36,7 | 59,5 | 53,5 | 22,8 | -6,0 | | |
| | MÉDIA | | 955,5 | 35,0 | 58,7 | 52,4 | 23,8 | -6,4 | |

Fonte: Próprio autor.

Tabela B.2 - Planilha de dados do ensaio 13 (20/10/2020).

| ENSAIO 13 | | Volume: 100 litros | | | Tipo: Indireto | | Ventilação: Natural | |
|------------------|-------|--------------------|------------------------------|----------------|--------------------------|----------------|----------------------|----------------------|
| | | Horário | R_{ad} [W/m ²] | T_{amb} [°C] | T_{scol}/T_{ecam} [°C] | T_{cam} [°C] | ΔT_{col} [K] | ΔT_{cam} [K] |
| 20/10/2020 | 10:30 | --- | 31,9 | 55,1 | 52,1 | 23,2 | -3,0 | |
| | 11:00 | 1020,4 | 33,6 | 58,8 | 50,6 | 25,2 | -8,2 | |
| | 11:30 | --- | 33,8 | 59,0 | 52,0 | 25,2 | -7,0 | |
| | 12:00 | 1024,3 | 34,4 | 62,3 | 55,2 | 27,9 | -7,1 | |
| | 12:30 | --- | 35,9 | 63,1 | 54,9 | 27,2 | -8,2 | |
| | 13:00 | 963,9 | 35,7 | 64,4 | 54,3 | 28,7 | -10,1 | |
| | 13:30 | --- | 35,6 | 62,6 | 52,1 | 27,0 | -10,5 | |
| | 14:00 | 840,4 | 36,2 | 61,3 | 52,7 | 25,1 | -8,6 | |
| MÉDIA | | 962,2 | 34,6 | 60,8 | 53,0 | 26,2 | -7,8 | |

Fonte: Próprio autor.

Tabela B.3 - Planilha de dados do ensaio 14 (21/10/2020).

| ENSAIO 14 | | Volume: 50 litros | | Tipo: Indireto | | Ventilação: Natural | | |
|------------------|--------------|-------------------|------------------------------|----------------|--------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| | | Horário | R_{ad} [W/m ²] | T_{amb} [°C] | T_{scol}/T_{ecam} [°C] | T_{cam} [°C] | ΔT_{col} [K] | ΔT_{cam} [K] |
| 21/10/2020 | 10:30 | --- | 33,7 | 58,2 | 52,6 | 24,5 | -5,6 | |
| | 11:00 | 1034,9 | 33,9 | 59,3 | 52,9 | 25,4 | -6,4 | |
| | 11:30 | --- | 34,5 | 62,8 | 53,5 | 28,3 | -9,3 | |
| | 12:00 | 948,2 | 34,7 | 64,3 | 54,4 | 29,6 | -9,9 | |
| | 12:30 | --- | 34,7 | 64,7 | 55,6 | 30,0 | -9,1 | |
| | 13:00 | 860,5 | 35,1 | 65,3 | 56,1 | 30,2 | -9,2 | |
| | 13:30 | --- | 35,0 | 61,4 | 53,8 | 26,4 | -7,6 | |
| | 14:00 | 772,5 | 34,5 | 60,2 | 52,9 | 25,7 | -7,3 | |
| | MÉDIA | | 904,0 | 34,5 | 62,0 | 54,0 | 27,5 | -8,1 |

Fonte: Próprio autor.

Tabela B.4 - Planilha de dados do ensaio 11 (22/10/2020).

| ENSAIO 11 | | Volume: 100 litros | | | Tipo: Misto | | Ventilação: Forçada | |
|------------------|-------|--------------------|------------------------------|----------------|--------------------------|----------------|----------------------|----------------------|
| | | Horário | R_{ad} [W/m ²] | T_{amb} [°C] | T_{scol}/T_{ecam} [°C] | T_{cam} [°C] | ΔT_{col} [K] | ΔT_{cam} [K] |
| 22/10/2020 | 10:30 | --- | 34,7 | 55,0 | 50,4 | 20,3 | -4,6 | |
| | 11:00 | 890,5 | 34,7 | 55,4 | 51,2 | 20,7 | -4,2 | |
| | 11:30 | --- | 35,5 | 58,9 | 51,7 | 23,4 | -7,2 | |
| | 12:00 | 776,1 | 35,4 | 60,4 | 52,4 | 25,0 | -8,0 | |
| | 12:30 | --- | 35,7 | 60,8 | 52,8 | 25,1 | -8,0 | |
| | 13:00 | 839,1 | 36,8 | 61,4 | 53,6 | 24,6 | -7,8 | |
| | 13:30 | --- | 37,0 | 58,5 | 52,3 | 21,5 | -6,2 | |
| | 14:00 | 887,6 | 36,9 | 56,3 | 51,7 | 19,4 | -4,6 | |
| MÉDIA | | 848,3 | 35,8 | 58,3 | 52,0 | 22,5 | -6,3 | |

Fonte: Próprio autor.

Tabela B.5 - Planilha de dados do ensaio 15 (23/10/2020).

| ENSAIO 15 | | Volume: 100 litros | | | Tipo: Misto | | | Ventilação: Natural | |
|------------------|-------|--------------------|------------------------------|----------------|--------------------------|----------------|----------------------|----------------------|--|
| | | Horário | R_{ad} [W/m ²] | T_{amb} [°C] | T_{scol}/T_{ecam} [°C] | T_{cam} [°C] | ΔT_{col} [K] | ΔT_{cam} [K] | |
| 23/10/2020 | 10:30 | --- | 34,8 | 58,5 | 53,6 | 23,7 | -4,9 | | |
| | 11:00 | 1087,6 | 35,2 | 59,6 | 53,9 | 24,4 | -5,7 | | |
| | 11:30 | --- | 34,9 | 63,1 | 54,5 | 28,2 | -8,6 | | |
| | 12:00 | 876,4 | 34,5 | 64,7 | 55,4 | 30,2 | -9,3 | | |
| | 12:30 | --- | 35,2 | 65,0 | 56,1 | 29,8 | -8,9 | | |
| | 13:00 | 904,1 | 35,1 | 65,6 | 56,6 | 30,5 | -9,0 | | |
| | 13:30 | --- | 36,5 | 61,7 | 54,8 | 25,2 | -6,9 | | |
| | 14:00 | 763,9 | 36,3 | 60,5 | 53,9 | 24,2 | -6,6 | | |
| MÉDIA | | 908,0 | 35,3 | 62,3 | 54,9 | 27,0 | -7,5 | | |

Fonte: Próprio autor.

Tabela B.6 - Planilha de dados do ensaio 16 (24/10/2020).

| ENSAIO 16 | | Volume: 50 litros | | | Tipo: Misto | | Ventilação: Natural | |
|------------------|-------|-------------------|------------------------------|----------------|--------------------------|----------------|----------------------|----------------------|
| | | Horário | R_{ad} [W/m ²] | T_{amb} [°C] | T_{scol}/T_{ecam} [°C] | T_{cam} [°C] | ΔT_{col} [K] | ΔT_{cam} [K] |
| 24/10/2020 | 10:30 | --- | 34,0 | 60,0 | 54,6 | 26,0 | -5,4 | |
| | 11:00 | 799,1 | 34,4 | 60,3 | 54,9 | 25,9 | -5,4 | |
| | 11:30 | --- | 34,5 | 63,8 | 55,5 | 29,3 | -8,3 | |
| | 12:00 | 999,5 | 34,9 | 65,3 | 55,9 | 30,4 | -9,4 | |
| | 12:30 | --- | 35,9 | 65,7 | 57,0 | 29,8 | -8,7 | |
| | 13:00 | 1033,9 | 36,5 | 66,3 | 57,5 | 29,8 | -8,8 | |
| | 13:30 | --- | 36,7 | 62,4 | 55,8 | 25,7 | -6,6 | |
| | 14:00 | 961,3 | 36,3 | 61,2 | 54,9 | 24,9 | -6,3 | |
| MÉDIA | | 948,5 | 35,4 | 63,1 | 55,8 | 27,7 | -7,4 | |

Fonte: Próprio autor.

Tabela B.7 - Planilha de dados do ensaio 09 (25/10/2020).

| ENSAIO 09 | | Volume: 100 litros | | Tipo: Indireto | | Ventilação: Forçada | |
|------------------|---------|------------------------------|----------------|--------------------------|----------------|----------------------|----------------------|
| Data | Horário | R_{ad} [W/m ²] | T_{amb} [°C] | T_{scol}/T_{ecam} [°C] | T_{cam} [°C] | ΔT_{col} [K] | ΔT_{cam} [K] |
| 25/10/2020 | 10:30 | --- | 34,5 | 56,5 | 51,2 | 22,0 | -5,3 |
| | 11:00 | 955,5 | 34,4 | 57,0 | 51,5 | 22,6 | -5,5 |
| | 11:30 | --- | 35,3 | 58,2 | 52,4 | 22,9 | -5,8 |
| | 12:00 | 1038,5 | 35,6 | 61,0 | 53,7 | 25,4 | -7,3 |
| | 12:30 | --- | 35,8 | 61,8 | 53,9 | 26,0 | -7,9 |
| | 13:00 | 1038,1 | 35,6 | 61,5 | 54,3 | 25,9 | -7,2 |
| | 13:30 | --- | 36,1 | 59,7 | 54,2 | 23,6 | -5,5 |
| | 14:00 | 721,4 | 37,1 | 60,0 | 54,1 | 22,9 | -5,9 |
| MÉDIA | | 938,4 | 35,6 | 59,5 | 53,2 | 23,9 | -6,3 |

Fonte: Próprio autor.

Tabela B.8 - Planilha de dados do ensaio 12 (26/10/2020).

| ENSAIO 12 | | Volume: 50 litros | | | Tipo: Misto | | Ventilação: Forçada | |
|------------------|-------|-------------------|------------------------------|----------------|--------------------------|----------------|----------------------|----------------------|
| | | Horário | R_{ad} [W/m ²] | T_{amb} [°C] | T_{scol}/T_{ecam} [°C] | T_{cam} [°C] | ΔT_{col} [K] | ΔT_{cam} [K] |
| 26/10/2020 | 10:30 | --- | 34,3 | 55,0 | 50,4 | 20,7 | -4,6 | |
| | 11:00 | 942,0 | 34,5 | 55,4 | 51,2 | 20,9 | -4,2 | |
| | 11:30 | --- | 35,0 | 58,9 | 51,7 | 23,9 | -7,2 | |
| | 12:00 | 1008,9 | 35,1 | 60,4 | 52,4 | 25,3 | -8,0 | |
| | 12:30 | --- | 35,0 | 60,8 | 52,8 | 25,8 | -8,0 | |
| | 13:00 | 957,3 | 36,3 | 61,4 | 53,6 | 25,1 | -7,8 | |
| | 13:30 | --- | 36,2 | 58,5 | 52,3 | 22,3 | -6,2 | |
| | 14:00 | 921,4 | 36,5 | 56,3 | 51,7 | 19,8 | -4,6 | |
| MÉDIA | | 957,4 | 35,4 | 58,3 | 52,0 | 23,0 | -6,3 | |

Fonte: Próprio autor.

Tabela B.9 - Planilha de dados da réplica 11 (03/11/2020).

| RÉPLICA 11 | | Volume: 100 litros | | | Tipo: Misto | | Ventilação: Forçada | |
|-------------------|--------------|--------------------|------------------------------|----------------|--------------------------|----------------|----------------------|----------------------|
| | | Horário | R_{ad} [W/m ²] | T_{amb} [°C] | T_{scol}/T_{ecam} [°C] | T_{cam} [°C] | ΔT_{col} [K] | ΔT_{cam} [K] |
| 03/11/2020 | 10:30 | --- | 31,1 | 51,7 | 47,2 | 20,6 | -4,4 | |
| | 11:00 | 1070,4 | 31,2 | 52,2 | 48,1 | 21,0 | -4,1 | |
| | 11:30 | --- | 31,9 | 55,6 | 48,7 | 23,7 | -6,9 | |
| | 12:00 | 997,9 | 32,4 | 57,7 | 50,0 | 25,3 | -7,7 | |
| | 12:30 | --- | 33,9 | 59,3 | 51,6 | 25,4 | -7,7 | |
| | 13:00 | 913,0 | 34,1 | 59,0 | 51,5 | 24,9 | -7,5 | |
| | 13:30 | --- | 33,6 | 55,4 | 49,4 | 21,8 | -6,0 | |
| | 14:00 | 941,8 | 32,4 | 52,1 | 47,6 | 19,7 | -4,4 | |
| | MÉDIA | | 980,8 | 32,6 | 55,4 | 49,3 | 22,8 | -6,1 |

Fonte: Próprio autor.

Tabela B.10 - Planilha de dados da réplica 16 (04/11/2020).

| RÉPLICA 16 | | Volume: 50 litros | | | Tipo: Misto | | Ventilação: Natural | |
|-------------------|--------------|-------------------|-------------------------------|----------------|--------------------------|----------------|----------------------|----------------------|
| | | Horário | R_{rad} [W/m ²] | T_{amb} [°C] | T_{scol}/T_{ecam} [°C] | T_{cam} [°C] | ΔT_{col} [K] | ΔT_{cam} [K] |
| 04/11/2020 | 10:30 | --- | 30,9 | 56,3 | 51,0 | 25,4 | -5,4 | |
| | 11:00 | 785,3 | 32,3 | 57,6 | 52,3 | 25,3 | -5,4 | |
| | 11:30 | --- | 32,6 | 61,2 | 53,0 | 28,6 | -8,2 | |
| | 12:00 | 894,9 | 32,8 | 62,5 | 53,2 | 29,7 | -9,3 | |
| | 12:30 | --- | 33,2 | 62,3 | 53,7 | 29,1 | -8,6 | |
| | 13:00 | 1013,8 | 33,6 | 62,7 | 54,0 | 29,1 | -8,7 | |
| | 13:30 | --- | 33,4 | 58,5 | 52,0 | 25,1 | -6,5 | |
| | 14:00 | 944,7 | 32,7 | 57,0 | 50,8 | 24,3 | -6,2 | |
| | MÉDIA | | 909,7 | 32,7 | 59,8 | 52,5 | 27,1 | -7,3 |

Fonte: Próprio autor.

Tabela B.11 - Planilha de dados da réplica 14 (05/11/2020).

| RÉPLICA 14 | | Volume: 50 litros | | | Tipo: Indireto | | | Ventilação: Natural | |
|-------------------|-------|-------------------|------------------------------|----------------|--------------------------|----------------|----------------------|----------------------|--|
| | | Horário | R_{ad} [W/m ²] | T_{amb} [°C] | T_{scol}/T_{ecam} [°C] | T_{cam} [°C] | ΔT_{col} [K] | ΔT_{cam} [K] | |
| 05/11/2020 | 10:30 | --- | 31,8 | 57,1 | 51,4 | 25,3 | -5,7 | | |
| | 11:00 | 875,4 | 33,4 | 59,6 | 53,1 | 26,2 | -6,5 | | |
| | 11:30 | --- | 33,8 | 63,0 | 53,5 | 29,2 | -9,5 | | |
| | 12:00 | 1014,0 | 33,7 | 64,3 | 54,2 | 30,6 | -10,1 | | |
| | 12:30 | --- | 34,2 | 65,2 | 55,9 | 31,0 | -9,3 | | |
| | 13:00 | 922,5 | 33,1 | 64,3 | 54,9 | 31,2 | -9,4 | | |
| | 13:30 | --- | 32,5 | 59,8 | 52,0 | 27,3 | -7,7 | | |
| | 14:00 | 889,9 | 31,3 | 57,8 | 50,4 | 26,5 | -7,4 | | |
| MÉDIA | | 925,5 | 33,0 | 61,4 | 53,2 | 28,4 | -8,2 | | |

Fonte: Próprio autor.

Tabela B.12 - Planilha de dados da réplica 13 (06/11/2020).

| RÉPLICA 13 | | Volume: 100 litros | | | Tipo: Indireto | | Ventilação: Natural | |
|-------------------|--------------|--------------------|------------------------------|----------------|--------------------------|----------------|----------------------|-------------|
| | | Horário | R_{ad} [W/m ²] | T_{amb} [°C] | T_{scol}/T_{ecam} [°C] | T_{cam} [°C] | ΔT_{col} [K] | Data |
| 06/11/2020 | 10:30 | --- | 33,5 | 58,5 | 55,4 | 25,0 | -3,1 | |
| | 11:00 | 1024,1 | 34,2 | 61,3 | 53,0 | 27,1 | -8,4 | |
| | 11:30 | --- | 35,6 | 62,7 | 55,6 | 27,1 | -7,1 | |
| | 12:00 | 922,5 | 35,3 | 65,3 | 58,1 | 30,0 | -7,2 | |
| | 12:30 | --- | 34,2 | 63,5 | 55,1 | 29,3 | -8,4 | |
| | 13:00 | 883,1 | 33,6 | 64,5 | 54,2 | 30,9 | -10,3 | |
| | 13:30 | --- | 33,4 | 62,5 | 51,8 | 29,1 | -10,7 | |
| | 14:00 | 834,2 | 33,0 | 60,0 | 51,3 | 27,0 | -8,8 | |
| | MÉDIA | | 916,00 | 34,1 | 62,3 | 54,3 | 28,2 | -8,0 |

Fonte: Próprio autor.

Tabela B.13 - Planilha de dados da réplica 12 (07/11/2020).

| RÉPLICA 12 | | Volume: 50 litros | | | Tipo: Misto | | Ventilação: Forçada | |
|-------------------|-------|-------------------|------------------------------|----------------|--------------------------|----------------|----------------------|----------------------|
| | | Horário | R_{ad} [W/m ²] | T_{amb} [°C] | T_{scol}/T_{ecam} [°C] | T_{cam} [°C] | ΔT_{col} [K] | ΔT_{cam} [K] |
| 07/11/2020 | 10:30 | --- | 33,5 | 53,8 | 49,4 | 20,3 | -4,4 | |
| | 11:00 | 1028,4 | 34,3 | 54,8 | 50,8 | 20,5 | -4,0 | |
| | 11:30 | --- | 34,6 | 58,0 | 51,2 | 23,4 | -6,8 | |
| | 12:00 | 1041,5 | 35,4 | 60,2 | 52,6 | 24,8 | -7,6 | |
| | 12:30 | --- | 35,8 | 61,1 | 53,5 | 25,3 | -7,6 | |
| | 13:00 | 1022,8 | 35,6 | 60,2 | 52,8 | 24,6 | -7,4 | |
| | 13:30 | --- | 36,5 | 58,3 | 52,5 | 21,8 | -5,9 | |
| | 14:00 | 865,1 | 35,9 | 55,3 | 50,9 | 19,4 | -4,4 | |
| MÉDIA | | 989,4 | 35,2 | 57,7 | 51,7 | 22,5 | -6,0 | |

Fonte: Próprio autor.

Tabela B.14 - Planilha de dados da réplica 15 (08/11/2020).

| RÉPLICA 15 | | Volume: 100 litros | | Tipo: Misto | | Ventilação: Natural | | |
|-------------------|--------------|--------------------|-------------------------------|----------------|--------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| | | Horário | R_{rad} [W/m ²] | T_{amb} [°C] | T_{scol}/T_{ecam} [°C] | T_{cam} [°C] | ΔT_{col} [K] | ΔT_{cam} [K] |
| 08/11/2020 | 10:30 | --- | 32,9 | 58,0 | 53,1 | 25,1 | -4,8 | |
| | 11:00 | 925,8 | 33,1 | 58,9 | 53,3 | 25,8 | -5,6 | |
| | 11:30 | --- | 34,1 | 63,9 | 55,4 | 29,8 | -8,5 | |
| | 12:00 | 930,6 | 34,3 | 66,3 | 57,1 | 32,0 | -9,2 | |
| | 12:30 | --- | 34,9 | 66,4 | 57,6 | 31,5 | -8,8 | |
| | 13:00 | 1026,7 | 35,3 | 67,6 | 58,7 | 32,3 | -8,9 | |
| | 13:30 | --- | 35,4 | 62,1 | 55,2 | 26,7 | -6,8 | |
| | 14:00 | 997,7 | 35,8 | 61,4 | 54,9 | 25,6 | -6,5 | |
| | MÉDIA | | 970,2 | 34,5 | 63,1 | 55,7 | 28,6 | -7,4 |

Fonte: Próprio autor.

Tabela B.15 - Planilha de dados da réplica 10 (09/11/2020).

| RÉPLICA 10 | | Volume: 50 litros | | | Tipo: Indireto | | | Ventilação: Forçada | |
|-------------------|-------|-------------------|------------------------------|----------------|--------------------------|----------------|----------------------|----------------------|--|
| | | Horário | R_{ad} [W/m ²] | T_{amb} [°C] | T_{scol}/T_{ecam} [°C] | T_{cam} [°C] | ΔT_{col} [K] | ΔT_{cam} [K] | |
| 09/11/2020 | 10:30 | --- | 28,8 | 48,9 | 45,0 | 20,1 | -3,9 | | |
| | 11:00 | 858,8 | 30,9 | 51,6 | 47,0 | 20,7 | -4,6 | | |
| | 11:30 | --- | 31,4 | 55,3 | 48,4 | 23,9 | -6,9 | | |
| | 12:00 | 959,6 | 32,6 | 58,2 | 50,7 | 25,6 | -7,5 | | |
| | 12:30 | --- | 33,7 | 59,0 | 51,8 | 25,3 | -7,1 | | |
| | 13:00 | 965,4 | 35,0 | 60,8 | 53,6 | 25,8 | -7,2 | | |
| | 13:30 | --- | 34,6 | 56,0 | 50,4 | 21,4 | -5,5 | | |
| | 14:00 | 888,1 | 33,0 | 53,5 | 48,2 | 20,5 | -5,3 | | |
| MÉDIA | | 918,0 | 32,5 | 55,4 | 49,4 | 22,9 | -6,0 | | |

Fonte: Próprio autor.

Tabela B.16 - Planilha de dados da réplica 09 (10/11/2020).

| RÉPLICA 09 | | Volume: 100 litros | | | Tipo: Indireto | | Ventilação: Forçada | |
|-------------------|--------------|--------------------|------------------------------|----------------|--------------------------|----------------|----------------------|----------------------|
| | | Horário | R_{ad} [W/m ²] | T_{amb} [°C] | T_{scol}/T_{ecam} [°C] | T_{cam} [°C] | ΔT_{col} [K] | ΔT_{cam} [K] |
| 10/11/2020 | 10:30 | --- | 32,7 | 54,0 | 50,0 | 21,3 | -4,1 | |
| | 11:00 | 953,9 | 33,9 | 55,8 | 51,1 | 21,9 | -4,7 | |
| | 11:30 | --- | 34,5 | 59,9 | 52,7 | 25,4 | -7,1 | |
| | 12:00 | 942,5 | 34,4 | 61,6 | 53,9 | 27,2 | -7,7 | |
| | 12:30 | --- | 33,7 | 60,5 | 53,1 | 26,8 | -7,4 | |
| | 13:00 | 946,2 | 33,1 | 60,5 | 53,1 | 27,4 | -7,5 | |
| | 13:30 | --- | 32,3 | 55,0 | 49,2 | 22,7 | -5,7 | |
| | 14:00 | 865,2 | 31,3 | 53,1 | 47,6 | 21,8 | -5,5 | |
| | MÉDIA | | 927,00 | 33,2 | 57,5 | 51,3 | 24,3 | -6,2 |

Fonte: Próprio autor.

APÊNDICE C
DADOS DOS EXPERIMENTOS DE SECAGEM DE ABACAXI

Tabela C.1 - Planilha de dados obtidos no experimento de secagem de abacaxi realizado nos dias 06 e 07 de dezembro de 2020 [EXP1].

| Data | Horário | Tempo [min] | Rad [W/m ²] | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | v _{ar} (m/s) | m [g] | m _{H₂O} [g] | m _{ms} [g] | X _{bs} [$\frac{m_{H_2O}}{m_{ms}}$] | X _{bu} [$\frac{m_{H_2O}}{m}$] | RU | |
|--------------|------------|-------------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|-------|---------------------------------|---------------------|---|--|--------|--------|
| 06/12/2020 | 08:00 | 0 | 516,4 | 28,4 | 42,8 | 46,4 | 41,7 | 0,3 | 482,9 | 412,4 | 70,5 | 5,85 | 85,40 | 1,0000 | |
| | 09:00 | 60 | 728,0 | 30,2 | 43,7 | 48,7 | 42,3 | 0,3 | 426,4 | 355,9 | 70,5 | 5,05 | 83,47 | 0,8594 | |
| | 10:00 | 120 | 933,5 | 31,9 | 53,9 | 59,7 | 50,2 | 0,3 | 374,7 | 304,2 | 70,5 | 4,31 | 81,18 | 0,7307 | |
| | 11:00 | 180 | 1031,6 | 33,6 | 58,5 | 62,6 | 50,5 | 0,4 | 328,6 | 258,1 | 70,5 | 3,66 | 78,54 | 0,6160 | |
| | 12:00 | 240 | 1109,5 | 34,1 | 62,1 | 65,3 | 51,2 | 0,4 | 287,9 | 217,4 | 70,5 | 3,08 | 75,51 | 0,5147 | |
| | 13:00 | 300 | 886,1 | 35,0 | 60,8 | 62,0 | 47,6 | 0,3 | 252,1 | 181,6 | 70,5 | 2,58 | 72,03 | 0,4256 | |
| | 14:00 | 360 | 575,1 | 31,1 | 54,5 | 58,1 | 45,6 | 0,3 | 222,8 | 152,3 | 70,5 | 2,16 | 68,36 | 0,3527 | |
| | 15:00 | 420 | 505,8 | 34,4 | 52,6 | 55,4 | 44,3 | 0,3 | 197,6 | 127,1 | 70,5 | 1,80 | 64,32 | 0,2900 | |
| | 16:00 | 480 | 282,7 | 30,2 | 48,2 | 51,2 | 43,1 | 0,2 | 176,9 | 106,4 | 70,5 | 1,51 | 60,15 | 0,2385 | |
| | 07/12/2020 | 08:00 | 480 | 263,2 | 27,1 | 40,8 | 45,1 | 40,3 | 0,2 | 176,4 | 105,9 | 70,5 | 1,50 | 60,03 | 0,2372 |
| | | 09:00 | 540 | 770,5 | 30,1 | 46,5 | 51,3 | 44,6 | 0,3 | 158,0 | 87,5 | 70,5 | 1,24 | 55,38 | 0,1914 |
| | | 10:00 | 600 | 856,3 | 32,2 | 52,2 | 58,2 | 50,2 | 0,3 | 141,3 | 70,8 | 70,5 | 1,00 | 50,10 | 0,1499 |
| | | 11:00 | 660 | 1029,9 | 33,4 | 56,3 | 59,4 | 50,7 | 0,4 | 126,6 | 56,1 | 70,5 | 0,80 | 44,31 | 0,1133 |
| | | 12:00 | 720 | 960,5 | 35,8 | 58,2 | 61,8 | 51,0 | 0,3 | 114,6 | 44,1 | 70,5 | 0,63 | 38,48 | 0,0834 |
| | | 13:00 | 780 | 970,2 | 36,4 | 60,7 | 62,4 | 51,2 | 0,3 | 104,9 | 34,4 | 70,5 | 0,49 | 32,79 | 0,0593 |
| | | 14:00 | 840 | 715,4 | 34,6 | 53,8 | 59,6 | 49,1 | 0,3 | 97,3 | 26,8 | 70,5 | 0,38 | 27,54 | 0,0404 |
| 15:00 | | 900 | 429,7 | 34,4 | 53,7 | 57,4 | 48,0 | 0,2 | 92,5 | 22,0 | 70,5 | 0,31 | 23,78 | 0,0284 | |
| 16:00 | | 960 | 253,8 | 33,6 | 50,8 | 56,6 | 47,5 | 0,2 | 89,6 | 19,1 | 70,5 | 0,27 | 21,31 | 0,0212 | |
| MÉDIA | | | 712,1 | 32,6 | 52,8 | 56,7 | 47,2 | 0,3 | | | | | | | |

Fonte: Próprio autor.

Tabela C.2 - Planilha de dados obtidos no experimento de secagem de abacaxi realizado nos dias 11 e 12 de dezembro de 2020 [EXP2].

| Data | Horário | Tempo [min] | Rad [W/m ²] | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | v _{ar} (m/s) | m [g] | m _{H₂O} [g] | m _{ms} [g] | X _{bs} [$\frac{m_{H_2O}}{m_{ms}}$] | X _{bu} [$\frac{m_{H_2O}}{m}$] | RU | |
|--------------|------------|-------------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|-------|---------------------------------|---------------------|---|--|--------|--------|
| 11/12/2020 | 08:00 | 0 | 557,8 | 28,0 | 42,5 | 46,3 | 41,3 | 0,3 | 453,4 | 387,2 | 66,2 | 5,85 | 85,40 | 1,0000 | |
| | 09:00 | 60 | 788,4 | 29,7 | 43,2 | 48,5 | 41,7 | 0,3 | 416,1 | 349,9 | 66,2 | 5,29 | 84,09 | 0,9011 | |
| | 10:00 | 120 | 941,5 | 31,9 | 52,7 | 58,4 | 49,0 | 0,3 | 375,3 | 309,1 | 66,2 | 4,67 | 82,36 | 0,7930 | |
| | 11:00 | 180 | 1041,3 | 34,0 | 57,6 | 61,6 | 49,7 | 0,4 | 346,0 | 279,8 | 66,2 | 4,23 | 80,87 | 0,7153 | |
| | 12:00 | 240 | 1053,9 | 34,6 | 59,5 | 62,5 | 49,5 | 0,4 | 316,9 | 250,7 | 66,2 | 3,79 | 79,11 | 0,6382 | |
| | 13:00 | 300 | 983,2 | 35,9 | 62,9 | 64,2 | 48,6 | 0,3 | 268,4 | 202,2 | 66,2 | 3,05 | 75,34 | 0,5096 | |
| | 14:00 | 360 | 879,6 | 37,7 | 59,4 | 62,9 | 50,8 | 0,3 | 243,2 | 177,0 | 66,2 | 2,67 | 72,78 | 0,4428 | |
| | 15:00 | 420 | 697,7 | 37,0 | 56,5 | 59,7 | 47,2 | 0,3 | 217,6 | 151,4 | 66,2 | 2,29 | 69,58 | 0,3750 | |
| | 16:00 | 480 | 454,5 | 36,6 | 51,8 | 54,5 | 47,2 | 0,2 | 197,8 | 131,6 | 66,2 | 1,99 | 66,53 | 0,3225 | |
| | 12/12/2020 | 08:00 | 480 | 588,0 | 27,5 | 40,7 | 45,1 | 40,2 | 0,3 | 198,1 | 131,9 | 66,2 | 1,99 | 66,58 | 0,3233 |
| | | 09:00 | 540 | 259,0 | 27,7 | 42,7 | 47,4 | 40,9 | 0,2 | 167,7 | 101,5 | 66,2 | 1,53 | 60,53 | 0,2427 |
| | | 10:00 | 600 | 270,6 | 27,9 | 47,1 | 53,1 | 45,1 | 0,2 | 147,0 | 80,8 | 66,2 | 1,22 | 54,97 | 0,1879 |
| | | 11:00 | 660 | 441,6 | 29,0 | 48,7 | 51,4 | 43,7 | 0,2 | 129,2 | 63,0 | 66,2 | 0,95 | 48,76 | 0,1407 |
| | | 12:00 | 720 | 448,0 | 27,5 | 48,5 | 52,0 | 41,5 | 0,2 | 118,3 | 52,1 | 66,2 | 0,79 | 44,04 | 0,1118 |
| | | 13:00 | 780 | 786,4 | 32,3 | 53,1 | 54,6 | 44,6 | 0,3 | 101,1 | 34,9 | 66,2 | 0,53 | 34,52 | 0,0662 |
| | | 14:00 | 840 | 855,7 | 35,1 | 56,7 | 63,5 | 51,2 | 0,3 | 94,9 | 28,7 | 66,2 | 0,43 | 30,25 | 0,0498 |
| 15:00 | | 900 | 668,4 | 35,2 | 54,3 | 58,1 | 48,4 | 0,3 | 89,7 | 23,5 | 66,2 | 0,36 | 26,20 | 0,0360 | |
| 16:00 | | 960 | 389,0 | 35,1 | 52,7 | 58,9 | 49,1 | 0,2 | 87,0 | 20,8 | 66,2 | 0,31 | 23,91 | 0,0288 | |
| MÉDIA | | | 672,5 | 32,4 | 51,7 | 55,7 | 46,1 | 0,3 | | | | | | | |

Fonte: Próprio autor.

Tabela C.3 - Planilha de dados obtidos no experimento de secagem de abacaxi realizado nos dias 15 e 16 de dezembro de 2020 [EXP3].

| Data | Horário | Tempo [min] | Rad [W/m ²] | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | v _{ar} (m/s) | m [g] | m _{H₂O} [g] | m _{ms} [g] | X _{bs} [$\frac{m_{H_2O}}{m_{ms}}$] | X _{bu} [$\frac{m_{H_2O}}{m}$] | RU | |
|--------------|------------|-------------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|-------|---------------------------------|---------------------|---|--|--------|--------|
| 15/12/2020 | 08:00 | 0 | 538,9 | 29,1 | 45,6 | 49,5 | 44,4 | 0,3 | 443,6 | 378,8 | 64,8 | 5,85 | 85,40 | 1,0000 | |
| | 09:00 | 60 | 753,9 | 30,6 | 46,1 | 51,4 | 44,6 | 0,3 | 378,1 | 313,3 | 64,8 | 4,84 | 82,87 | 0,8226 | |
| | 10:00 | 120 | 920,0 | 31,7 | 55,1 | 61,0 | 51,4 | 0,3 | 335,5 | 270,7 | 64,8 | 4,18 | 80,70 | 0,7071 | |
| | 11:00 | 180 | 1014,6 | 34,6 | 61,0 | 65,1 | 52,9 | 0,4 | 293,1 | 228,3 | 64,8 | 3,53 | 77,90 | 0,5923 | |
| | 12:00 | 240 | 1000,6 | 35,5 | 62,6 | 65,6 | 52,5 | 0,4 | 247,6 | 182,8 | 64,8 | 2,82 | 73,84 | 0,4690 | |
| | 13:00 | 300 | 912,5 | 36,0 | 64,6 | 65,9 | 50,6 | 0,3 | 215,8 | 151,0 | 64,8 | 2,33 | 69,99 | 0,3829 | |
| | 14:00 | 360 | 916,4 | 37,8 | 64,2 | 68,1 | 54,6 | 0,3 | 185,7 | 120,9 | 64,8 | 1,87 | 65,12 | 0,3013 | |
| | 15:00 | 420 | 692,4 | 37,3 | 60,1 | 63,4 | 50,2 | 0,3 | 162,2 | 97,4 | 64,8 | 1,50 | 60,07 | 0,2376 | |
| | 16:00 | 480 | 351,6 | 37,2 | 51,3 | 53,5 | 47,7 | 0,2 | 145,1 | 80,3 | 64,8 | 1,24 | 55,36 | 0,1913 | |
| | 16/12/2020 | 08:00 | 480 | 408,1 | 28,2 | 39,1 | 42,3 | 38,8 | 0,2 | 145,9 | 81,1 | 64,8 | 1,25 | 55,61 | 0,1935 |
| | | 09:00 | 540 | 576,4 | 30,0 | 43,5 | 47,1 | 42,0 | 0,3 | 130,8 | 66,0 | 64,8 | 1,02 | 50,49 | 0,1526 |
| | | 10:00 | 600 | 763,6 | 32,3 | 51,7 | 57,2 | 49,9 | 0,3 | 118,0 | 53,2 | 64,8 | 0,82 | 45,11 | 0,1179 |
| | | 11:00 | 660 | 792,5 | 32,7 | 51,8 | 54,2 | 47,4 | 0,3 | 107,8 | 43,0 | 64,8 | 0,66 | 39,92 | 0,0903 |
| | | 12:00 | 720 | 1078,9 | 34,1 | 61,4 | 65,6 | 53,0 | 0,4 | 100,9 | 36,1 | 64,8 | 0,56 | 35,81 | 0,0716 |
| | | 13:00 | 780 | 950,6 | 35,4 | 61,2 | 62,9 | 51,5 | 0,3 | 95,4 | 30,6 | 64,8 | 0,47 | 32,11 | 0,0567 |
| | | 14:00 | 840 | 820,2 | 36,3 | 60,3 | 67,2 | 54,7 | 0,3 | 90,5 | 25,7 | 64,8 | 0,40 | 28,44 | 0,0434 |
| 15:00 | | 900 | 589,6 | 34,2 | 53,9 | 57,5 | 48,4 | 0,3 | 86,4 | 21,6 | 64,8 | 0,33 | 25,04 | 0,0323 | |
| 16:00 | 960 | 332,2 | 33,0 | 50,7 | 56,3 | 47,5 | 0,2 | 84,1 | 19,3 | 64,8 | 0,30 | 22,99 | 0,0261 | | |
| MÉDIA | | | 745,2 | 33,7 | 54,7 | 58,5 | 49,0 | 0,3 | | | | | | | |

Fonte: Próprio autor.

Tabela C.4 - Planilha de dados obtidos no experimento de secagem de abacaxi realizado nos dias 21 e 22 de dezembro de 2020 [EXP4].

| Data | Horário | Tempo [min] | Rad [W/m ²] | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | v _{ar} (m/s) | m [g] | m _{H₂O} [g] | m _{ms} [g] | X _{bs} [$\frac{m_{H_2O}}{m_{ms}}$] | X _{bu} [$\frac{m_{H_2O}}{m}$] | RU | |
|--------------|------------|-------------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|-------|---------------------------------|---------------------|---|--|--------|--------|
| 21/12/2020 | 08:00 | 0 | 535,8 | 28,2 | 44,3 | 48,1 | 43,1 | 0,3 | 384,7 | 328,5 | 56,2 | 5,85 | 85,40 | 1,0000 | |
| | 09:00 | 60 | 762,6 | 30,9 | 46,2 | 51,6 | 44,7 | 0,3 | 339,5 | 283,3 | 56,2 | 5,04 | 83,46 | 0,8588 | |
| | 10:00 | 120 | 900,6 | 32,9 | 55,4 | 61,2 | 51,8 | 0,3 | 298,3 | 242,1 | 56,2 | 4,31 | 81,17 | 0,7301 | |
| | 11:00 | 180 | 995,1 | 34,4 | 59,8 | 63,9 | 51,9 | 0,3 | 259,4 | 203,2 | 56,2 | 3,62 | 78,35 | 0,6086 | |
| | 12:00 | 240 | 1040,0 | 35,8 | 63,5 | 66,6 | 53,1 | 0,4 | 227,2 | 171,0 | 56,2 | 3,05 | 75,28 | 0,5080 | |
| | 13:00 | 300 | 1002,1 | 36,2 | 67,1 | 68,5 | 51,8 | 0,4 | 202,8 | 146,6 | 56,2 | 2,61 | 72,30 | 0,4318 | |
| | 14:00 | 360 | 888,1 | 36,6 | 61,7 | 65,4 | 52,5 | 0,3 | 182,6 | 126,4 | 56,2 | 2,25 | 69,24 | 0,3687 | |
| | 15:00 | 420 | 724,9 | 37,1 | 60,5 | 63,9 | 50,3 | 0,3 | 163,2 | 107,0 | 56,2 | 1,91 | 65,58 | 0,3080 | |
| | 16:00 | 480 | 428,4 | 36,2 | 53,1 | 55,8 | 48,6 | 0,2 | 144,7 | 88,5 | 56,2 | 1,58 | 61,18 | 0,2503 | |
| | 22/12/2020 | 08:00 | 480 | 556,0 | 27,9 | 42,4 | 46,8 | 41,9 | 0,2 | 143,8 | 87,6 | 56,2 | 1,56 | 60,94 | 0,2474 |
| | | 09:00 | 540 | 765,4 | 30,2 | 47,7 | 52,5 | 45,7 | 0,3 | 128,9 | 72,7 | 56,2 | 1,29 | 56,43 | 0,2009 |
| | | 10:00 | 600 | 921,3 | 31,7 | 54,6 | 61,3 | 52,4 | 0,3 | 114,7 | 58,5 | 56,2 | 1,04 | 51,03 | 0,1565 |
| | | 11:00 | 660 | 1019,8 | 33,4 | 57,5 | 60,6 | 51,8 | 0,3 | 102,2 | 46,0 | 56,2 | 0,82 | 45,04 | 0,1175 |
| | | 12:00 | 720 | 998,6 | 33,9 | 58,7 | 62,6 | 51,0 | 0,3 | 91,1 | 34,9 | 56,2 | 0,62 | 38,35 | 0,0828 |
| | | 13:00 | 780 | 999,5 | 35,6 | 62,2 | 64,0 | 52,2 | 0,3 | 82,6 | 26,4 | 56,2 | 0,47 | 32,00 | 0,0563 |
| | | 14:00 | 840 | 630,2 | 35,5 | 53,6 | 58,8 | 49,4 | 0,3 | 75,9 | 19,7 | 56,2 | 0,35 | 26,00 | 0,0353 |
| 15:00 | | 900 | 473,4 | 34,8 | 50,3 | 53,0 | 45,9 | 0,3 | 72,6 | 16,4 | 56,2 | 0,29 | 22,64 | 0,0250 | |
| 16:00 | 960 | 167,4 | 34,5 | 54,9 | 61,4 | 51,1 | 0,3 | 70,7 | 14,5 | 56,2 | 0,26 | 20,56 | 0,0191 | | |
| MÉDIA | | | 767,2 | 33,7 | 55,2 | 59,2 | 49,4 | 0,3 | | | | | | | |

Fonte: Próprio autor.