



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

**DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA
DE SECAGEM SOLAR COM UNIDADE DESSECANTE
INTEGRADA**

MARIA DE SOUSA LEITE FILHA

CAMPINA GRANDE - PB

2021

MARIA DE SOUSA LEITE FILHA

**DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA
DE SECAGEM SOLAR COM UNIDADE DESSECANTE
INTEGRADA**

Tese 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 Doutora em Engenharia de Processos.

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

Campina Grande - PB

2021

L533d Leite Filha, Maria de Sousa.
Desenvolvimento experimental de um sistema de secagem solar com unidade dessecante integrada / Maria de Sousa Leite Filha. – Campina Grande, 2021.
259 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. Secagem Solar. 3. Planejamento Experimental Fatorial. 4. Unidade Dessecante. I. Grilo, Marcelo Bezerra. II. Título.

CDU 551.521.37(043)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE
MARIA DE SOUSA LEITE FILHA, APRESENTADA AO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA
GRANDE.

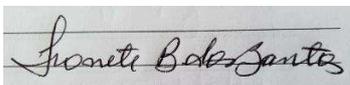
Tese de doutorado apresentada e aprovada em 07 de outubro de 2021.



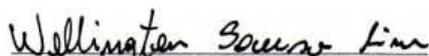
Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo
Orientador – UFCG



Profa. Dra. Rosilda Sousa Santos
Examinadora externa – UFERSA



Ivonete Batista dos Santos
Examinadora externa – UEPB



Prof. Dr. Wellington Sousa Lima
Examinador externo – UFCG



Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima
Examinador interno – UFCG

Campina Grande - PB

2021

DEDICATÓRIA

À família Sousa Barros: Beatriz, Letícia, Michel e Bob Marley.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas, entidades e Instituições às quais presto minha homenagem:

A Deus, pelo dom da vida.

A mim mesma, por ter tomado as rédeas da minha vida e nunca ter desistido.

Ao meu orientador, Dr. Marcelo Grilo, que me mostrou os caminhos a serem seguidos, ensinando-me e guiando-me com muita sabedoria e dedicação.

Ao meu companheiro, Michel Barros, pelo incentivo e participação ativa na construção dos equipamentos e realização dos testes experimentais.

Às minhas filhas, Beatriz e Letícia, que, mesmo sem entender exatamente o que estava acontecendo, foram meus motivos e força para seguir em frente.

À minha família, mãe, pai, sogra, sogro, irmãos e cunhados que me ajudaram com as meninas para que eu pudesse estudar.

Ao Dr. Diego Barros, que tanto me ajudou na programação do SMAD.

Aos colegas do GEDS/LEMT/UFCG, que me ajudaram com infinitas dúvidas de termodinâmica na realização dos experimentos de secagem. Em especial, à minha querida amiga que levarei para a vida, Nancy Lima.

Ao professor e coordenador do programa de pós-graduação em Engenharia de Processos, Dr. Antônio Gilson Barbosa de Lima, por sua solicitude e atenção para com os doutorandos.

À UACTA/CCTA/UFCG, pela liberação integral das atividades para cursar o doutorado.

Ao professor e colega Dr. Stelio Braga, pela disponibilidade em ajudar e por ceder o laboratório de carnes e pescados da UATA, para a determinação da massa seca das amostras de banana.

*Beatriz e Letícia: amor de janeiro
a janeiro. Até o mundo acabar!*

RESUMO

Estudos sobre a secagem de alimentos vêm sendo desenvolvidos em todo mundo, já que o processo de secagem tradicional em estufa demanda grandes investimentos e alto consumo de energia elétrica, elevando o custo do produto final e dificultando seu acesso aos produtores rurais locais. Neste sentido, a secagem solar em equipamentos construídos com materiais de baixo custo, facilmente encontrados no comércio local e cuja operação e manutenção possam ser executadas sem necessidade de ações de elevada complexidade, torna-se uma tecnologia apropriada para a agricultura familiar. Dessa forma, este trabalho foi realizado com o objetivo de analisar a influência do pré-tratamento do ar de secagem num sistema de secagem solar de exposição indireta, com unidade dessecante integrada, desenvolvido e testado na produção de banana passa. Foi utilizado o planejamento experimental fatorial na determinação das configurações otimizadas para a unidade dessecante e para o coletor solar. Foram realizados testes de secagem no sistema de secagem com unidade dessecante e no sistema sem unidade dessecante, nas cidades de Campina Grande e Pombal, ambas localizadas no estado da Paraíba, contemplando também as condições meteorológicas e climáticas dos períodos de primavera/verão e outono/inverno. Os resultados experimentais determinaram como sendo a configuração otimizada para a unidade dessecante: volume interno de 24 litros, duas bandejas para depósito do dessecante e velocidade do ar por convecção forçada de 2 m/s. Para o coletor solar, foram obtidos: Cobertura transparente de policarbonato alveolar e utilização de uma telha de zinco pintada de preto fosco, usada como capacitor térmico. O tempo médio de secagem, no sistema com unidade dessecante, foi de 712 minutos (12 horas); e, no sistema sem unidade dessecante, foi de 840 minutos (14 horas). Os rendimentos térmicos médios foram de 34% e 28% para o sistema com unidade dessecante e sem unidade dessecante, respectivamente. Foram ajustados os modelos empíricos de Page e de Midilli *et al.* aos dados experimentais de cinética de secagem. Obteve-se o coeficiente de correlação médio de 99,73% e 99,76%, no sistema com e sem unidade dessecante, respectivamente, para o modelo de Page e coeficiente de correção médio de 99,76% e 99,77%, no sistema com e sem unidade dessecante, respectivamente, para o modelo de Midilli *et al.* Foi possível observar o protagonismo do uso da sílica gel como dessecante do ar de secagem em ambientes com temperaturas mais amenas e umidades relativas mais elevadas.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Solar. Secagem solar. Planejamento Experimental Fatorial. Unidade dessecante.

ABSTRACT

Studies on food drying have been developed around the world, since the traditional drying process in a greenhouse requires large investments and high electricity consumption, increasing the cost of the final product and making it difficult for local rural producers to access it. In this sense, solar drying in equipment built with low-cost materials, easily found in local businesses and whose operation and maintenance can be performed without the need for highly complex actions, becomes an appropriate technology for family farming. Thus, this work was carried out with the objective of analyzing the influence of pre-treatment of the drying air in an indirect solar drying system with an integrated desiccant unit, developed and tested in the production of dried bananas. Factorial experimental design was used to determine the optimized settings for the desiccant unit and for the solar collector. Drying tests were carried out in the drying system with desiccant unit and in the system without desiccant unit, in the cities of Campina Grande and Pombal, both located in the state of Paraíba, also contemplating the meteorological and climatic conditions of the periods of spring/summer and autumn/ Winter. The experimental results determined as the optimal configuration for the desiccant unit: internal volume of 24 liters, two trays for depositing the desiccant and air velocity by forced convection of 2 m/s. For the solar collector, the following were obtained: Transparent alveolar polycarbonate cover and use of a matte black painted zinc tile, used as a thermal capacitor. The average drying time, in the system with desiccant unit, was 712 minutes (12 hours); and, in the system without desiccant unit, it was 840 minutes (14 hours). The average thermal yields were 34% and 28% for the system with desiccant unit and without desiccant unit, respectively. The empirical models of Page and Midilli et al. to experimental data of drying kinetics. The average correlation coefficient of 99.73% and 99.76% was obtained, in the system with and without desiccant unit, respectively, for the Page model and average correction coefficient of 99.76% and 99.77%, in the system with and without desiccant unit, respectively, for the model by Midilli et al. It was possible to observe the protagonism of the use of silica gel as a drying air desiccant in environments with milder temperatures and higher relative humidity.

KEYWORDS: Solar Energy. Solar drying. Factorial Experimental Planning. Desiccant unit.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO II

Figura 2.1	Curvas de secagem.	37
Figura 2.2	Saturação do ar.	42
Figura 2.3	Carta psicrométrica.	42
Figura 2.4	Estado termodinâmico do ar	43
Figura 2.5	Processos e estados termodinâmicos do ar de secagem.	43
Figura 2.6	Fluxograma de classificação dos secadores.	45
Figura 2.7	Representação esquemática da classificação dos secadores solares	47
Figura 2.8	Secador solar desenvolvido na Universidade Federal do Sergipe.	48
Figura 2.9	Protótipo de secador solar de exposição direta – GEDS/LEMT/UFCG.	48
Figura 2.10	Protótipo de secador solar de exposição indireta – GEDS/LEMT/UFCG.	49
Figura 2.11	Processo de interação entre o adsorbato e o adsorvente.	50
Figura 2.12	Adsorção, reativação e resfriamento.	51
Figura 2.13	Representação da cadeia molecular da sílica gel.	52
Figura 2.14	Secador solar otimizado desenvolvido por Gomes, 2021.	55
Figura 2.15	Projetos dos secadores solares desenvolvidos por Fernandes, 2021.	56
Figura 2.16	Sistemas de secagem solar desenvolvidos por Costa et al., 2021.	57
Figura 2.17	Movimento de translação e inclinação da Terra.	61
Figura 2.18	Modelo geral de um sistema de transformação.	62
Figura 2.19	Distribuição de patentes por países.	65
Figura 2.20	<i>Musa spp</i> (banana).	67

CAPÍTULO III

Figura 3.1	Entrada da UFCG e edifício Júlio Goldfarb (sede do LEMT).	74
-------------------	---	----

Figura 3.2	Entrada principal do <i>Campus</i> da UFCG em Pombal, PB.	74
Figura 3.3	Localização das cidades de Campina Grande e Pombal, PB.	75
Figura 3.4	Arduino Uno, arduino Mega e sensores tipo DHT22.	77
Figura 3.5	SMAD usando o arduino Uno e o arduino Mega.	77
Figura 3.6	Balança digital usada na pesagem de sílica gel.	79
Figura 3.7	Bandeja de tela e estrutura de cantoneiras.	79
Figura 3.8	Anemômetro digital.	81
Figura 3.9	Estrutura interna do coletor solar.	84
Figura 3.10	Coletores solares com cobertura de plástico estufa e de policarbonato.	86
Figura 3.11	Telha de zinco pintada de preto fosco.	86
Figura 3.12	Suporte metálico para um sistema de secagem.	87
Figura 3.13	Desenho esquemático do coletor solar e posição dos sensores.	88
Figura 3.14	Câmara de secagem e sistema exaustor.	89
Figura 3.15	Bandeja na câmara de secagem	89
Figura 3.16	Desenho esquemático do coletor solar e da telha de zinco.	91
Figura 3.17	Desenho esquemático da câmara de secagem.	91
Figura 3.18	Amostras embaladas para continuação do experimento de secagem.	91
Figura 3.19	Desenho esquemático do S _{com} e do S _{sem} com destaque para os posicionamentos dos sensores DHT22.	93
Figura 3.20	Testes de secagem com ambos os sistemas.	94
Figura 3.21	Conexão da unidade dessecante e do coletor solar no S _{com} .	94
Figura 3.22	Fluxograma para obtenção da banana passa.	95
Figura 3.23	Banana <i>in natura</i> utilizada na secagem.	96
Figura 3.24	Cortes e pesagem das bananas para o processo de secagem.	96
Figura 3.25	Desenho esquemático da posição das amostras de banana na bandeja da câmara de secagem.	96
Figura 3.26	Balança digital de precisão.	98
Figura 3.27	Bananas <i>in natura</i> cortadas longitudinalmente e banana passa.	98

Figura 3.28	Estufa com circulação e renovação de ar SL102 e dessecador.	99
Figura 3.29	Representação esquemática do volume de controle para o coletor solar no Scom.	104
Figura 3.30	Representação esquemática do volume de controle para o coletor solar no Ssem.	104
Figura 3.31	Representação esquemática do volume de controle para a câmara de secagem.	105
Figura 3.32	Representação esquemática do volume de controle para o sistema com unidade dessecante.	107
Figura 3.33	Representação esquemática do volume de controle para o sistema sem unidade dessecante.	107
Figura 3.34	Regeneração da sílica gel.	108

CAPÍTULO IV

Figura 4.1	Temperatura e umidade relativa do ar no meio ambiente e na saída da UD1 (experimento 1).	111
Figura 4.2	Temperatura e umidade relativa do ar no meio ambiente e na saída da UD1 (experimento 2).	112
Figura 4.3	Temperatura e umidade relativa do ar no meio ambiente e na saída da UD8 (experimento 1).	115
Figura 4.4	Temperatura e umidade relativa do ar no meio ambiente e na saída da UD8 (experimento 2).	116
Figura 4.5	Sílica gel após um dos experimentos com a UD8 e disposição do dessecante nas bandejas.	116
Figura 4.6	Sílica gel após um dos experimentos com a UD4 e disposição do dessecante nas bandejas.	117
Figura 4.7	Sílica gel antes e após a regeneração.	117
Figura 4.8	Valores observados x valores previstos no planejamento experimental para a unidade dessecante.	119
Figura 4.9	Gráfico de Pareto para a unidade dessecante.	120
Figura 4.10	Superfície de resposta e projeção no plano para o caso 1.	121
Figura 4.11	Superfície de resposta e projeção no plano para o caso 2.	122
Figura 4.12	Superfície de resposta e projeção no plano para o caso 3.	123

Figura 4.13	Superfície de resposta e projeção no plano para o caso 4.	123
Figura 4.14	Superfície de resposta e projeção no plano para o caso 5.	124
Figura 4.15	Superfície de resposta e projeção no plano para o caso 6.	124
Figura 4.16	Superfície de resposta e projeção no plano para o caso 7.	125
Figura 4.17	Superfície de resposta e projeção no plano para o caso 8.	126
Figura 4.18	Superfície de resposta e projeção no plano para o caso 9.	126
Figura 4.19	Desenho esquemático da unidade dessecante otimizada.	128
Figura 4.20	Unidade dessecante desenvolvida e otimizada através do DOE.	129
Figura 4.21	Valores observados x valores previstos para o planejamento experimental fatorial para o coletor solar.	136
Figura 4.22	Gráfico de Pareto para o coletor solar.	137
Figura 4.23	Superfície de resposta e projeção no plano para o coletor solar.	138
Figura 4.24	Posição dos sensores de temperatura e umidade relativa do ar.	140
Figura 4.25	Decaimento da massa da banana durante os experimentos ECG1com e ECG1sem.	144
Figura 4.26	Temperaturas do ar no sistema de secagem solar no experimento ECG1com.	144
Figura 4.27	Temperaturas do ar no sistema de secagem solar no experimento ECG1sem.	145
Figura 4.28	Umidades relativas do ar no sistema de secagem no experimento ECG1com.	146
Figura 4.29	Umidades relativas do ar no sistema de secagem no experimento ECG1sem.	147
Figura 4.30	Média da irradiação solar na realização de ECG1com e ECG1sem.	148
Figura 4.31	Dados termodinâmicos dos experimentos ECG1com e ECG1sem obtidos pelo CATT para os coletores solares.	149
Figura 4.32	Dados termodinâmicos dos experimentos ECG1com e ECG1sem obtidos pelo CATT para as câmaras de secagem.	151
Figura 4.33	Ilustração do processo de secagem na carta psicrométrica para o experimento ECG1com.	153
Figura 4.34	Ilustração do processo de secagem na carta psicrométrica para o experimento ECG1sem.	154
Figura 4.35	Ajuste dos modelos de Page e Midilli <i>et al.</i> para ECG1com.	156

Figura 4.36	Ajuste dos modelos de Page e Midilli <i>et al.</i> para ECG1sem.	156
Figura 4.37	Decaimento da massa da banana durante os experimentos EPM1com e EPM1sem.	160
Figura 4.38	Temperaturas do ar no sistema de secagem solar no experimento EPM1com.	161
Figura 4.39	Temperaturas do ar no sistema de secagem solar no experimento EPM1sem.	162
Figura 4.40	Umidades relativas do ar no sistema de secagem no experimento EPM1com.	163
Figura 4.41	Umidades relativas do ar no sistema de secagem no experimento EPM1sem.	164
Figura 4.42	Média da irradiação solar na realização de EPM1com e EPM1sem.	165
Figura 4.43	Dados termodinâmicos dos experimentos EPM1com e EPM1sem obtidos pelo CATT.	166
Figura 4.44	Ilustração do processo de secagem na carta psicrométrica para o experimento EPM1com.	168
Figura 4.45	Ilustração do processo de secagem na carta psicrométrica para o experimento EPM1sem.	169
Figura 4.46	Ajuste dos modelos de Page e Midilli <i>et al.</i> para EPM1com.	171
Figura 4.47	Ajuste dos modelos de Page e Midilli <i>et al.</i> para EPM1sem.	171
Figura 4.48	Decaimento da massa da banana durante os experimentos EPM3com e EPM3sem.	175
Figura 4.49	Temperaturas do ar no sistema de secagem solar no experimento EPM3com.	176
Figura 4.50	Temperaturas do ar no sistema de secagem solar no experimento EPM3sem.	177
Figura 4.51	Umidades relativas do ar no sistema de secagem solar no experimento EPM3com.	178
Figura 4.52	Umidades relativas do ar no sistema de secagem solar no experimento EPM3sem.	179
Figura 4.53	Média da irradiação solar na realização de EPM3com e EPM3sem.	180
Figura 4.54	Dados termodinâmicos dos experimentos EPM3com e EPM3sem obtidos pelo CATT.	181
Figura 4.55	Ilustração do processo de secagem na carta psicrométrica para o experimento EPM3com.	183
Figura 4.56	Ilustração do processo de secagem na carta psicrométrica para o experimento EPM3sem.	184

Figura 4.57	Ajuste dos modelos de Page e Midilli <i>et al.</i> para EPM3com.	186
Figura 4.58	Ajuste dos modelos de Page e Midilli <i>et al.</i> para EPM3sem.	186
Figura 4.59	Decaimento da massa da banana durante os experimentos ECG3com e ECG3sem.	190
Figura 4.60	Temperaturas do ar no sistema de secagem solar no experimento ECG3com.	190
Figura 4.61	Temperaturas do ar no sistema de secagem solar no experimento ECG3sem.	191
Figura 4.62	Umidade relativa do ar no sistema de secagem solar no experimento ECG3com.	192
Figura 4.63	Umidades relativas do ar no sistema de secagem solar no experimento ECG3sem.	193
Figura 4.64	Média da irradiação solar na realização de ECG3com e ECG3sem.	194
Figura 4.65	Dados termodinâmicos dos experimentos ECG3com e ECG3sem obtidos pelo CATT.	195
Figura 4.66	Ilustração do processo de secagem na carta psicrométrica para experimento ECG3com.	197
Figura 4.67	Ilustração do processo de secagem na carta psicrométrica para o experimento ECG3sem.	198
Figura 4.68	Ajuste dos modelos de Page e Midilli <i>et al.</i> para ECG3com.	200
Figura 4.69	Ajuste dos modelos de Page e Midilli <i>et al.</i> para ECG3sem.	200

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

Tabela 2.1	Alguns modelos matemáticos de cinética de secagem.	38
Tabela 2.2	Registros de patentes.	64

CAPÍTULO III

Tabela 3.1	Identificação dos experimentos de secagem.	73
Tabela 3.2	Modelo de matriz do planejamento experimental codificada para a unidade dessecante.	81
Tabela 3.3	Principais características construtivas do coletor solar.	83
Tabela 3.4	Modelo de matriz do planejamento experimental codificada para o coletor solar.	85
Tabela 3.5	Principais características construtivas dos sistemas de secagem solar.	90
Tabela 3.6	Modelo de tabela de decaimento de massa da banana.	97

CAPÍTULO IV

Tabela 4.1	Resumo de dados dos experimentos com a Unidade dessecante 1.	111
Tabela 4.2	Resumo dos dados dos experimentos com as unidades dessecantes 1, 2, 3 e 4.	113
Tabela 4.3	Resumo dos dados dos experimentos com as unidades dessecantes 5, 6, 7 e 8.	114
Tabela 4.4	Resumo de dados dos experimentos com a Unidade dessecante 8.	115
Tabela 4.5	Matriz do planejamento experimental codificada para a unidade dessecante.	118
Tabela 4.6	Tabela ANOVA para a unidade dessecante.	127
Tabela 4.7	Média e coeficiente de variação dos experimentos.	130
Tabela 4.8	Resumo de dados dos experimento realizados com o coletor solar 3.	130

Tabela 4.9	Valor da temperatura (°C) média no coletor solar 3.	131
Tabela 4.10	Valor da umidade relativa (%) média no coletor solar 3.	131
Tabela 4.11	Resumo dos dados dos experimentos com coletores solares 1, 2, 3 e 4.	132
Tabela 4.12	Resumo de dados dos experimentos realizados com o coletor solar 4.	133
Tabela 4.13	Valor da temperatura (°C) média no coletor solar 4.	134
Tabela 4.14	Valor da umidade relativa (%) média no coletor solar 4.	134
Tabela 4.15	Matriz do planejamento experimental codificada para o coletor solar.	135
Tabela 4.16	Tabela ANOVA para o coletor solar.	139
Tabela 4.17	Decaimento da massa da banana nos experimentos ECG1com e ECG1sem.	143
Tabela 4.18	Propriedades do ar de secagem para o coletor solar.	150
Tabela 4.19	Propriedades do ar de secagem para a câmara de secagem.	151
Tabela 4.20	Ajuste dos modelos de Page e Midilli <i>et al.</i> aos dados dos Primavera/verão em Campina Grande, PB.	155
Tabela 4.21	Resumo dos dados dos experimentos ECG1com, ECG1sem, ECG2com e ECG1sem.	157
Tabela 4.22	Decaimento da massa da banana nos experimentos EPM1com e EPM1sem.	159
Tabela 4.23	Ajuste dos modelos de Page e Midilli <i>et al.</i> aos dados dos Primavera/verão em Pombal, PB.	170
Tabela 4.24	Resumo dos dados dos experimentos EPM1com, EPM1sem, EPM2com e EPM1sem.	172
Tabela 4.25	Decaimento da massa da banana nos experimentos EPM3com e EPM3sem.	174
Tabela 4.26	Ajuste dos modelos de Page e Midilli <i>et al.</i> aos dados do período outono/inverno em Pombal, PB.	185
Tabela 4.27	Resumo dos dados dos experimentos EPM3com, EPM3sem, EPM4com e EPM4sem.	187
Tabela 4.28	Decaimento da massa da banana nos experimentos ECG3com e ECG3sem.	189
Tabela 4.29	Ajuste dos modelos de Page e Midilli <i>et al.</i> aos dados do período outono/inverno em Campina Grande, PB.	199

Tabela 4.30 Resumo dos dados dos experimentos ECG3com, ECG3sem, ECG4com e ECG4sem.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
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)
ECG1 _{com}	Primeiro experimento realizado em Campina Grande no sistema com unidade dessecante
ECG1 _{sem}	Primeiro experimento realizado em Campina Grande no sistema sem unidade dessecante
ECG2 _{com}	Segundo experimento realizado em Campina Grande no sistema com unidade dessecante
ECG2 _{sem}	Segundo experimento realizado em Campina Grande no sistema sem unidade dessecante
ECG3 _{com}	Terceiro experimento realizado em Campina Grande no sistema com unidade dessecante
ECG3 _{sem}	Terceiro experimento realizado em Campina Grande no sistema sem unidade dessecante
ECG4 _{com}	Quarto experimento realizado em Campina Grande no sistema com unidade dessecante
ECG4 _{sem}	Quarto experimento realizado em Campina Grande no sistema sem unidade dessecante
EPM1 _{com}	Primeiro experimento realizado em Pombal no sistema com unidade dessecante
EPM1 _{sem}	Primeiro experimento realizado em Pombal no sistema sem unidade dessecante
EPM2 _{com}	Segundo experimento realizado em Pombal no sistema com unidade dessecante
EPM2 _{sem}	Segundo experimento realizado em Pombal no sistema sem unidade dessecante
EPM3 _{com}	Terceiro experimento realizado em Pombal no sistema com unidade dessecante
EPM3 _{sem}	Terceiro experimento realizado em Pombal no sistema sem unidade dessecante
EPM4 _{com}	Quarto experimento realizado em Pombal no sistema com unidade dessecante
EPM4 _{sem}	Quarto experimento realizado em Pombal no sistema sem unidade dessecante
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i> (Organização da Agricultura e Alimentação)

GEDS	Grupo de Pesquisa em Energia e Desenvolvimento Sustentável
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial
LEMT	Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas
SMAD	Sistema de medição e aquisição de dados
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
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)

NOMENCLATURA

A_t	Área de transferência de calor	m^2
c_p	Calor específico do fluido de trabalho	$J/kg^\circ C$
EC_e	Energia cinética na entrada do volume de controle	J
EC_s	Energia cinética na saída do volume de controle	J
EP_e	Energia potencial na entrada do volume de controle	J
EP_s	Energia potencial na saída do volume de controle	J
g	Aceleração gravitacional	m/s^2
h	Entalpia	kJ/kg
h_e	Entalpia na entrada do volume de controle	kJ/kg
h_s	Entalpia na saída do volume de controle	kJ/kg
h_v	Entalpia da água saturada como vapor saturado na temperatura média de saída	kJ/kg
\bar{G}	Irradiação solar média incidente	W/m^2
M_a	Massa de água do produto	g
M_s	Massa de matéria seca do produto	g
M_t	Massa total do produto	g
\dot{m}	Vazão mássica do fluido de trabalho	kg/s
\dot{m}_e	Vazão mássica do fluido de trabalho na entrada do volume de controle	kg/s
\dot{m}_s	Vazão mássica do fluido de trabalho na saída do volume de controle	kg/s
$\frac{dQ}{dt}$	Taxa de calor transferido por convecção	W
ΔT	Diferença de temperatura entre a superfície e o fluido	$^\circ C$
h_c	Coeficiente de transferência de calor por convecção	$W/m^2^\circ C$
M_a	Massa de água contida no produto	g
M_s	Massa de matéria seca do produto	g
M_t	Massa total do produto	g

RX	Razão de umidade	-
T	Temperatura do ar	°C
T _a	Temperatura do ar ambiente	°C
T _{eCcom}	Temperatura do ar na entrada do coletor solar do sistema com unidade dessecante	°C
T _{eCsem}	Temperatura do ar na entrada do coletor solar do sistema sem unidade dessecante	°C
T _{eKcom}	Temperatura do ar na entrada da câmara de secagem do sistema com unidade dessecante	°C
T _{eKsem}	Temperatura do ar na entrada da câmara de secagem do sistema sem unidade dessecante	°C
T _{eUD}	Temperatura do ar na entrada da unidade dessecante	°C
T _{sCcom}	Temperatura do ar na saída do coletor solar do sistema com unidade dessecante	°C
T _{sCsem}	Temperatura do ar na saída do coletor solar do sistema sem unidade dessecante	°C
T _{sKcom}	Temperatura do ar na saída da câmara de secagem do sistema com unidade dessecante	°C
T _{sKsem}	Temperatura do ar na saída da câmara de secagem do sistema sem unidade dessecante	°C
T _{sUD}	Temperatura do ar na saída da unidade dessecante	°C
t	Tempo	h ou min
UR	Umidade relativa do ar	%
UR _a	Umidade relativa do ar ambiente	%
UR _{eCcom}	Umidade relativa do ar na entrada do coletor solar do sistema com unidade dessecante	%
UR _{eCsem}	Umidade relativa do ar na entrada do coletor solar do sistema sem unidade dessecante	%
UR _{eKcom}	Umidade relativa do ar na entrada da câmara de secagem do sistema com unidade dessecante	%
UR _{eKsem}	Umidade relativa do ar na entrada da câmara de secagem do sistema sem unidade dessecante	%

UR_{eUD}	Umidade relativa do ar na entrada da unidade dessecante	%
UR_{sCcom}	Umidade relativa do ar na saída do coletor solar do sistema com unidade dessecante	%
UR_{sCsem}	Umidade relativa do ar na saída do coletor solar do sistema sem unidade dessecante	%
UR_{sKcom}	Umidade relativa do ar na saída da câmara de secagem do sistema com unidade dessecante	%
UR_{sKsem}	Umidade relativa do ar na saída da câmara de secagem do sistema sem unidade dessecante	%
UR_{sUD}	Umidade relativa do ar na saída da unidade dessecante	%
X_0	Teor de água inicial do produto	%
X_{bs}	Teor de água em base seca	-
X_{bu}	Teor de água em base úmida	-
X_e	Teor de água de equilíbrio do produto	%
X_t	Teor de água do produto no instante de tempo t	%

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

1	INTRODUÇÃO	28
1.1	Objetivos	31
1.1.1	Objetivo geral	31
1.1.2	Objetivo específicos	31

CAPÍTULO II

2	REVISÃO DA LITERATURA	34
2.1	Princípios da secagem	34
2.1.1	Fases da secagem	36
2.1.2	Modelos matemáticos de cinética de secagem	38
2.1.3	Determinação do teor de água de um produto biológico	39
2.1.4	Psicrometria	41
2.2	Secadores de frutas	44
2.2.1	Tipos de secadores	44
2.2.2	Secadores solares	46
2.3	O processo de adsorção	50
2.3.1	Desumidificação usando dessecantes	50
2.4	O estado da arte para secadores solares	53
2.5	O estado da arte para secadores solares com dessecante	55
2.6	O Sol como fonte de energia	57
2.6.1	Energia solar fototérmica	59
2.6.2	Energia solar fotovoltaica	59

2.6.3	Movimento aparente do Sol	60
2.7	Planejamento experimental [<i>Design of Experiments - DOE</i>]	61
2.8	Prospecção tecnológica	63
2.9	A importância econômica e nutricional das frutas	65
2.9.1	A banana	66
2.9.2	Frutas desidratadas	67

CAPÍTULO III

3	MATERIAIS E MÉTODOS	72
3.1	Caracterização dos locais dos experimentos e dados meteorológicos	74
3.2	Os sistemas de secagem propostos e materiais a serem utilizados	76
3.2.1	Sistema de medição e aquisição de dados - SMAD	76
3.3	Planejamento experimental fatorial proposto	78
3.3.1	Planejamento experimental fatorial para a unidade dessecante	78
3.3.2	Planejamento experimental fatorial para o coletor solar	83
3.3.3	Câmara de secagem e sistema de convecção do ar	88
3.4	Testes de secagem	90
3.5	Frutas	95
3.5.1	Massa seca	99
3.6	Avaliação dos sistemas de secagem	99
3.6.1	Determinação das curvas de secagem	100
3.6.2	Rendimento térmico do equipamento	101
3.7	Regeneração do dessecante sílica gel	107

CAPÍTULO IV

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	110
---	-------------------------	-----

4.1	Ensaaios experimentais para a unidade dessecante	110
4.1.1	Planejamento experimental fatorial para a unidade dessecante	117
4.2	Ensaaios experimentais para o coletor solar	129
4.2.1	Planejamento experimental fatorial para o coletor solar	135
4.3	Análise dos ensaios experimentais de secagem	139
4.3.1	Testes experimentais realizados no período Primavera/Verão de 2020/2021	141
4.3.2	Testes experimentais realizados no período Outono/Inverno de 2021	173

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES		204
REFERÊNCIAS		206
APÊNDICES		213
APÊNDICE A	Especificações do sensor DHT22	213
APÊNDICE B	Tabelas de temperaturas e umidades relativa do ar nos experimentos com as unidades dessecantes 2, 3, 4, 5, 6 e 7	214
APÊNDICE C	Tabela teste F de Snedecor	217
APÊNDICE D	Informações dos experimentos realizados com os coletores 2 e 3	218
APÊNDICE E	Informações dos experimentos realizados no período primavera/verão em Campina Grande e em Pombal, PB	221
APÊNDICE F	Informações dos experimentos realizados no período outono/inverno em Campina Grande e em Pombal, PB	240

Capítulo I
INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

Há cerca de 13,5 bilhões de anos, a energia surgiu juntamente com a matéria, o tempo e o espaço, no que hoje é conhecido como *Big Bang*. O Sol é a fonte primária de energia da Terra e a necessidade de manipulação das fontes de energia como garantia de sobrevivência humana remonta à Pré-história. Desde então, o homem observou, na natureza, formas de energia que lhe permitissem manter, prolongar e tornar mais confortável sua sobrevivência.

Segundo Harari (2014), quase tudo que as pessoas fizeram ao longo da história foi abastecido pela energia solar e, conseqüentemente, a história da humanidade foi dominada também pelos ciclos alternados de energia solar (dia e noite, verão e inverno).

A energia solar alimenta a vida na Terra, sendo responsável pelo ciclo das chuvas que enche as represas das hidrelétricas; pela fotossíntese de plantas como a cana-de-açúcar, que posteriormente, pode ser transformada em energia, na forma de açúcar ou etanol; pela conversão de plantas e animais em combustíveis fósseis e pelos ventos que movem as hélices na geração de energia eólica (GRILO, 2007).

O uso tecnológico de fontes renováveis tem aprimorado o conceito de sustentabilidade e auxiliado a vida do homem no campo. Uma destas tecnologias consiste em utilizar a energia solar térmica em equipamentos apropriados para aquecer o ar ambiente e, então, realizar a secagem de diversos produtos agrícolas, como frutas e hortaliças.

O Brasil é um país de dimensões continentais e está, geograficamente, posicionado numa zona de excepcional disponibilidade de energia solar. Possui áreas com valores de radiação solar comparáveis às melhores do mundo, com destaque para a região Nordeste (CRESESB, 2020). Além disso, a intensidade e a grande quantidade de horas de Sol durante grande parte do ano é, também, um dos fatores importantes para colocar o país na terceira posição no ranking mundial dos produtores de frutas (ABRAFRUTA, 2019).

De acordo com Gomes (2021), não obstante às características climáticas do país tropical no qual se encontra, o estado da 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.

A escolha da banana como matéria-prima a ser desidratada justifica-se pela importância dessa fruta para a economia do estado da Paraíba e para o Brasil, por possuir considerável teor

de água inicial, por ser um fruto climatérico entre outras razões. 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 não acarretem danos ao meio ambiente.

A agricultura familiar possui grande importância econômica e social, vinculada ao abastecimento de alimentos para o mercado interno, à geração de empregos, às exportações e à manutenção do homem no campo (CRUZ *et al.*, 2021). No entanto, o processo de produção agrícola, na agricultura familiar, necessita de equipamentos simples para realizar suas atividades, devido ao baixo poder aquisitivo dos agricultores familiares (BRAGA *et al.*, 2015).

Em todas as etapas do processo produtivo agrícola mundial (produção, colheita, pós-colheita, armazenamento e transporte), a redução das perdas e desperdícios é um grande desafio da humanidade. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, 2017), anualmente, no âmbito mundial, entre um quarto e um terço dos alimentos produzidos para o consumo humano é perdido, o que equivale a cerca de 1,3 bilhão de toneladas de alimentos. Neste montante, as frutas e hortaliças apresentam uma taxa de desperdício entre 40% a 50%. A FAO estima, ainda, que os alimentos desperdiçados seriam suficientes para alimentar 2 bilhões de pessoas.

Existem formas de reduzir, ou mesmo evitar perdas em todos os setores, da produção ao consumidor final. A secagem atua na redução de perdas e desperdícios de alimentos na fase de pós-colheita.

A escolha dos equipamentos e dos métodos para a secagem de um produto alimentício é uma etapa fundamental para a manutenção das suas qualidades nutritivas e sensoriais, uma vez que a secagem inadequada pode danificar o produto e provocar sua desvalorização ou perda.

Segundo 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 que a secagem elétrica.

Como o fluido de trabalho utilizado nos processos de secagem solar é o ar ambiente aquecido, a avaliação das suas propriedades termodinâmicas (temperatura, umidade relativa, velocidade, entre 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).

O processo de desumidificação fornece um fluxo de ar com umidade relativa e absoluta menor que a do ar ambiente. Quanto menor a umidade absoluta de um ar, mais rápido é seu aquecimento e, num mesmo intervalo de tempo, este ar é capaz de atingir maior temperatura que um ar com maior umidade absoluta.

Segundo Dina *et al.* (2015), o processo de secagem pode ser conduzido pela diferença de temperatura e/ou diferença de concentração. Uma menor concentração de vapor de água no ar favorece o processo de secagem.

O uso de material dessecante diminui a concentração de vapor de água no ar de secagem e, conseqüentemente, aumenta a capacidade do ar de absorver umidade do produto a ser seco; promovendo, assim, redução no tempo de secagem. Segundo Carneiro (2019), o decréscimo da umidade relativa do ar provoca uma secagem mais eficiente que o incremento da temperatura para uma mesma umidade relativa do ar.

Segundo Chramsard *et al.* (2013), a instalação do sistema de desumidificação deve levar em consideração o processo de regeneração do produto dessecante, bem como sua capacidade de absorver ou adsorver a umidade.

Atualmente, os processos e equipamentos de secagem solar possuem um grau elevado de confiabilidade e qualidade, além de terem implementação e manutenção rápida e fácil. Isto se deve a pesquisas, desenvolvimento de protótipos com materiais variados e testes experimentais realizados de forma sistemática e organizada, além da aplicação de métodos de análise de dados que validem os resultados obtidos.

A necessidade de desenvolver um estudo experimental associado ao teórico (modelagem) se dá devido ao consenso do fato de que, para a concepção de um sistema de secagem solar, há diversas variáveis envolvidas no processo, o que o torna um sistema complexo. Neste sentido, conclui-se que a modelagem de um sistema de secagem solar é importante, mas não prescinde do conhecimento e do desenvolvimento de técnicas e estudos experimentais, necessitando assim aliar as duas linhas de pesquisa para a obtenção de uma tecnologia que corresponda às expectativas e que seja de implementação viável.

O planejamento experimental fatorial é uma metodologia sistemática de planejamento de experimentos e análise de dados e representa uma ferramenta importante no dimensionamento dos componentes de um sistema de secagem que atenda à determinada necessidade.

Procurando contribuir com o desenvolvimento de equipamentos de secagem sustentáveis e com o progresso científico brasileiro, o Grupo de Pesquisa em Energia e Desenvolvimento Sustentável (GEDS), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), tem trabalhado no desenvolvimento de sistemas de secagem solar e sua implementação em comunidades agrícolas locais.

Segundo Gomes (2021), 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 custos reduzidos de produção e de fácil operação, propiciando uma maior inserção na produção agrícola.

Neste contexto, buscou-se desenvolver um sistema de secagem de frutas que utilize, exclusivamente, o sol como fonte energética, através do aproveitamento da energia solar fototérmica e da energia solar fotovoltaica. Para tanto, faz-se necessário o planejamento experimental fatorial para determinar o melhor arranjo no dimensionamento e otimização de componentes do equipamento.

Este trabalho visa auxiliar na redução das perdas no setor frutífero da produção regional, na fase de pós-colheita e através do processo de secagem solar, estimulando e disseminando o uso da energia solar no processo de secagem, além de demonstrar a viabilidade de obtenção de um produto de boa qualidade e alto valor agregado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema de secagem solar de exposição indireta, com unidade dessecante integrada, a ser testado na produção de banana-passa, e analisar a influência do pré-tratamento do ar no rendimento térmico do equipamento e no tempo de secagem.

1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um sistema de secagem solar que utilize apenas a energia solar térmica para aquecer o fluido de trabalho;
- Desenvolver um sistema de secagem solar, com inovações em relação aos secadores já desenvolvidos na UFCG, que atenda à demanda necessária ao processo de secagem da banana para as condições meteorológicas do agreste e sertão paraibano;
- Desenvolver e implementar um sistema de medição e aquisição de dados (SMAD) para a temperatura e umidade relativa do ar nos testes experimentais para o planejamento experimental fatorial e nos testes de secagem;
- Utilizar a técnica do *Design of Experiments* (DOE) – planejamento experimental na determinação das configurações ótimas para o coletor solar plano e para a unidade dessecante;
- Realizar testes de secagem da banana prata (*Musa Spp*), nas cidades de Campina Grande (PB) e Pombal (PB), que contemplem diferentes condições meteorológicas e climáticas para observar a influência dos dados meteorológicos locais no desempenho dos sistemas de secagem solar com e sem unidade dessecante (rendimento térmico e tempo de secagem);
- Realizar testes de secagem da banana prata, nos sistemas com e sem unidade dessecante, nas cidades de Campina Grande (PB) e Pombal (PB), para obter a curva experimental da cinética de secagem e comparar os ajustes dos modelos de Page e de Midilli *et al* à cinética de secagem obtida;
- Calcular o rendimento térmico dos sistemas de secagem desenvolvidos e comparar os resultados obtidos com os sistemas de secagem equivalente;
- Mostrar, na carta psicrométrica, os principais estados e processos termodinâmicos do ar de secagem no sistema, com e sem unidade dessecante.

Capítulo II
REVISÃO DA LITERATURA

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, estão expostos os principais referenciais teóricos consultados para o desenvolvimento deste trabalho. Primeiramente, é apresentado o conceito de secagem e seus princípios básicos; em seguida, é apresentada uma introdução sobre secadores de frutas, com ênfase em secadores solares. O estado da arte para secadores solares ficou separado em secadores que usam dessecante e secadores que não usam dessecante do ar e a utilização do Sol como fonte de energia em diversas atividades tecnológicas é discutida na seção 2.6. Por fim, é apresentado uma prospecção tecnológica sobre secadores solares.

2.1 Princípios da secagem

Secagem é um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o ar e o produto a ser seco. Energia, em forma de calor, é transferido para o produto, enquanto vapor de água é transferido para o ar circundante (LIMA, 1999; COSTA, 2008).

Lima (1999) ressalta ainda que, no processo de secagem, é necessário fornecer calor ao material úmido para que a água possa ser transportada do interior do sólido até sua superfície; permitindo, assim, sua evaporação da superfície do material para o ambiente.

Segundo Gomes (2021), 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 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.

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.

Os alimentos deixados sem tratamento modificam-se naturalmente pela ação, separada ou combinada, de diversos fatores internos e externos: alterações microbianas, por fungos e bactérias; reações bioquímicas (respiração, amadurecimento, etc) e enzimáticas. Para diminuir,

adiar ou evitar tais modificações, existem várias técnicas de conservação como, por exemplo, refrigeração, congelamento, secagem e tratamento térmico.

A conservação dos produtos alimentares deve constituir um empenho primordial em regiões onde a produção se concentra em determinados períodos (safra). É necessário repartir a oferta do produto ao longo do ano de modo a diminuir a oscilação de preços e garantir renda para pequenos produtores.

O processo de secagem apresenta-se, então, como uma solução para a conservação de alimentos, visto que adia a deterioração do produto e, conseqüentemente, reduz os riscos de perda do seu valor comercial.

Para Couto *et al.* (2019), além de gerar a implementação de um novo produto no mercado, a secagem agrega significativo valor comercial ao alimento pois o caracterizará como produto processado.

A transferência de calor no processo de secagem pode ser feita por convecção, condução e/ou radiação. Neste trabalho, considerou-se a secagem por convecção, cuja taxa de transferência de calor do ar de secagem para o produto é dada pela Equação (2.1), conhecida como Lei do Resfriamento de Newton, que estabelece que a troca de calor entre uma superfície e um fluido que a circunda é dada por:

$$\frac{dQ}{dt} = h_c A_t \Delta T \quad (2.1)$$

onde,

$\frac{dQ}{dt}$ é a taxa de calor transferido por convecção (W);

h_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m²°C);

A_t é a área de transferência de calor (m²);

ΔT é a diferença de temperatura entre a superfície e o fluido (°C).

A convecção de calor pode ser classificada como natural ou forçada. A convecção forçada ocorre quando existe um agente externo, tal como uma bomba ou um ventilador, que força a circulação do fluido afim de promover as trocas térmicas. No caso da convecção natural, as trocas térmicas ocorrem devido à diferença pressão. Quando as temperaturas se elevam, as partículas se afastam, o ar fica menos denso, a pressão diminui e o ar se desloca da região de alta pressão para a região de baixa pressão (correntes de convecção).

Na maioria das situações práticas, a convecção forçada é a forma mais eficiente de troca de calor entre uma superfície e um fluido.

A secagem é um dos métodos mais antigos de conservação de alimentos e tem por finalidade adiar, ou mesmo evitar, as reações químicas e os processos microbiológicos como o desenvolvimento e proliferação de fungos e bactérias; aumentando, assim, a vida útil do produto e mantendo suas propriedades nutricionais. Com o passar dos anos, as técnicas dos processos de secagem têm sido repassadas de geração para geração através dos conhecimentos adquiridos de seus antepassados e, gradativamente, melhoradas de forma empírica.

Segundo Leitão (1998), para secar bem, é necessário dominar três parâmetros fundamentais:

- A energia térmica fornecida, que aquece o produto e provoca a migração da água do interior do produto para a superfície e a sua transformação em vapor;
- A capacidade do ar de secagem para absorver o vapor de água libertado pelo produto. Esta capacidade depende da percentagem de vapor de água contida no ar antes de chegar ao produto;
- A velocidade deste ar ao nível do produto. No início da secagem, principalmente, deve ser elevada (até certo limite) de maneira a acelerar a remoção do vapor de água.

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) n° 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 que devem possuir umidade máxima limitada em 25%, em base úmida (ANVISA, 2005).

2.1.1 Fases da secagem

Durante a secagem, se distinguem duas fases principais: secagem à taxa constante e secagem à taxa decrescente. A primeira fase é a secagem à taxa constante e, nesta etapa, a secagem é mais fácil e rápida, pois evapora-se a água livre do produto. A segunda fase é a secagem à taxa decrescente e, nesta fase, a evapora-se a água ligada, fixa aos constituintes do produto que se vaporiza mais dificilmente.

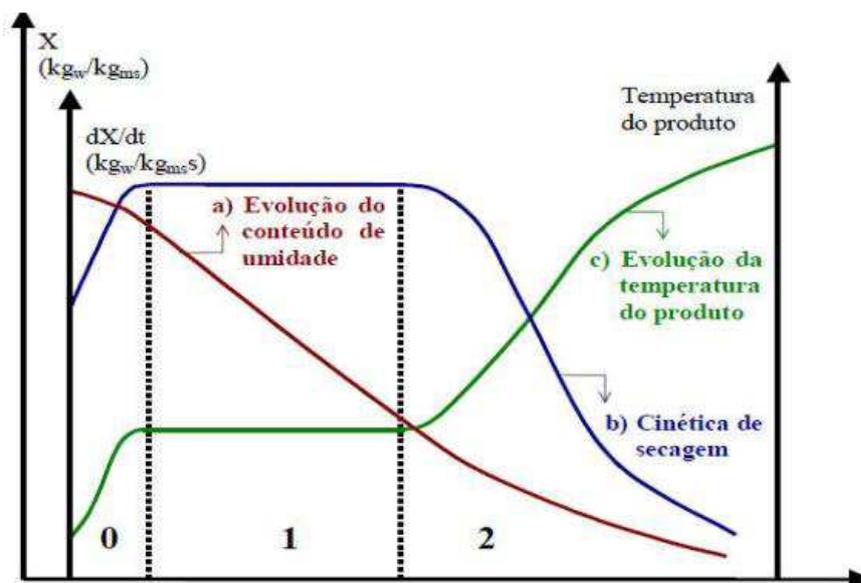
Na Figura 2.1, são apresentadas, ao longo do tempo e para um experimento utilizando ar de propriedades constantes, as curvas de evolução do teor de água do produto (X), de sua temperatura (T) e da velocidade de secagem (dX/dt), também chamada de cinética de secagem.

A curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto durante o processo de secagem em relação à evolução do tempo (t), isto é, a curva obtida pesando o produto durante a secagem numa determinada condição de secagem.

A curva (b) representa a velocidade (taxa) de secagem do produto (variação do conteúdo de umidade do produto por tempo, dX/dt) em relação à evolução do tempo (t), isto é, a curva obtida diferenciando a curva (a).

A curva (c) representa a variação de temperatura do produto durante a secagem (variação da temperatura do produto (T)) em relação à evolução do tempo (t), isto é, a curva obtida medindo a temperatura do produto durante o processo de secagem.

Figura 2.1- Curvas de secagem.



Fonte: Brod *et al.*, 1999.

2.1.2 Modelos matemáticos de cinética de secagem

A modelagem matemática é um conjunto de etapas que tem como objetivo fornecer uma descrição matemática para um dado problema do mundo real. Tal descrição, em geral, é feita por meio de equações.

No processo de secagem, os modelos matemáticos são aplicados com o intuito de prever o tempo de secagem. Ao longo da história, diversos modelos foram desenvolvidos e são classificados como empíricos e semiempíricos.

Os modelos empíricos de secagem apresentam uma relação direta entre o teor de água do produto e o tempo de secagem. Eles negligenciam os fundamentos do processo de secagem e seus parâmetros não têm significado físico.

Já modelos semiempíricos são baseados na hipótese da validade da Lei do resfriamento de Newton, assumindo que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre o teor de água do produto e seu respectivo teor de água de equilíbrio, para as condições de secagem especificada. Os modelos empíricos e semiempíricos são usados para descrever a secagem de uma partícula ou de uma camada fina de partículas.

Na Tabela 2.1 são apresentados alguns dos modelos matemáticos empíricos e semiempíricos de secagem, onde as equações descrevem RX (razão de umidade) em função do tempo t . Nos modelos, a , b , c e n são coeficientes e k , k_0 e k_1 são constantes (s^{-1}).

Tabela 2.1 - Alguns modelos matemáticos de cinética de secagem.

Nome do Modelo	Tipo	Equação
Lewis ou exponencial	Empírico	$RX = \exp(-kt)$
Page	Empírico	$RX = \exp(-kt^n)$
Page modificado	Empírico	$RX = \exp(-(kt)^n)$
Henderson e Pabis	Empírico	$RX = a \cdot \exp(-kt)$
Logarítmico	Empírico	$RX = a \cdot \exp(-kt) + c$
Wang e Singh	Empírico	$RX = 1 + at + bt^2$
Dois termos	Semi-empírico	$RX = a \cdot \exp(-k_0t) + c \cdot \exp(-k_1t)$

Midilli <i>et al.</i>	Empírico	$RX = a \cdot \exp(-kt^n) + bt$
-----------------------	----------	---------------------------------

Fonte: Própria autora.

A razão de umidade é definida pela equação 2.2:

$$RX = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (2.2)$$

Onde:

X_t é o teor de água do produto no instante de tempo t ;

X_0 é o teor inicial de água do produto;

X_e é o teor de água de equilíbrio.

2.1.3 Determinação do teor de água de um produto biológico

A água pode estar presente num produto sob duas formas: Água livre e água ligada.

Segundo Nunes (2016), a água livre é a água que está simplesmente adsorvida no material. É a mais abundante e pode ser perdida mais facilmente para o ambiente. A água ligada é a água da constituição, que faz parte da estrutura do material, ligada a proteínas, açúcares e adsorvida na superfície de partículas coloidais, sendo necessários níveis mais elevados de temperatura para sua remoção.

A determinação do teor de água em alimentos pode ser feita de diversas formas e a escolha do método a ser empregado depende da forma como a água está presente na amostra, da natureza da amostra e da rapidez desejada na determinação.

Os métodos de determinação de umidade podem ser classificados em métodos diretos e métodos indiretos.

Métodos diretos: a água é retirada do produto geralmente por processo de aquecimento, e o teor de água é calculado pela diferença da massa inicial e da massa final da amostra. Os métodos diretos são executados em um período de tempo relativamente longo o que, às vezes, representa uma desvantagem quando se necessita de uma resposta imediata. São exemplos de métodos diretos: estufa, infravermelho e destilação.

Métodos indiretos: o teor de água é estimado em função das propriedades elétricas do produto em uma determinada condição. São métodos práticos e rápidos, mas estão sujeitos a erros decorrentes da variação das propriedades físicas dos produtos, da temperatura ou da distribuição da umidade no interior do mesmo. São exemplos de métodos indiretos: resistência elétrica e capacitância.

A determinação da quantidade ou teor de água num produto alimentício é de fundamental importância na análise da qualidade do alimento. O teor de água pode ser dado em base seca e em base úmida. Segunda Costa *et al.* (2021), em geral, utiliza-se o teor de água em base úmida em situações comerciais, como por exemplo no critério de classificação de frutas secas ou desidratadas da ANVISA; e o teor de água em base seca é utilizado em trabalhos científicos como, por exemplo, na modelagem matemática da cinética de secagem.

O teor de água de um produto pode ser expresso como relação entre a massa de água contida no produto e a massa de matéria seca, como mostra a equação:

$$X_{bs} = \frac{M_a}{M_s} \quad (2.3)$$

onde:

X_{bs} é o teor de água em base seca (adimensional);

M_a é a massa de água contida no produto (g);

M_s é a massa de matéria seca do produto (g).

Outra forma de expressar esse teor é através da relação entre a massa de água contida no produto e a massa total do mesmo, como pode-se observar na equação:

$$X_{bu} = \frac{M_a}{M_t} \quad (2.4)$$

onde,

$$M_t = M_s + M_a$$

e,

X_{bu} é o teor de água em base úmida (adimensional);

M_t é a massa total do produto (g).

O teor de água em base seca pode ser convertido para base úmida, e vice-versa, através das Equações (2.5) e (2.6).

$$X_{bu} = \frac{X_{bs}}{1 + X_{bs}} \quad (2.5)$$

$$X_{bs} = \frac{X_{bu}}{1 - X_{bu}} \quad (2.6)$$

2.1.4 Psicrometria

O estudo das propriedades físicas e termodinâmicas das misturas de gases e vapor e suas aplicações práticas é um ramo da ciência chamado psicrometria.

O ar é constituído por uma mistura de gases onde o nitrogênio representa mais de 70% e o oxigênio cerca de 20%. As propriedades termodinâmicas do ar que têm demonstrado maior influência no processo de secagem são temperatura, velocidade e umidade relativa. A temperatura (ou temperatura de bulbo seco) é uma grandeza física escalar que pode ser entendida como a medida do grau de agitação das moléculas que compõem um corpo e é medida com um termômetro comum. A velocidade é uma grandeza vetorial (ou seja, possui módulo, direção e sentido) e relaciona a variação da posição de um corpo no espaço em relação ao tempo.

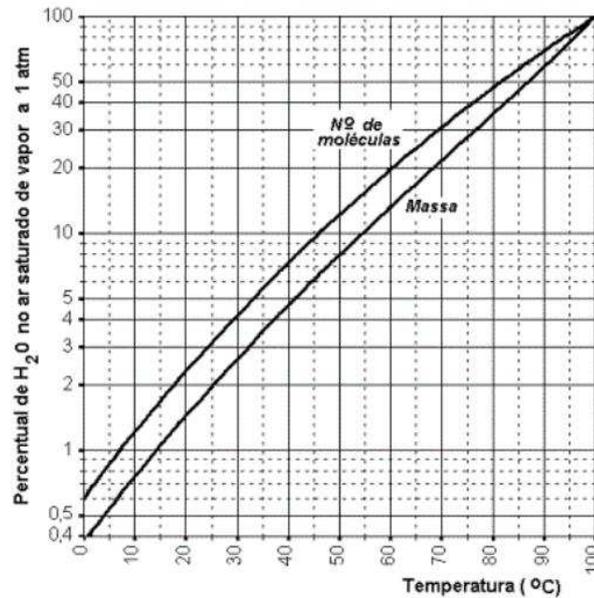
Com relação à umidade relativa, primeiramente, deve-se destacar que, para uma determinada temperatura, existe um percentual máximo de moléculas de água que o ar pode conter em forma de vapor. Neste caso, diz-se que o ar está saturado. Ultrapassado esse percentual (de saturação), inicia-se a condensação do vapor de água.

Por exemplo, a 30°C, a saturação ocorre quando, em número de moléculas, o ar possui uma proporção de 4% de vapor de água. A umidade relativa (UR) é a razão entre o percentual, em número de moléculas ou massa, de vapor d'água no ar (x_0) pelo percentual que corresponde à saturação (x) naquela temperatura. Logo:

$$UR = \frac{x_0}{x}$$

Assim, no exemplo de uma temperatura a 30°C, um ar que contém 3% de moléculas de água possui 75% de umidade relativa. Vale observar que, quanto maior a temperatura maior o percentual de água necessário para que ocorra a saturação do ar (Figura 2.2).

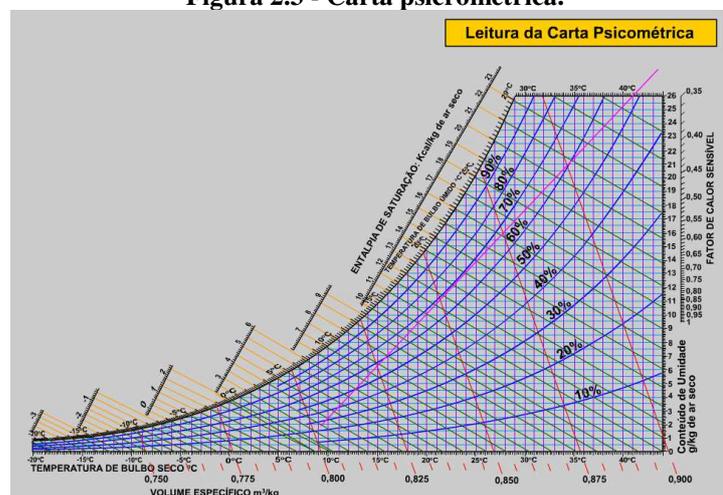
Figura 2.2- Saturação do ar.



Fonte: www.if.ufrgs.br.

As propriedades termodinâmicas do ar seco e vapor d'água que constituem o ar atmosférico podem ser apresentados em um gráfico psicrométrico ou carta psicrométrica. Na Figura 2.3, tem-se um gráfico psicrométrico na pressão atmosférica de 760 mm de mercúrio, onde são apresentadas as linhas que determinam as propriedades da mistura ar-vapor.

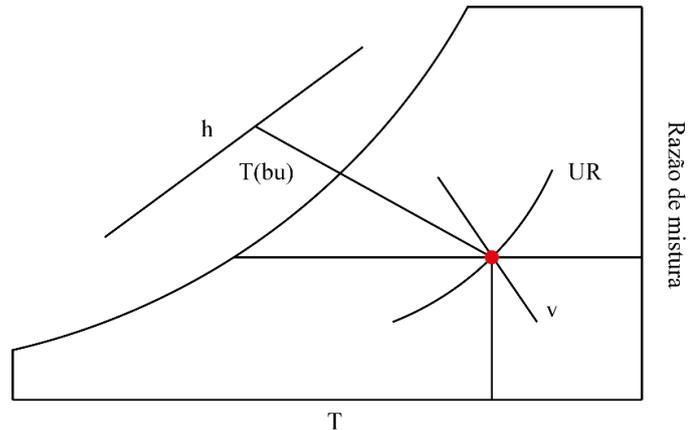
Figura 2.3 - Carta psicrométrica.



Fonte: <http://rogeriobaiva.blogspot.com/2014/03/carta-psicrometricas-sofwares-para.html>

Conhecendo-se duas propriedades de um ar, seu estado termodinâmico fica determinado e, então, é possível obter os valores das demais propriedades (Figura 2.4).

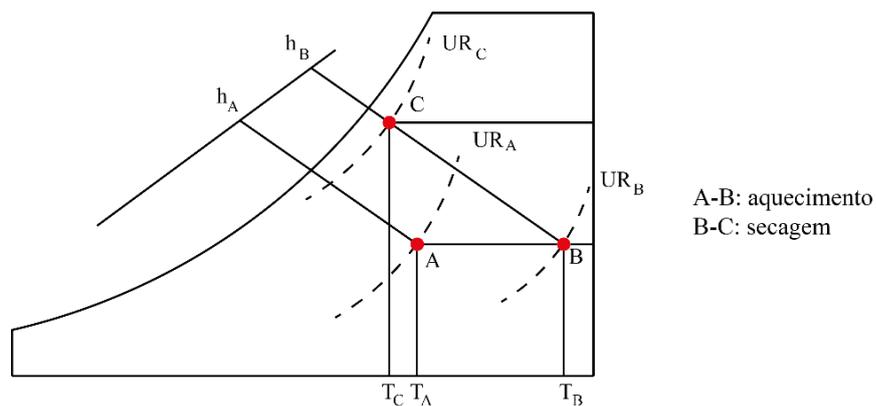
Figura 2.4 - Estado termodinâmico do ar.



Fonte: Booker *et al.*, 1992.

Na Figura 2.5, é apresentado um esquema simplificado dos estados termodinâmicos pelos quais passa o ar no processo de secagem.

Figura 2.5 - Processos e estados termodinâmicos do ar de secagem.



Fonte: Booker *et al.*, 1992.

No ponto A, o ar apresenta um estado termodinâmico caracterizado por certa temperatura e umidade relativa. Ao passar pelo processo termodinâmico de aquecimento, sua temperatura e umidade relativa são modificadas e o ar passa, então, para o estado termodinâmico, caracterizado pelo ponto B.

É possível notar que, no processo $A \rightarrow B$, enquanto a temperatura do ar aumenta, sua umidade relativa diminui. Isso se deve ao fato de que, quando, na temperatura do estado 1, a saturação do ar ocorre com um percentual x de moléculas de vapor de água enquanto contém um percentual x_0 de moléculas. Este mesmo ar (com x_0 de moléculas), só que agora com temperatura mais elevada (consequentemente, sua saturação ocorre com um percentual de moléculas de vapor de água $y > x$), possui umidade relativa menor.

No estado termodinâmico caracterizado pelo ponto B, o ar mais quente e com menor umidade relativa passa pelo produto, perde temperatura e aumenta a umidade relativa (processo termodinâmico $B \rightarrow C$), uma vez que parte da sua energia em forma de calor é transferida para o produto e parte da água contida no produto é transferida para o ar em forma de vapor de água; chegando, então, ao estado termodinâmico caracterizado pelo ponto C.

2.2 Secadores de frutas

O secador é o equipamento usado com a finalidade de reduzir a umidade dos produtos através da 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.

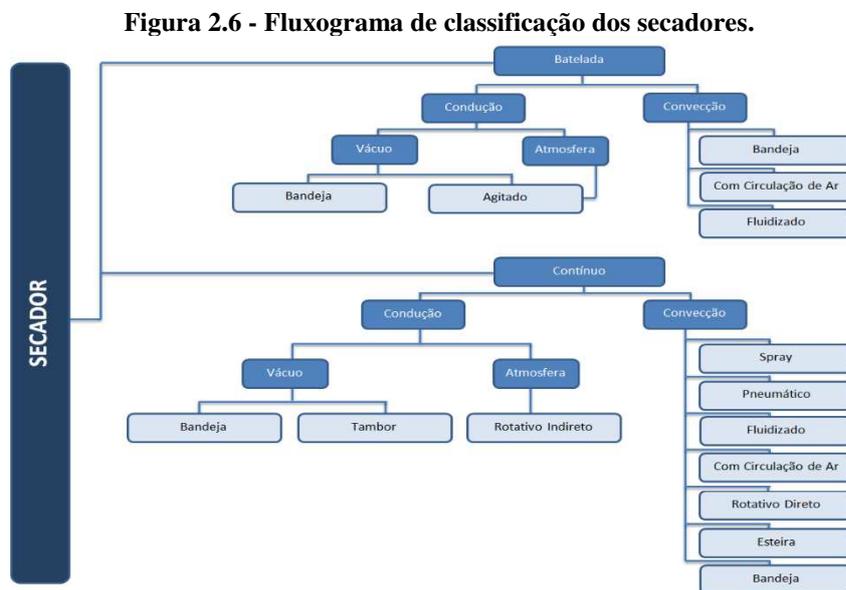
A grande variedade de equipamentos e processos de secagem representa uma das maiores dificuldades na seleção de secadores para se obter um produto de qualidade. Muitos métodos são apresentados, na literatura, para escolha do modelo mais adequado a cada necessidade, como os baseados em conceitos fenomenológicos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

No entanto, muitos tipos de secadores para produtos agrícolas diferem, basicamente, pelo método de operação (contínuo ou batelada), sendo, portanto, é importante conhecer os tipos de equipamentos e as características próprias de cada produto a ser seco.

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 Figura 2.6.



Fonte: Gomes, 2015.

- **Secadores de Batelada:** nos sistemas de secagem por batelada, também chamados de descontínuos, o produto a ser seco 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.

Entre 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.

Dos 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.

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).

Nas grandes corporações agrícolas, o setor da transformação de alimentos é caracterizado por custos de mão de obra elevada e padrões de qualidade cada vez mais severos. Isso motivou a criação de unidades de secagem artificiais e de grande capacidade, que asseguram uma produção de alta qualidade quaisquer que sejam as condições climáticas.

Tais unidades, em geral, são de grande investimento em capital, energia e tecnologia. Requerem pouca mão de obra e necessitam de pessoal qualificado para fabricação, instalação e manutenção. Essas unidades de secagem são, geralmente, empregadas para a secagem em grande escala de um único produto. Tais procedimentos não correspondem às reais necessidades dos pequenos produtores rurais, que precisam secar pequenas quantidades de alimentos ao longo do ano.

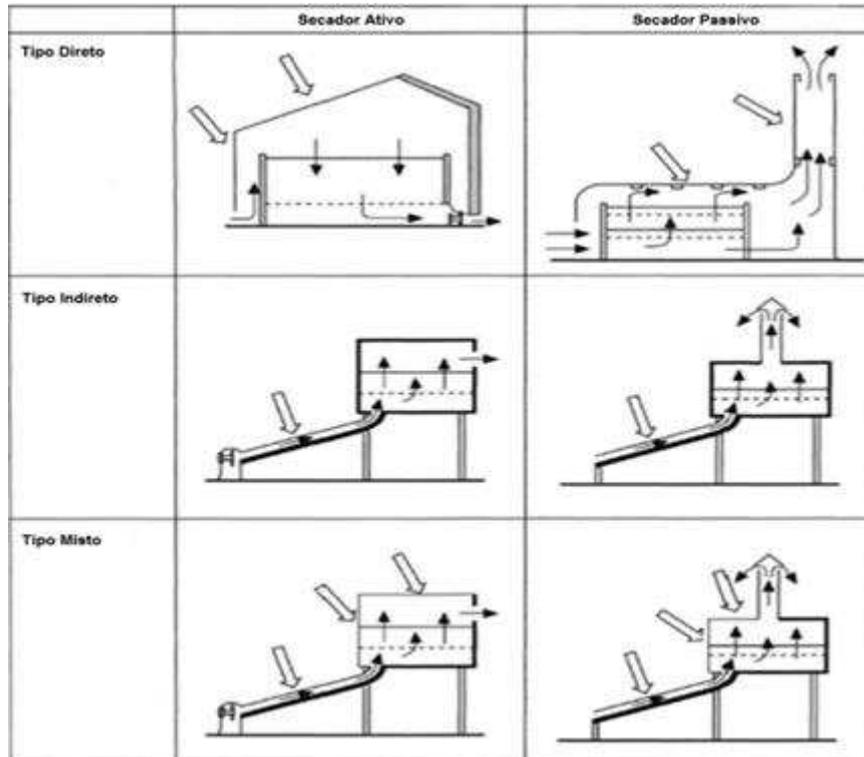
2.2.2 Secadores solares

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.

O secador solar é o equipamento que promove a secagem de um determinado produto utilizando como fonte primária de energia a energia solar. A secagem utilizando secador solar de exposição direta ou indireta tem crescido por ter apresentado resultados positivos quanto ao processo de secagem, além de garantir maior qualidade e limpeza ao produto final desidratado quando comparado à secagem a céu aberto.

Segundo Fudholi *et al.*, (2010), existem, basicamente, quatro tipos de secadores solares: (1) secadores solares diretos, (2) secadores solares indiretos, (3) secadores de modo misto e (4) secadores solares híbridos. Na Figura 2.7, é apresentada uma representação esquemática desta classificação.

Figura 2.7 - Representação esquemática da classificação dos secadores solares



Fonte: Adaptado de Fudholi *et al*, 2010 e Carneiro, 2019.

O ar ambiente entra no coletor solar por uma abertura; neste, é aquecido pela irradiação solar e sai por uma outra abertura localizada num ponto mais alto que a primeira. Essa passagem do ar no coletor pode ser por convecção natural ou forçada.

Em alguns secadores, o coletor solar e a câmara de secagem (espaço onde são colocados o produto a ser seco) são o mesmo compartimento. Estes secadores são chamados de secador solar de exposição direta. Em outros secadores, coletor e câmara de secagem são espaços diferentes e são chamados de secador solar de exposição indireta.

Na Figura 2.8, pode-se observar um secador solar construído na Universidade Federal de Sergipe (UFS) com cantoneiras de ferro e alumínio e que utiliza vidro no coletor solar e na câmara de secagem, fato que faz com que a irradiação solar também incida sobre o produto a ser seco. Esse secador faz uso do gás liquefeito de petróleo (GLP) como fonte de energia auxiliar.

Figura 2.8 - Secador solar desenvolvido na Universidade Federal do Sergipe.



Fonte: Nunes, 2016.

2.2.2.1 Secador solar de exposição direta (SSED)

O secador solar de exposição direta é um equipamento de simples construção, operação e manutenção, sendo composto basicamente por um corpo (coletor solar), que é uma estrutura construída com material isolante térmico e cobertura transparente responsável pelo efeito estufa que irá aquecer o ar destinado à secagem do produto e bandejas, onde o produto a ser seco é depositado.

A Figura 2.9 apresenta um protótipo de secador solar de exposição direta, produzido pelo Grupo de Pesquisa em Energia e Desenvolvimento Sustentável (GEDS), sob a coordenação do professor Titular Dr. Marcelo Bezerra Grilo, no Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas (LEMT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Esse protótipo foi construído com MDF Ultra e possui cobertura de vidro de 4 mm.

Figura 2.9 - protótipo de secador solar de exposição direta – GEDS/LEMT/UFCG.



Fonte: Nunes, 2016.

2.2.2.2 Secador solar de exposição indireta (SSEI)

Neste tipo de secador solar, o produto a ser desidratado não está diretamente exposto à radiação solar o que, segundo Nunes (2016) minimiza a descoloração e rachaduras na sua superfície, melhorando, assim, a qualidade do produto. As bandejas de disposição do produto a ser seco ficam num compartimento (câmara de secagem) construído totalmente de material isolante térmico. 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 a câmara de secagem onde se encontra o produto a ser desidratado.

Em algumas situações, o secador solar é denominado sistema de secagem quando, além do coletor solar e da câmara de secagem, incluir outros subsistemas auxiliares como, 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 desenvolvido pelo grupo de pesquisa GEDS é mostrado na Figura 2.10. Este secador foi construído com MDF Ultra, possui cobertura transparente de policarbonato alveolar, telha de fibrocimento pintada de preto fosco. A convecção forçada foi feita por um cooler acionado por um mini painel fotovoltaico.

Figura 2.10 - Protótipo de secador solar de exposição indireta – GEDS/LEMT/UFCG.



Fonte: Nunes, 2016.

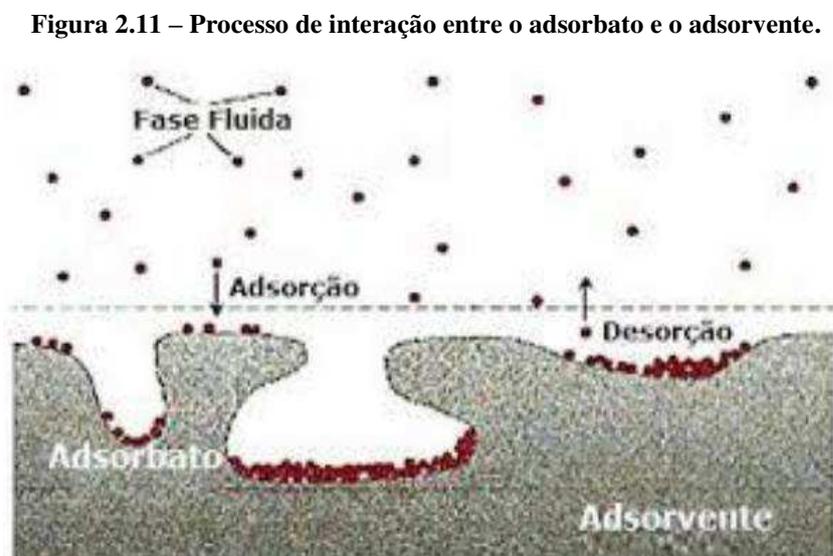
Tem-se estudado a utilização de determinados materiais no pré-tratamento do ar de secagem com a finalidade de melhorar suas condições psicrométricas e reduzir o tempo de secagem e aumentar a eficiência do sistema de secagem.

2.3 O processo de adsorção

A adsorção é um fenômeno físico-químico caracterizado pela transferência de massa e em que certos sólidos possuem a capacidade de concentrar, em sua superfície, determinadas substâncias existentes em fluidos líquidos ou gasosos, promovendo a separação dos componentes desses fluidos. No processo de adsorção, quanto maior a área externa por unidade de massa sólida, mais viável será a adsorção. Assim, os adsorventes são geralmente sólidos com partículas porosas (SILVA, 2019).

A capacidade de adsorção de um sólido dessecante é limitada, depende de sua área superficial e varia de acordo com a temperatura (quanto maior a temperatura do dessecante, menor quantidade de vapor será adsorvido). Os principais constituintes em um processo de adsorção são o adsorbato e o adsorvente.

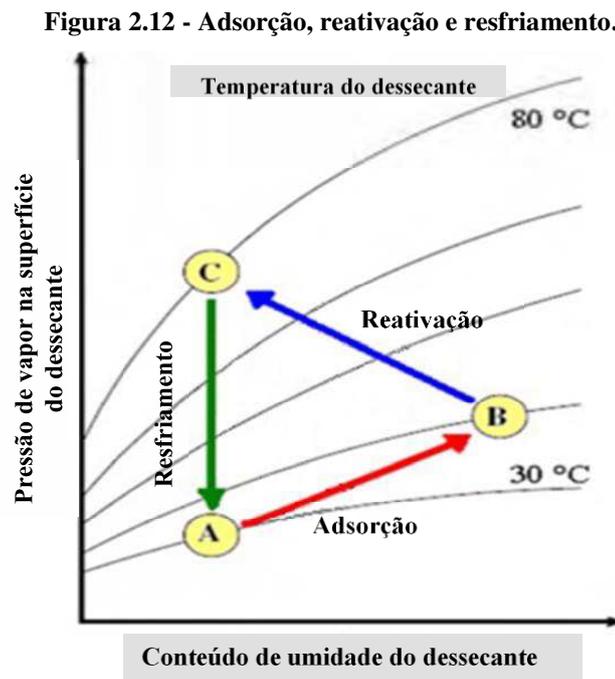
A substância que se acumula na interface do material é chamado adsorbato ou adsorvato e a superfície sólida na qual o adsorbato se acumula chama-se adsorvente ou adsorbente. A Figura 2.11 ilustra o processo de interação entre estes constituintes.



Fonte: Silva, 2019.

2.3.1 Desumidificação usando dessecantes

Os desumidificadores dessecantes atraem o vapor d'água do ar criando uma área de baixa pressão de vapor na superfície do dessecante; com isso, a pressão exercida pelo vapor d'água no o ar é maior, então as moléculas de água se movem do ar para o dessecante e o ar é desumidificado. Os desumidificadores dessecantes fazem uso das mudanças de pressão de vapor para secar o ar continuamente em um ciclo repetitivo, como descrito no diagrama da Figura 2.12.



Fonte: Fernandes, 2021.

O dessecante começa o ciclo no estado termodinâmico A, quando está com a pressão do vapor da superfície baixo porque está seco e frio. Como o dessecante adsorve a umidade do ar circundante, a superfície dessecante muda para a condição descrita pelo estado termodinâmico B. Sua pressão de vapor é agora igual ao do ar circundante, já que o dessecante está úmido e quente.

No estado B, o dessecante não pode coletar mais vapor de água do ar circundante porque não há diferença de pressão entre a superfície e a vapor no ar.

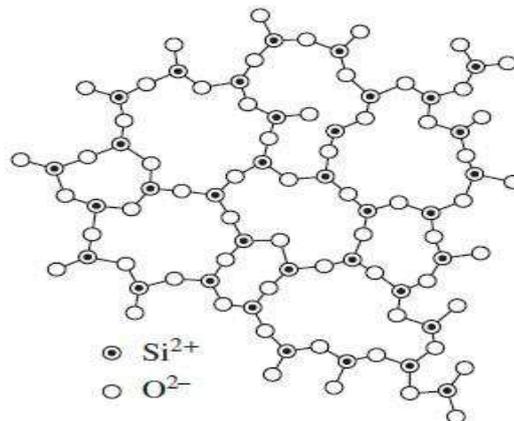
Em seguida, o dessecante é retirado do ar úmido, aquecido e colocado em uma corrente de ar diferente. A pressão de vapor da superfície do dessecante fica mais alta que o ar circundante e, assim, o vapor d'água sai da superfície dessecante para o ar circundante, equalizando o diferencial de pressão.

No estado termodinâmico C, o dessecante está seco, mas, como está quente, sua pressão de vapor ainda é muito alta para poder remover umidade do ar. Para restaurar sua baixa pressão de vapor, o dessecante é resfriado; passando, então, para o estado termodinâmico inicial (A), fechando o ciclo que vem a se repetir.

2.3.1.1 Sílica gel

A sílica gel é um tipo de composto sintético e amorfo do silício, constituída por uma rede rígida e contínua de sílica coloidal (Figura 2.13) e é composta de grãos muito pequenos e porosos de SiO_4 hidratado (GOMES *et al*, 2018).

Figura 2.13 - Representação da cadeia molecular da sílica gel.



Fonte: Ruzhu *et al.*, 2014.

A hidroxila na estrutura é um componente importante para adsorção porque é polar e pode formar ligações de hidrogênio com óxidos polares, como água e álcool. Cada tipo de gel de sílica tem apenas um tipo de poro que, geralmente, é confinado em canais estreitos.

Os diâmetros de poros da sílica gel são 2 nm, 3 nm (tipo A) e 0,7 nm (tipo B), e a área superficial específica está entre de 100-1000 m^2 . A sílica gel é amplamente usada para desumidificação por causa de sua alta capacidade de adsorção.

No processo de adsorção entre água e sílica gel, a molécula de água é conectada com o grupo álcool de sílica ($\text{Si-OH} - \text{OH}_2$) enquanto o grau de cobertura da superfície é baixo. Conforme o grau da superfície de cobertura aumenta, a ligação de hidrogênio se torna a

principal força de conexão. O calor de adsorção para este par é de cerca de 2500 kJ/kg e a temperatura de dessorção pode ser muito baixa, mas acima de 50°C.

Há cerca de 4% a 6% de água em massa conectada a um único grupo hidroxila na superfície de átomo de sílica, que não pode ser removida, caso contrário, a sílica gel perderia a capacidade de adsorção. Assim, a temperatura de dessorção não pode ser superior a 120°C e é, geralmente, inferior a 90°C. A menor temperatura de acionamento do par de sílica gel-água retirada em experimentos é cerca de 55°C, o que favorece a utilização da energia solar na reativação da sílica gel (RUZH *et al.*, 2014).

Segundo Gomes *et al* (2018), a sílica gel pode adsorver cerca de 40% do seu próprio peso de água e, atualmente, encontra extensivo uso como dessecante e na indústria alimentícia.

2.4 O estado de arte para secadores solares

Segundo Nunes (2016), o estado da arte em pesquisas acadêmicas se destina a documentar o que está sendo feito atualmente no campo em estudo específico e que permite observar e comparar as inovações propostas com as de outras pesquisas.

Para tanto, pesquisas sobre secadores solares e secadores solares auxiliados por dessecantes foram realizadas nos endereços mais recomendados e no portal de periódicos CAPES. Os trabalhos relacionados a seguir estão apresentados em ordem crescente de data de publicação.

Fudholi *et al.*, (2014) testaram experimentalmente e analisaram o desempenho de um secador solar usado na secagem de pimentão vermelho durante 33 horas. As eficiências do coletor solar e do secador solar foram de 28% e 13%, respectivamente, para uma irradiação solar média de 420 W/m² e uma taxa de fluxo de massa de ar de 0,07 kg/s.

Nunes (2016) desenvolveu e testou, na secagem de banana prata, um secador solar de exposição indireta com coletor solar e câmara de secagem acoplados e que apresentou inovações tais como um capacitor térmico no interior do coletor solar e um sistema de movimentação do ar de secagem (cooler) acionado por energia solar fotovoltaica. A temperatura na câmara de secagem ficou entre 45°C e 55°C e a umidade relativa do ar de secagem na faixa de 30%±5%. O teor de umidade em base úmida de 25% foi obtido em 840

minutos (14 horas) e os resultados obtidos para o rendimento térmico do secador solar foram em torno de 19,6%.

Lima (2017) apresentou um estudo comparativo de sistemas de secagem para produção de banana passa. Os sistemas de secagem estudados foram secagem solar, secagem elétrica e secagem mista (secagem solar seguida de secagem elétrica). Com relação ao consumo específico de energia (CEE), o processo de secagem elétrico apresentou um CEE de 379,33 kWh por ciclo, com temperatura de 45°C e 225,54 kWh por ciclo com temperatura de 55°C, enquanto o processo de solar apresentou um CEE de 45,83 kWh por ciclo, o que mostra a grande vantagem comparativa do secador solar em relação ao secador elétrico. Os valores de rendimentos térmicos do secador solar obtidos nos processos de secagem solar, com controle e sem controle da temperatura, foram, respectivamente, 27,85% e 30,65%.

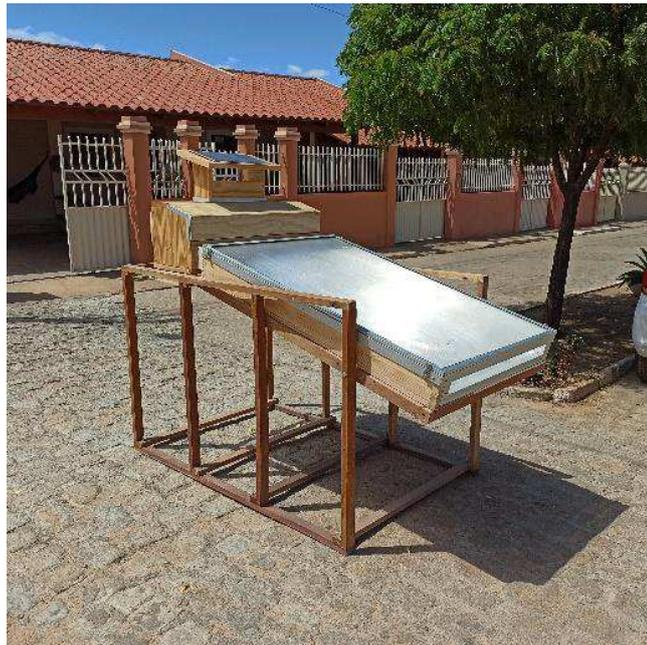
Taborda (2017) analisou um secador solar indireto e por convecção forçada, construído em madeira e com o coletor solar coberto por uma lâmina de vidro transparente de 3 mm de espessura. Foram testados três materiais como meios absorvedores: chapa de aço, brita sem pintar e a brita pintada de preto fosco. As temperaturas de saída do coletor solar e câmara de secagem foram analisadas, obtendo-se picos de temperatura na saída do coletor no valor de $72,3^{\circ}\text{C}\pm 0,57^{\circ}\text{C}$ para a chapa de aço, $60,4^{\circ}\text{C}\pm 0,39^{\circ}\text{C}$ para a brita sem pintar e $65,4^{\circ}\text{C}\pm 0,53^{\circ}\text{C}$ para a brita pintada. Os dados da temperatura foram medidos por termopares do tipo “k”. A eficiência térmica do coletor solar utilizando a chapa de aço, a brita sem pintar e a brita pintada foi, respectivamente, de $44\%\pm 1,2\%$, $51,2\%\pm 2,09$ e $65,33\%\pm 2,29$.

Tedesco *et al.* (2019), após a simulação computacional, desenvolveram um secador solar de exposição indireta adaptado ao clima subtropical da Cidade Farroupilha, RS. Os materiais utilizados na construção do equipamento foram: aço - SAE 1020 preto fosco de alta absorção e vidro temperado com espessura de 6 mm. O volume interno da câmara é de 110 litros. A aferição da temperatura no coletor e na câmara foi realizada através de sensores Pt100 e a umidade relativa foi determinada pela leitura de termômetros de bulbo seco e bulbo úmido. A temperatura chegou a um valor aceitável para a desidratação de frutas. Durante a realização do experimento sem frutas, os autores constataram uma diferença de até 20°C entre a temperatura de saída do coletor e a temperatura de saída da câmara.

Gomes (2021) aplicou a metodologia do planejamento experimental fatorial na determinação da configuração ótima de um secador solar de exposição indireta e a melhor configuração obtida para o coletor solar foi: material isolante a madeira de Pinus, cobertura de

policarbonato alveolar e volume interno de 100 litros. O rendimento termodinâmico foi calculado usando o conceito de potência útil e, para a configuração otimizada do coletor solar, foi 20,16%. Para a câmara de secagem, a configuração ótima obtida foi volume interno de 50 litros, tipo indireto e convecção forçada. O secador desenvolvido foi testado experimentalmente na secagem de abacaxi (Figura 2.14).

Figura 2.14 – Secador solar otimizado desenvolvido por Gomes (2021).



Fonte: Gomes, 2021.

2.5 O estado da arte para secadores com dessecante

Entre as inovações propostas neste trabalho, o uso de um material dessecante que auxilie o processo de secagem na redução do tempo de secagem e obtenção de um produto de ótima qualidade é uma das mais importantes.

A seguir, estão relacionados alguns resultados de pesquisas que aliam secagem solar e material dessecante.

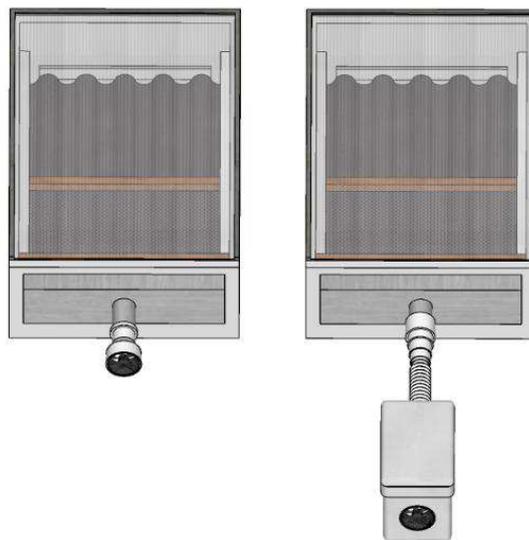
Chramsa-ard *et al.* (2013) avaliaram o desempenho de um secador solar híbrido auxiliado por um sistema de desumidificação do ar de secagem, constituído de bolsas de sílica gel. O sistema foi testado com e sem as bolsas de sílica e constatou-se que, no sistema com desumidificação, o tempo de secagem foi 20,83% mais curto, sendo as eficiências do coletor

solar e da câmara de secagem maiores do que no sistema sem desumidificação. Concluíram que, quando o ar de secagem passa pelo processo de desumidificação, fica mais seco, o que propicia condições mais favoráveis para o seu aquecimento e maior eficiência no processo de secagem quando comparado ao ar de secagem sem o uso do sistema de desumidificação associado.

Dina *et al.* (2015) avaliaram a eficácia de um secador solar contínuo, integrado ao armazenamento térmico dessecante, para a secagem de grãos de cacau. Foram usados dois tipos de dessecantes: peneira molecular (como adsorvente) e CaCl_2 (como absorvente). Nos experimentos de secagem sem o material dessecante, o processo durou 55 horas; nos experimentos com o adsorvente, durou 41 horas; e com o absorvente, 30 horas.

Fernandes (2021) desenvolveu dois secadores solares de exposição direta com área de exposição de $0,287 \text{ m}^2$ e o volume interno de $0,055 \text{ m}^3$ (55 litros), um deles conectado a uma unidade dessecante de volume de 5 litros. O dessecante utilizado foi a sílica gel. Os rendimentos térmicos dos equipamentos foram calculados através do balanço de energia e aplicação da primeira e segunda lei da termodinâmica, obtendo como resultados: 36,3% e de 32,6% no secador com unidade dessecante e no secador sem unidade dessecante, respectivamente. Os equipamentos foram testados na secagem de banana prata e a diferença no tempo de secagem variou de 60 a 240 minutos (Figura 2.15).

Figura 2.15 - Projetos dos secadores solares desenvolvidos por Fernandes (2021).



Fonte: Fernandes, 2021.

Costa *et al.* (2021) desenvolveram e testaram, na secagem de abacaxi, dois sistemas de secagem solar de exposição direta, com volume interno de 100 litros e cobertura transparente de 1 m². Para fins de comparação, um deles esteve integrado a uma unidade dessecante de 17 litros contendo 1,00 kg de sílica gel laranja (Figura 2.16). Os autores avaliaram o tempo de secagem e o rendimento térmico do equipamento, e os principais resultados experimentais mostraram que o ar ambiente, ao passar pela unidade dessecante, apresentava condições mais favoráveis para a realização do processo de secagem, a saber, maior temperatura e menor umidade relativa. Obteve-se redução de 60 minutos no tempo de secagem e não se observou significativa diferença nos rendimentos térmicos dos secadores.

Figura 2.16 – Sistemas de secagem solar desenvolvidos por Costa *et al.* (2021).



Fonte: Costa *et al.*, 2021.

2.6 O Sol como fonte de energia

Segundo o Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), que fica na cidade do Rio de Janeiro, a energia solar é a energia eletromagnética proveniente do Sol, produzida através de reações nucleares e que, propagando-se através do espaço interplanetário, incide na Terra.

As regiões desérticas do mundo são as que recebem maior incidência de radiação solar. Por exemplo, a região da cidade de Dongola, localizada no deserto Árábico, no Sudão do Sul, e a região de Dagget, no Deserto de Mojave, Califórnia, Estados Unidos. Referências de localidades excepcionalmente bem servidas de radiação solar.

O aproveitamento da energia solar, inesgotável em escala terrestre, tem se mostrado uma das alternativas mais promissoras para enfrentar os novos desafios energéticos que se apresentam.

Além disso, setores industriais, comerciais e de serviços têm se mostrado cada vez mais conscientes da necessidade de se promover o desenvolvimento sustentável. A preservação das condições ambientais, associada a uma produção com redução de custos e com maior rentabilidade, é o objetivo do mundo moderno.

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

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.

Dáí 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.

Segundo Gomes (2021), na restrição ao uso de energia de origem fóssil no processamento de alimentos, por determinação do Conselho Nacional de Petróleo, em 1980, foi vetada 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 encontrarem 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 e estar, portanto, imune às 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.

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.

2.6.1 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 em seu interior e alterando seu comprimento de onda, tendo como consequência o aumento da temperatura no interior do coletor. Esse fenômeno, conhecido como efeito estufa, é o princípio de funcionamento dos sistemas de aquecimento que utilizam energia solar fototérmica, como os secadores solar e os aquecedores de água residenciais.

2.6.2 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, e foi observado 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 colidem com os átomos do material do painel solar energizando-os provocando a quebra das ligações covalentes, criando assim uma nuvem eletrônica formada por elétrons livres, onde os mesmos são transferidos da banda de valência para a banda de condução, resultando no desenvolvimento de tensão elétrica entre dois eletrodos. Por meio de condutores externo à célula, conecta-se a camada negativa e a positiva a uma carga, gerando assim, um fluxo de elétrons na conexão, ou seja, uma corrente elétrica.

2.6.3 Movimento aparente do Sol

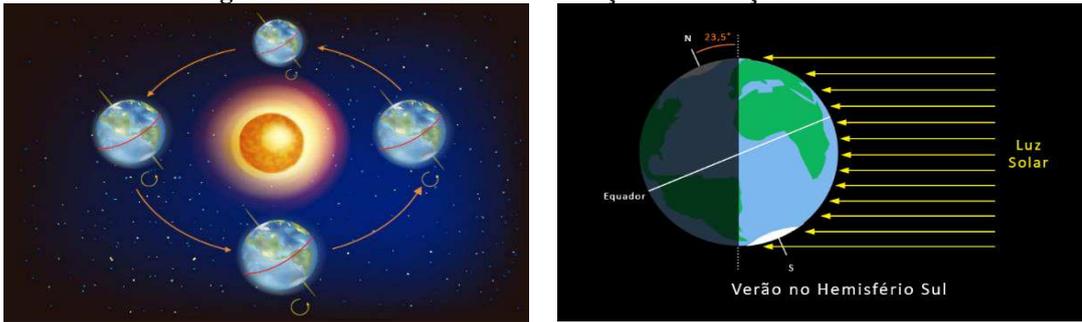
O posicionamento adequado do coletor solar é um dos responsáveis pela melhora no desempenho do equipamento. Para tanto, é importante compreender bem o movimento aparente do Sol para uma localidade na superfície da Terra em relação ao dia e ao longo do ano.

Para maximizar a obtenção da radiação solar, o coletor solar deve ser posicionado de forma que a incidência da radiação ocorra o mais perpendicularmente possível ao plano da sua superfície.

Devido ao movimento de translação e da declinação solar da Terra, cada hemisfério fica, alternadamente, mais exposto aos raios solares durante um período do ano. Para localidades posicionadas no hemisfério sul, como é o caso do estado da Paraíba, um coletor solar é posicionado voltado para a linha do Equador (Norte) na posição de receber a radiação solar com melhor ângulo de incidência no período de maior demanda de energia.

A Figura 2.17, ilustra o movimento de translação e a inclinação da Terra.

Figura 2.17 – Movimento de translação e inclinação da terra.



Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/solsticio.htm>

Segundo Grilo (2007), em cidades como Campina Grande/PB, os coletores de energia solar fixos devem ficar voltados para o norte com um ângulo de aproximadamente 17° a 22° que corresponde à soma da latitude local (7° sul) mais um ângulo de 10° ou 15° ; com isto, o coletor ficaria mais perpendicular à incidência de radiação solar, pois compensaria a inclinação da Terra, visto que esta é de $23,5^\circ$.

2.7 Planejamento experimental [*design of experiments*- DOE]

Nos dias atuais, a pesquisa científica tem propiciado significativos avanços tecnológicos e, com isso, tem gerado um número imensurável de dados e informações. Segundo Cunico *et al.* (2008), é indispensável a utilização de ferramentas estatísticas para a devida análise destes dados

A necessidade de otimizar produtos e processos tem levado cientistas a utilizarem técnicas sistemáticas de planejamento de experimentos (RODRIGUES E IEMMA, 2014; MONTGOMERY, 2017). Planejar experimentos é, de modo geral, definir uma sequência de coletas de dados experimentais para atingir certos objetivos.

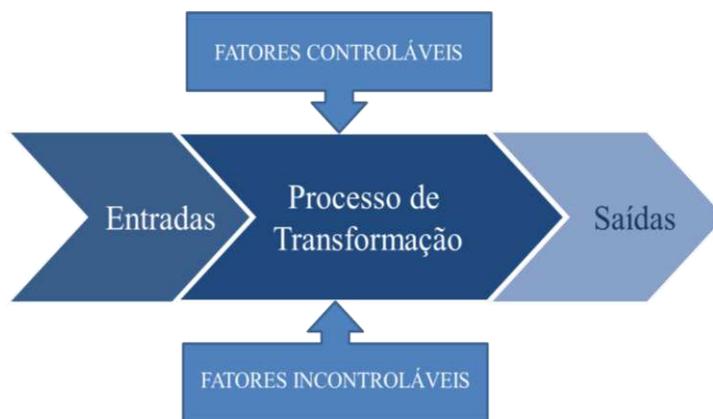
De acordo com Cunico *et al.* (2008), as desvantagens dos procedimentos de análise univariado, como a falta de análise de interações entre as variáveis, podem resultar numa otimização inadequada, o que seria evitado se empregados os sistemas de análise multivariados.

Entre os métodos de planejamento experimental disponíveis, o planejamento fatorial é o mais indicado quando se deseja analisar os efeitos de duas ou mais variáveis a partir de um número reduzido de experimento. Além disso, no planejamento experimental fatorial, em cada

réplica, todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável são investigadas (CUNICO *et al.*, 2008).

Segundo Gomes (2021), os experimentos planejados são uma poderosa ferramenta para melhoria de processos e produtos e 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 Figura 2.18.

Figura 2.18 - Modelo geral de um sistema de transformação.



Fonte: adaptado de Montgomery, 2017.

Segundo Montgomery (2017), a elaboração de um planejamento de experimentos deve seguir as etapas ordenadas a seguir:

- 1ª) Reconhecimento e relato do problema.** É necessário que fique claro qual o problema em questão e quais os objetivos alcançados com a solução deste problema.
- 2ª) Escolha dos fatores e dos níveis.** Deve-se escolher adequadamente os fatores (variáveis) e seus respectivos níveis, bem como observar os intervalos sobre os quais esses fatores irão variar. É fundamental investigar todos os fatores, não se deixando influenciar por experiências passadas.
- 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.

4ª) Escolha do planejamento experimental. A escolha do planejamento envolve diversos fatores como o tamanho da amostra, número de replicações, seleção de uma ordem adequada de rodadas para as tentativas experimentais, etc.

5ª) Realização do experimento. A realização do experimento precisa, fundamentalmente, ser monitorada para garantir que tudo esteja sendo feito de acordo com o planejamento.

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. Quando analisados os dados, deve-se registrar as conclusões obtidas a partir dos resultados de modo prático e claro. É importante, nesta etapa, recomendar ações visando resolver o problema. Métodos gráficos são, em geral, usados neste estágio, especialmente na apresentação dos resultados para outras pessoas.

2.8 Prospecção tecnológica

Partindo da iniciativa de buscar o que está sendo produzido sobre a temática de secagem por meio da utilização de secadores solares, 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.

Patente é uma concessão pública, concedida pelo Estado, que garante ao seu titular a exclusividade de explorar comercialmente sua invenção ou criação.

Os principais bancos de patentes são: Instituto Nacional de Propriedade Industrial –INPI (base nacional), a *United States Patent and Trademark Office* –USPTO (base norte americana), *European Patent Office* –Espacenet (base européia), *World Intellectual Property Organization* –WIPO (base mundial).

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 e traduzidos, consequentemente, 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, produtos com maior tempo de prateleira, entre outros fatores, as pesquisas e inovações acerca dos secadores solares veem crescendo ano após ano.

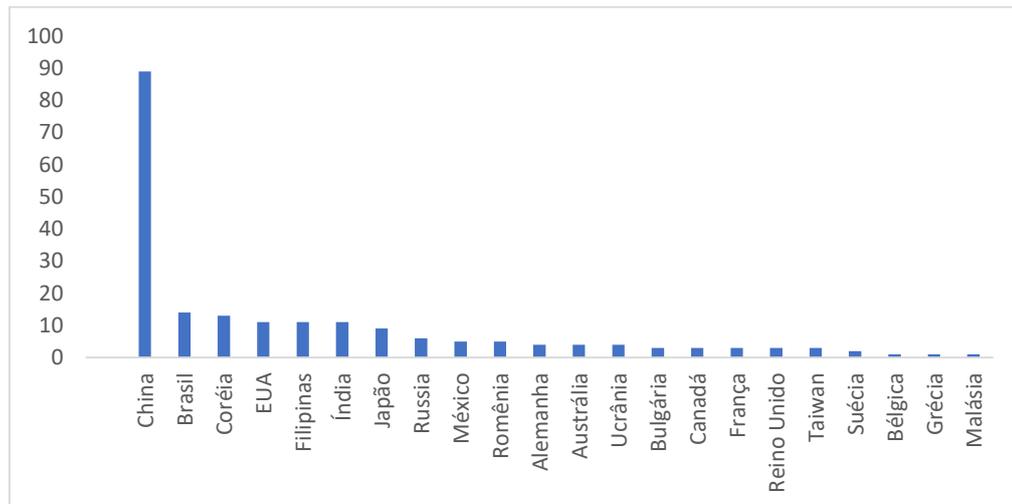
Na Tabela 2.2, são apresentados os resultados do levantamento realizado em 2020, estratificados de acordo com a base de dados e os termos empregado na busca. Na busca preliminar com as palavras-chaves, foram encontradas 599 patentes registradas na WIPO; 277 patentes registradas na Espacenet; 13 patentes registradas na USPTO e 13 patentes registradas no INPI. No entanto, um refinamento dos dados será feito a partir da análise das patentes por título e triagem a partir da leitura dos resumos. Serão excluídos os pedidos que contenham as palavras-chave pesquisadas, mas não relacionadas com os equipamentos pesquisados - qual seja: *equipamentos, secadores, solar*.

Tabela 2.2 - Registros de patentes.

Base de Dados	WIPO	Espacenet	USPTO	INPI
Número de Patentes	599	277	13	13

Fonte: Própria autora.

Apesar do Brasil ser um dos maiores produtores agrícolas e pecuária e estar em uma posição geográfica privilegiada em relação à incidência solar, as inovações registradas para secadores solares ainda são pouco expressivas se comparadas às da China, país recordista (disparada) de depósito de patentes, como mostra a Figura 2.19 trazida por Gomes (2021).

Figura2.19 - Distribuição de patentes por países.

Fonte: Gomes, 2021.

É possível notar 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, aparecem em 2º (segundo) lugar no número de patentes de secadores solares, 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).

2.9 A importância econômica e nutricional das frutas

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de frutas, só perdendo para a China e a Índia. A produção brasileira abastece principalmente o mercado interno, embora as frutas brasileiras façam sucesso no mundo todo. Além disso, projeções indicam que o consumo *per capita* de frutas, no Brasil e no mundo, deve continuar.

Atualmente, a fruticultura brasileira abrange em torno de 3 milhões de hectares cultivados, sendo responsável pela geração de, aproximadamente, seis milhões de empregos diretos. Há uma grande diversidade na produção de frutas no Brasil, já que as lavouras estão espalhadas por todas as regiões deste país de dimensões continentais. As frutas mais produzidas são: banana, laranja, uva, abacaxi, maçã e melancia (ABRAFRUTA, 2019).

Com um volume estimado de 44 milhões de toneladas produzidas, a fruticultura tem permitido ao país ocupar o terceiro lugar no ranking mundial de produtores de frutas, com uma produção que supera os US\$ 26 bilhões (IBGE, 2017). Conseqüentemente, este segmento está entre os principais geradores de renda, de empregos e de desenvolvimento rural.

Como citado por Gomes *et al.* (2014), 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.

Segundo Malta *et al.*, (2020), existem evidências convincentes de que o consumo de frutas e verduras também diminui o risco de diabetes e obesidade, além de sustentarem que as frutas têm 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 desperdício de alimentos em todas as etapas de produção e o aumento considerável da população mundial são fatores que contribuem para o problema da desnutrição humana. 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.

Para tanto, faz-se necessário o emprego de tecnologias de fácil domínio que promovam a diminuição do desperdício de frutas e hortaliças. Com essa iniciativa, haveria uma diminuição de custos operacionais e uma maior disponibilização de alimentos saudáveis ao consumidor, gerando uma melhor remuneração ao produtor rural e uma maior estabilização de preços ao consumidor.

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.

2.9.1 A banana

A banana é fruta de consumo universal, rica em carboidratos e potássio, médio teor em açúcares e vitamina A. A Figura 2.20, ilustra uma das variedades de banana mais consumidas no Nordeste brasileiro, a banana prata (*Musa spp*).

Figura 2.20 - *Musa spp* (banana).



Fonte: Própria autora.

A banana é produzida em todas as regiões brasileiras, em diferentes condições de clima, solo e níveis de produção, com maior destaque nas regiões Nordeste e Sudeste. Pode ser consumida *in natura*, frita, assada, cozida, em calda, em passas, como doces caseiros ou em produtos industrializados.

A banana madura, em geral, apresenta 19% de açúcares e 1% de amido. O fruto é basicamente composto de: água (70%); proteína (1,2%); carboidrato rico em fósforo (27%), apresentando regular teor de cálcio, ferro, cobre, zinco, iodo, manganês e cobalto, vitamina A, tiamina, riboflavina, niacina e vitamina C (LIMA, 1999). O alto teor de água inicial promove o crescimento microbiano, o que causa a degradação das suas características sensoriais, levando à perda do valor nutricional e, por conseguinte, perda no valor comercial.

As qualidades alimentícias e comerciais da banana são influenciadas pelas condições de amadurecimento e armazenamento. Isso porque a banana é um fruto climatérico. O ápice na taxa de respiração da banana corresponde ao estágio de maturidade comercial da fruta. Devido ao rápido amadurecimento da banana, a sua vida de prateleira é muito curta, sendo este processo percebido pelas manchas escuras que aparecem na casca da fruta. A técnica de processamento mais simples para banana é a obtenção da banana passa, obtida através do processo de secagem.

Em 2017, a produção mundial de banana atingiu aproximadamente 125,3 milhões de toneladas. Os quatro maiores produtores foram Índia, China, Indonésia e Brasil, sendo a China o maior consumidor mundial. O Brasil ocupou o 4º lugar no ranking mundial da produção de banana, com mais de 6,5 milhões de toneladas (FAO, 2017). Pelos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e estatística (IBGE), em 2019, a produção brasileira de banana já ultrapassou as 7 milhões de toneladas, com expectativas para crescimento em 2020.

Em 2019, o Nordeste produziu 40% da produção interna, sendo a região de maior produção no país; esta posição se deve ao estado da Bahia, que detém 1.152.483 toneladas de produção (IBGE, 2019).

2.9.2 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.

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

No processo de secagem, o açúcar natural da fruta se concentra com a retirada da água, obtendo-se um produto com cor e sabor acentuados. Portanto, a quantidade de açúcar natural da fruta será determinante para o sabor do produto final. De frutas com pouco açúcar, obtêm-se produtos descorados e menos doces e de frutas mais doces e maduras resultam produtos de cor escura e sabor mais adocicado (SOUSA, 2017).

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.

O processo de secagem permite estabilizar a atividade microbiológica 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 transporte e de armazenamento, sem afetar suas características organolépticas nem sua qualidade nutricional.

Mudanças químicas e físicas ocorrem no produto durante o processo de secagem, o que pode afetar a qualidade do produto em termos de valor nutricional, cor, aroma, sabor, textura. As frutas e hortaliças mais propensas às alterações provocadas pela secagem são os não-ácidos, com baixa acidez e ricos em açúcares, aminoácidos e lipídios (SOUSA, 2017). Isso mostra, mais uma vez, a importância do controle do processo de secagem na qualidade do produto final.

Todo processamento pós-colheita pode acarretar alterações no produto agrícola. Essas alterações devem ser minimizadas ao máximo e com cuidados adequados, conhecimento das características físico-química do produto, dimensionamento adequado do equipamento para o processamento (em especial na secagem, uma vez que tratamento térmico pode provocar alterações nos glicídios, proteínas, lipídios, vitaminas e aminoácidos) (LEITÃO, 1998).

Não sendo a secagem um processo que possa melhorar as qualidades nutricionais das frutas, torna-se importante conservar vitaminas e minerais de frutas e vegetais. A redução do valor nutritivo, por efeito da transformação dos alimentos, tem maior impacto nos países menos desenvolvidos, onde considerável parcela da população sofre com problemas alimentares devido à carência de determinados nutrientes (LEITÃO, 1998).

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.

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 a partir de 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 à 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

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, foi desenvolvido um sistema de secagem solar de exposição indireta, o qual foi testado com e sem unidade dessecante integrada. Os testes de secagem de banana prata foram realizados em diferentes condições meteorológicas nas cidades de Campina Grande e Pombal, ambas localizadas no estado da Paraíba.

Para determinar a melhor configuração da unidade dessecante e do coletor solar, foi utilizada a técnica do planejamento experimental. Com isso, foi possível analisar as influências de cada fator (variável) sobre o desempenho do equipamento. Os testes necessários à aplicação da técnica do planejamento experimental foram realizados em novembro de 2020, na cidade de Pombal.

Um total de 8 experimentos foram realizados na cidade de Campina Grande, sendo 4 realizados no sistema com unidade dessecante e 4 no sistema sem unidade dessecante. Em Pombal, foram realizados 8 experimentos, sendo 4 realizados no sistema com unidade dessecante e 4 no sistema sem unidade dessecante. Totalizando 16 experimentos, como mostrado na Tabela 3.1.

No mês de janeiro de 2021, foram realizados os testes de secagem referentes a condições meteorológicas típicas de cada região do período primavera/verão, uma vez que, no Nordeste brasileiro, as estações do ano não são bem definidas e as características climáticas da primavera e do verão são bem similares.

Nos meses de março, abril e julho de 2021, foram realizados os testes de secagem referentes a condições meteorológicas típicas de cada região do período outono/inverno, uma vez que as características climáticas destas estações são similares.

Nos testes de secagem realizados, foram analisados o decaimento de massa das amostras de banana, o tempo de secagem, as condições climáticas durante o processo de secagem, o rendimento térmico dos equipamentos e o ajuste dos dados experimentais de cinética de secagem aos modelos matemáticos de Page e de Midilli *et al.*

Os testes de secagem estão identificados como na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Identificação dos experimentos de secagem.

Abreviatura	Descrição	Data de realização
ECG1 _{com}	Primeiro experimento realizado em Campina Grande no sistema com unidade dessecante	18 e 19 de janeiro de 2021
ECG1 _{sem}	Primeiro experimento realizado em Campina Grande no sistema sem unidade dessecante	18 e 19 de janeiro de 2021
ECG2 _{com}	Segundo experimento realizado em Campina Grande no sistema com unidade dessecante	20 e 21 de janeiro de 2021
ECG2 _{sem}	Segundo experimento realizado em Campina Grande no sistema sem unidade dessecante	20 e 21 de janeiro de 2021
ECG3 _{com}	Terceiro experimento realizado em Campina Grande no sistema com unidade dessecante	29,30 de abril e 01 de maio de 2021
ECG3 _{sem}	Terceiro experimento realizado em Campina Grande no sistema sem unidade dessecante	29,30 de abril e 01 de maio de 2021
ECG4 _{com}	Quarto experimento realizado em Campina Grande no sistema com unidade dessecante	08 e 09 de julho de 2021
ECG4 _{sem}	Quarto experimento realizado em Campina Grande no sistema sem unidade dessecante	08 e 09 de julho de 2021
EPM1 _{com}	Primeiro experimento realizado em Pombal no sistema com unidade dessecante	24 e 25 de janeiro de 2021
EPM1 _{sem}	Primeiro experimento realizado em Pombal no sistema sem unidade dessecante	24 e 25 de janeiro de 2021
EPM2 _{com}	Segundo experimento realizado em Pombal no sistema com unidade dessecante	27 e 28 de janeiro de 2021
EPM2 _{sem}	Segundo experimento realizado em Pombal no sistema com unidade dessecante	27 e 28 de janeiro de 2021
EPM3 _{com}	Terceiro experimento realizado em Pombal no sistema com unidade dessecante	23 e 25 de março de 2021
EPM3 _{sem}	Terceiro experimento realizado em Pombal no sistema sem unidade dessecante	23 e 25 de março de 2021
EPM4 _{com}	Quarto experimento realizado em Pombal no sistema com unidade dessecante	26 e 27 de março de 2021
EPM4 _{sem}	Quarto experimento realizado em Pombal no sistema sem unidade dessecante	26 e 27 de março de 2021

Fonte: Própria autora.

Os dados obtidos experimentalmente, nas secagens, foram analisados a partir do tratamento estatístico através do Excel 2013 e a plotagem das curvas de cinética de secagem no software *Statistica*, versão 10.0.

3.1 Caracterização dos locais dos experimentos e dados meteorológicos

Os estudos foram realizados no Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas (LEMT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em Campina Grande, PB. Os testes experimentais foram realizados no LEMT e no Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar (CCTA) Campus da UFCG na cidade de Pombal, PB, conforme Figuras 3.1 e 3.2.

Figura 3.1 - Entrada da UFCG e edifício Júlio Goldfarb (sede do LEMT).



Fonte: Própria autora.

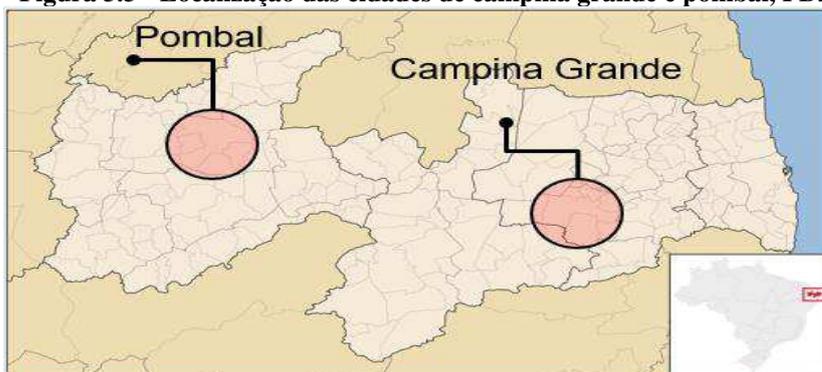
Figura 3.2 -Entrada principal do campus da UFCG em Pombal, PB.



Fonte: Própria autora.

Na Figura 3.3, é possível observar em destaque a localização, no mapa do Estado da Paraíba, das cidades de Campina Grande e Pombal.

Figura 3.3 - Localização das cidades de Campina Grande e Pombal, PB.



Fonte: Adaptado de https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Paraiba_MesoMicroMunicip.svg

Campina Grande localiza-se na mesorregião do Agreste paraibano, nas coordenadas geográficas de $7^{\circ}13'51''$ Sul de latitude e $35^{\circ}52'54''$ Oeste de longitude. Já o município de Pombal está situado na área geográfica de abrangência do semiárido brasileiro, na mesorregião do Sertão paraibano, distante cerca de 250 km de Campina Grande, localizado nas coordenadas geográficas de $6^{\circ}46'13''$ Sul de latitude de $37^{\circ}48'06''$ Oeste de longitude.

Os dados de radiação solar para os dias de experimentos realizados na cidade de Campina Grande foram obtidos na estação do INMET localizada nessa cidade, estação A313, fundada em 22/12/2006. Como na cidade de Pombal não há estação meteorológica que possa fornecer os dados de radiação solar incidente nos dias de realização dos experimentos, as estações mais próximas são as do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), instaladas nas cidades de São Gonçalo, PB (cuja localização é latitude $6^{\circ}46'4''$ Sul e longitude $38^{\circ}12'36''$ Oeste) e Patos, PB (cuja localização é latitude $7^{\circ}1'32''$ Sul e longitude $37^{\circ}16'40''$ Oeste).

Em São Gonçalo, fica a estação de código A333, fundada em 06/11/2007. Em Patos, está a estação de código A321, fundada em 21/07/2007. Além disso, a cidade de Pombal, fica entre estas duas cidades; assim, optou-se por calcular uma média entre os dados de radiação solar obtidos nestas duas estações nos dias de testes realizados em Pombal. Estes valores foram utilizados, por exemplo, para calcular o rendimento térmico dos equipamentos testados.

3.2 Os sistemas de secagem propostos e os materiais utilizados

Para desenvolver um equipamento de secagem para produtores que trabalham em regime de agricultura familiar — mais especificamente, os produtores do interior do Nordeste brasileiro

— os materiais utilizados para sua construção e implantação precisam, necessariamente, ser economicamente e tecnologicamente viável.

Tendo por objetivo desenvolver um sistema de secagem que será utilizado na produção de frutas secas e considerando condições de secagem com parâmetros máximos e mínimos de temperatura, afim de evitar a caramelização ou a reidratação, além de observar os modelos já desenvolvidos, ou em desenvolvimento, foi possível fazer um levantamento de especificações dos modelos mais adequados e, assim, implementar mudanças que possam levar a melhorias do equipamento ou do processo de secagem.

Foram desenvolvidos dois sistemas de secagem solar de exposição indireta que possuem coletor solar plano idênticos e câmara de secagem também idênticas, sendo que se diferenciam pelo fato de um destes sistemas ter uma unidade dessecante integrada.

Entre os modelos já desenvolvidos que se enquadram nas especificações estabelecidas, optou-se por um sistema de secagem solar de exposição indireta, composto por coletor solar e câmara de secagem produzidos de polietileno estendido (isopor) e revestidos interna e externamente de alumínio que funciona como trocador de calor, além de auxiliar na sustentação da estrutura.

A partir disso, propôs-se a metodologia do planejamento experimental para refinar outras especificações, tais como: material para a cobertura transparente e a inserção ou não de uma telha de zinco pintada de preto fosco, utilizada como capacitor térmico para o coletor solar. A técnica do planejamento experimental também foi utilizada para analisar quais fatores de dimensionamento e organização são estatisticamente significantes na determinação da melhor configuração da unidade dessecante.

3.2.1 Sistema de medição e aquisição de dados - SMAD

O arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto baseado em *hardware* e *software*. Seu uso tem sido amplamente difundido nos últimos tempos.

O arduino Uno possui 14 pinos digitais e 6 pinos analógicos, enquanto o arduino Mega possui 54 pinos digitais e 16 analógicos. O arduino Mega tem por base o microcontrolador ATmega2560 e é indicado para projetos maiores e que exigem maior memória interna. Para

obtenção dos dados de temperatura e umidade relativa do ar, foram utilizados sensores DHT22 cujas especificações encontram-se no Apêndice A.

Para esta pesquisa, foram desenvolvidos dois sistemas de medição e aquisição de dados. No SMAD, utilizado para os testes experimentais com o coletor solar e a unidade dessecante, foi utilizado o arduino Uno e, nos testes de secagem, foi utilizado o arduino Mega.

A Figura 3.4 ilustra o arduino Uno, o Arduino Mega e o sensor DHT22 que foram utilizados no desenvolvimento do sistema de medição e aquisição de dados e obtenção e dos dados de temperatura e umidade relativa do ar nos pontos pré-determinados em cada experimento.

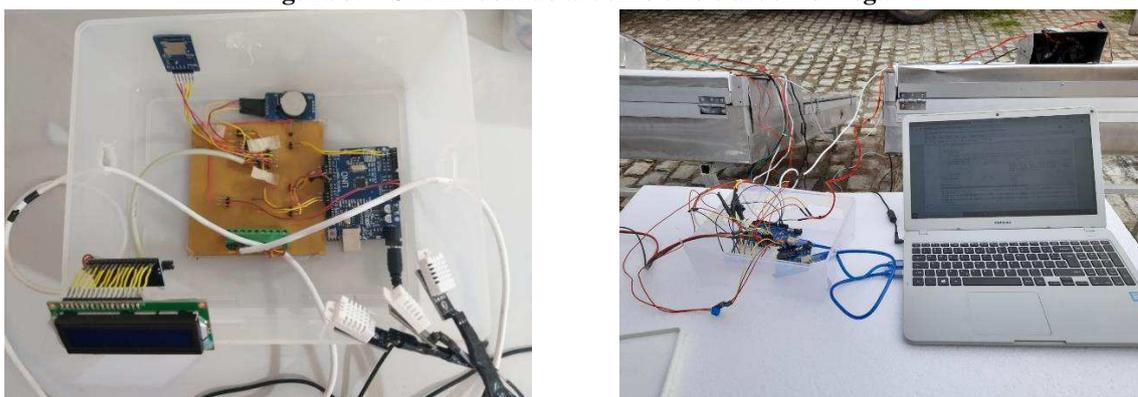
Figura 3.4 - Arduino uno, arduino mega e sensor tipo dht22.



Fonte: Própria autora.

Na Figura 3.5, são apresentados os SMAD desenvolvidos, em operação.

Figura 3.5- SMAD usando arduino uno e arduino mega.



Fonte: Própria autora.

3.3 Planejamento experimental fatorial proposto

O planejamento experimental foi conduzido a partir da predeterminação de níveis, superior (+1) e inferior (-1) para cada fator (variável), denotando um esquema fatorial completo por 2^K . No entanto, como o número de ensaios cresce exponencialmente à medida que se aumenta o número de variáveis, faz-se necessário a realização de delineamentos prévios que levem a respostas experimentais ótimas, mesmo com um número reduzidos de experimentos.

3.3.1 Planejamento experimental fatorial para a unidade dessecante

Tendo em vista o interesse em desenvolver uma unidade dessecante capaz de reduzir a umidade relativa do ar através da remoção de parte do vapor de água nele presente, utilizou-se a técnica de planejamento experimental fatorial para determinar sua configuração otimizada.

Inicialmente, selecionou-se um material isolante para a unidade dessecante, uma vez que ficaria exposta à radiação solar e ao aquecimento da sílica gel (o que provocaria diminuição na sua capacidade de adsorção de água). A caixa de polietileno (isopor), comercializada no mercado popular, foi escolhida para ser testada como unidade dessecante devido à sua capacidade de isolamento térmico, facilidade de manuseio e baixo preço. Foram selecionadas caixas com volumes de 7 e 24 litros.

Como dessecante, foi escolhida uma mistura de sílica gel na cor laranja e transparente, por serem atóxicas — quesito fundamental por se tratar de secagem de alimentos. A mistura consiste numa proporção de 2/5 de sílica gel transparente e 3/5 de sílica gel laranja (uma proporção metade/metade também poderia ser utilizada). Esta medida foi pensada como alternativa para baratear custos com o dessecante, sem prejuízo de eficiência. A importância da sílica gel laranja na mistura é tornar possível o acompanhamento da saturação do dessecante a partir de observações empíricas, uma vez que a sílica gel laranja apresenta a característica de mudar de cor quando adsorve água, passando de laranja para verde escuro.

Em todos os testes, foram utilizados 1.000,00 g de sílica gel. Esta massa pré-fixada teve por base o trabalho de Fernandes (2021), que utilizou sílica gel laranja como dessecante do ar de secagem em um sistema de secagem solar de exposição direta, obtendo resultados satisfatórios. A pesagem do dessecante foi feita numa balança digital como a apresentada na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Balança digital usada na pesagem da sílica gel.



Fonte: Própria autora.

Na unidade dessecante de 7 litros, foi usado um *cooler* de 0,08 m de diâmetro e 12 V de tensão para forçar a entrada do ar ambiente na caixa. Uma bandeja de tela metálica com contornos e pés de cantoneiras, com dimensões de 0,78 m por 0,44 m, foi instalada na unidade a uma altura de 0,08 m (acima do *cooler*) e nele foram depositados os 1.000,00 g de sílica gel, sendo este um teste com apenas uma bandeja. Quando testada com duas bandejas, a segunda bandeja ficou localizada a 0,04 m de altura em relação a de baixo, sendo que, em cada bandeja, eram depositados 500,00 g do dessecante.

Na unidade dessecante de 24 litros, foi utilizado um *cooler* de 0,12 m de diâmetro e 12 V de tensão. Bandejas com dimensões de 0,19 m por 0,39 m foram produzidas e instaladas na unidade dessecante (uma ou duas, dependendo do experimento).

Na Figura 3.7, são apresentados detalhes das bandejas e das unidades dessecantes em experimentação.

Figura 3.7 - Bandeja de tela e estrutura de cantoneiras.



Fonte: Própria autora.

Identificar qual configuração da unidade dessecante permite obter maior adsorção de vapor d'água pelo dessecante é o objetivo deste planejamento. Por esta razão, a massa de água adsorvida no dessecante, ao fim de cada ensaio experimental, foi estudada como resposta do planejamento experimental fatorial.

As variáveis escolhidas para análise foram: velocidade do ar, número de bandejas e volume interno da unidade dessecante.

A escolha dos níveis da velocidade se justifica pelo fato de que os processos de secagem de frutas, em geral, são realizados com velocidade do ar entre 1 m/s e 2 m/s. Já a escolha pelos níveis — uma ou duas bandejas para o depósito da sílica gel e 7 ou 24 litros de volume interno para a unidade dessecante — se dá pela necessidade de determinar se o modo como esses 1.000,00 g de dessecante estão dispostos têm ou não influência na sua capacidade de adsorver vapor de água do ar.

A codificação das variáveis com seus respectivos níveis na unidade dessecante ficou:

- **Velocidade do ar (variável A):** -1 [1 m/s] e +1 [2 m/s];
- **Número de bandejas (variável B):** -1 [1 bandeja] e +1 [2 bandejas];
- **Volume interno (variável C):** -1[7 litros] e +1[24 litros].

Assim, é possível montar 08 (oito) configurações diferentes para a unidade dessecante e distribuí-las da seguinte forma:

a) Unidade dessecante 1 (UD1):

Velocidade do ar de 1 m/s, 1 bandeja e volume interno de 7 litros.

b) Unidade dessecante 2 (UD2):

Velocidade do ar de 2 m/s, 1 bandeja e volume interno de 7 litros.

c) Unidade dessecante 3 (UD3):

Velocidade do ar de 1 m/s, 2 bandejas e volume interno de 7 litros.

d) Unidade dessecante 4 (UD4):

Velocidade do ar de 2 m/s, 2 bandejas e volume interno de 7 litros.

e) Unidade dessecante 5 (UD5):

Velocidade do ar de 1 m/s, 1 bandeja e volume interno de 24 litros.

f) Unidade dessecante 6 (UD6):

Velocidade do ar de 2 m/s, 1 bandeja e volume interno de 24 litros.

g) Unidade dessecante 7 (UD7):

Velocidade do ar de 1 m/s, 2 bandejas e volume interno de 24 litros.

h) Unidade dessecante 8 (UD8):

Velocidade do ar de 2 m/s, 2 bandejas e volume interno de 24 litros.

A velocidade do ar foi obtida com anemômetro digital da marca BTmeter, modelo BT100, apresentado na Figura 3.8. A velocidade do ar foi medida a cada 30 minutos durante a realização dos experimentos, de modo a verificar os valores estipulados.

Figura 3.8 - Anemômetro digital



Fonte: Própria autora.

O modelo de matriz do planejamento experimental codificada, para a unidade dessecante, encontra-se na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Modelo de matriz do planejamento experimental codificada para a unidade dessecante.

	Velocidade do ar (m/s)	Número de bandejas	Volume interno (l)	Massa de água adsorvida (g)	Massa de água adsorvida (g)
UD1	-1	-1	-1		
UD2	+1	-1	-1		

UD3	-1	+1	-1
UD4	+1	+1	-1
UD5	-1	-1	+1
UD6	+1	-1	+1
7UD	-1	+1	+1
UD8	+1	+1	+1

Fonte: Própria autora.

Em todos os experimentos a massa inicial de sílica gel foi de 1.000,00 g, distribuídos em uma (01) bandeja de 1.000,0 g ou duas (02) bandejas de 500,0 g, dependendo do experimento a ser realizado. Todos os experimentos tiveram duração de aproximadamente 3 horas, sendo realizadas exatas 181 leituras de temperatura e umidade relativa pelos sensores do tipo DHT22 na entrada (onde mediu-se a umidade relativa do ar ambiente – URa e a temperatura do ar ambiente - Ta) e na saída (onde mediu-se a umidade relativa do ar de saída – URsUD e a temperatura do ar de saída - TsUD) da unidade dessecante.

Visto ser inviável realizar todos os testes e suas respectivas réplicas ao mesmo tempo e ser imprescindível que estes fossem realizados sob mesmas condições de temperatura e umidade relativa, foi necessária a criação de um ambiente controlado, que permitisse a realização dos testes sob condições semelhantes, mesmo em dias e horários diferentes. Para isto, foram utilizados um ar condicionado da marca Samsung 9 000 btus e um umidificador de ar da marca ventisol ligados em uma sala de 3 m por 4 m por 2,65 m de altura, totalizando um volume de 31,8 m³, para manter a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar com o mínimo de variação possível.

Dos 2.896 dados de temperatura do ar ambiente e de umidade relativa do ar ambiente gerados foram calculados a média, a variância, o desvio padrão e o coeficiente de variação com a finalidade de assegurar que os experimentos e suas réplicas foram realizados sob condições similares, fato necessário para que a interpretação dos resultados não seja prejudicada pelo fato destes testes não terem sido realizados simultaneamente e para que possa ser realizado um planejamento experimental adequado para determinar a configuração ótima para a unidade dessecante em questão.

Para cada configuração de unidade dessecante, foram realizados 2 experimentos. Nestes experimentos as leituras dos dados de temperatura e umidade relativa foram realizadas a cada um minuto e estes são mostrados em um display de LCD, além de serem gravados em periférico de armazenamento do tipo cartão de memória.

3.3.2 Planejamento experimental fatorial para o coletor solar

Segundo Oliveira *et al.* (2018), o coletor solar é o principal componente de um secador solar, uma vez que atua diretamente na captação da radiação solar e sua posterior conversão em energia térmica.

Para determinar a melhor configuração do coletor solar, foi utilizado o planejamento experimental fatorial por ser capaz de identificar os fatores ou combinação de fatores mais relevantes para a resposta do experimento (PERALTA-ZAMORA *et al.* 2005; CUNICO *et al.* 2008).

As principais características construtivas do coletor solar encontram-se na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Principais características construtivas do coletor solar.

Coletor solar			
Descrição do item	Observação	Volume (L)	Área (m²)
Materiais	Isopor de 0,02 m e chapas de alumínio (revestimento interno e externo)	-	-
Acabamento	Cantoneiras de alumínio e pintura interna de preto fosco	-	-
Dimensões internas	0,8 m (L) x 1,25 m (C) x 0,10 m (A)	100	-
Cobertura transparente	0,8 m (L) x 1,25 m (C)		1
Entrada de ar	Circular (duas): 0,025		0,001963
Saída de ar	Retangular: 0,70 x 0,4		0,028

Fonte: Própria autora.

A Figura 3.9 ilustra a estrutura interna do coletor solar que foi construída com isopor e revestimento com alumínio. Sua finalidade foi sustentar a estrutura e auxiliar no processo de troca de calor com o ar circundante.

Figura 3.9 - Estrutura interna do coletor solar.



Fonte: Própria autora.

Identificar qual configuração do coletor solar permite obter maiores aumentos de temperatura é o objetivo deste planejamento. Por esta razão, a diferença de temperatura entre o ar de saída do coletor solar e o ar ambiente (ΔT), ao fim de cada ensaio experimental, será estudada como resposta do planejamento experimental.

As variáveis estudadas foram: capacitor térmico e cobertura transparente, uma vez que estas podem ser variáveis que promovem maior aumento de temperatura no coletor solar.

Testou-se, como capacitor térmico, uma telha ondulada de zinco pintada de preto fosco. A telha ondulada, mesmo possuindo as mesmas dimensões da base do coletor, possui maior área superficial e suas ondulações provocam maior turbulência do ar dentro do coletor, o que pode levar a maiores ganhos de temperatura.

Testou-se plástico estufa e policarbonato alveolar como cobertura transparente. A justificativa para a utilização do policarbonato alveolar na cobertura do coletor solar deve-se à observância de que, na literatura, o mesmo se apresenta como o mais utilizado em diversos trabalhos desenvolvidos.

A justificativa para a utilização do plástico estufa na cobertura do coletor solar deve-se ao seu custo que, em comparação ao policarbonato alveolar, é significativamente mais barato. Assim, um estudo sistemático de comparação entre estes materiais tornou-se importante.

Nas coberturas do coletor solar, construídas de plástico estufa e policarbonato alveolar, foram utilizadas cantoneiras em U de 0,01 m de espessura para a moldura e cola de silicone para vedar a saída de ar. As coberturas possuem 1,30 m de comprimento e 0,85 m de largura, com área de incidência de radiação solar de 1 m², uma vez que a área transparente possui 1,25 m de comprimento e 0,80 m de largura.

A partir do estudo de duas variáveis, foi possível montar quatro configurações diferentes para o coletor solar, ficando distribuídas da seguinte forma:

a) **Coletor solar 1 (CS1):**

Coletor sem capacitor térmico e com cobertura de plástico estufa;

b) **Coletor solar 2 (CS2):**

Coletor com capacitor térmico e com cobertura de plástico estufa;

c) **Coletor solar 3 (CS3):**

Coletor sem capacitor térmico e com cobertura de policarbonato alveolar;

d) **Coletor solar 4 (CS4):**

Coletor com capacitor térmico e com cobertura de policarbonato alveolar.

A codificação das variáveis com seus respectivos níveis, no coletor solar, ficou:

- **Capacitor térmico (variável A):** -1 [sem] e +1 [com];
- **Cobertura transparente (variável B):** -1 [plástico] e +1 [policarbonato];

O modelo de matriz do planejamento experimental está na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Modelo de matriz do planejamento experimental codificada para o coletor solar.

	Capacitor térmico	Cobertura Transparente	ΔT_{EXP1} (°C)	ΔT_{EXP2} (°C)	ΔT_{EXP3} (°C)
CS1	-1	-1			
CS2	+1	-1			
CS3	-1	+1			
CS4	+1	+1			

Fonte: Própria autora.

Como foram estudadas duas variáveis, o número de experimentos foi de $2^2 = 4$ e cada experimento contou com duas réplicas, totalizando 12 experimentos.

Na Figura 3.10, pode-se observar os dois coletores solares durante a realização de um dos experimentos. É possível observar que um deles possui cobertura de plástico estufa e o outro possui cobertura de policarbonato alveolar. Pode-se observar, ainda nesta imagem, a caixa suporte para o SMAD.

Na Figura 3.11, são apresentados detalhes da telha de zinco pintada de preto fosco. Esta telha possui as mesmas dimensões da base do coletor solar, a saber, 1,25 m de comprimento por 0,80 m de largura.

Figura 3.10 - Coletores solares com cobertura de plástico estufa e de policarbonato.



Fonte: Própria autora.

Figura 3.11 - Telha de zinco pintada de preto fosco.



Fonte: Própria autora.

Segundo Grilo (2007), para um secador solar plano, fixo e localizado no hemisfério Sul obter uma melhor captação de radiação solar incidente ao longo ao ano, recomenda-se que seja posicionado voltado para o Norte geográfico, com inclinação à latitude local somada a uma inclinação de 10° a 15° . Esta estratégia garante melhor eficiência energética do equipamento durante o inverno (entre junho e setembro).

Como as cidades de Pombal e Campina Grande estão localizados a aproximadamente 7° Sul, os sistemas de secagem solar foram posicionados a 22° ($7^\circ + 15^\circ$) e voltados para o Norte, em ambas as cidades. Uma estrutura metálica foi construída para servir de base aos sistemas de secagem (Figura 3.12).

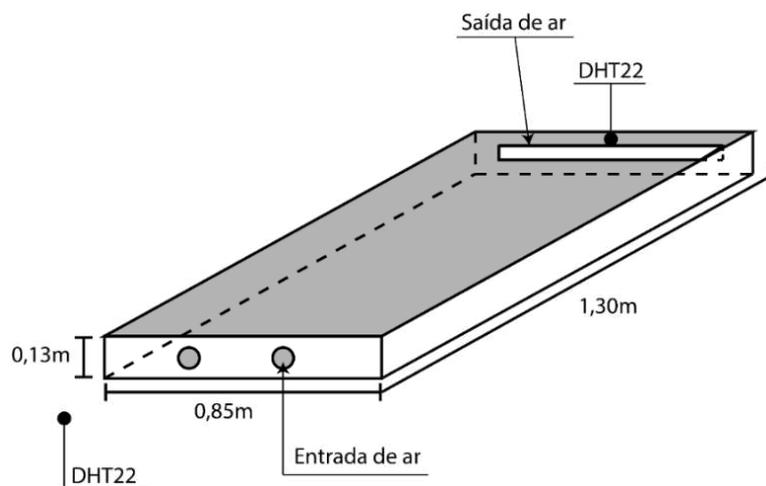
Figura 3.12 - Suporte metálico para um sistema de secagem.



Fonte: Própria autora.

Na Figura 3.13, são apresentadas as dimensões externas do coletor solar plano desenvolvido e, para monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar ambiente e do ar de saída do coletor solar, fez-se o posicionamento dos sensores DHT22 nos pontos indicados na mesma figura.

Figura 3.13 - Desenho esquemático do coletor solar e posição dos sensores.



Fonte: Própria autora.

Os experimentos foram realizados entre os dias 01 e 30 de novembro de 2020, uma vez que seria quase impossível realizar os 12 (doze) ensaios no mesmo dia e horário. Os testes foram realizados entre 10 e 14 horas, horários de maior incidência de radiação solar e consequente ganho de temperatura, ou seja, com duração de 4 horas. Dos 2.892 dados de temperatura do ar ambiente e da umidade relativa do ar ambiente gerados, divididos em intervalos de uma hora (60 minutos), foram calculados a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos dados.

Nestes experimentos, a leitura dos dados de temperatura e umidade relativa foi realizada a cada um minuto e estas são mostrados em um *display* de LCD, além de serem gravadas em armazenamento periférico do tipo cartão de memória.

3.3.3 Câmara de secagem e sistema de convecção do ar

Após aplicação do planejamento experimental para determinar a melhor configuração para o coletor solar, foram produzidas duas câmaras de secagem. Estas foram construídas com os mesmos materiais que os utilizados nos coletores (isopor e alumínio), com dimensões internas 0,80 m de largura, 0,45 m de comprimento e 0,14 m de altura, totalizando 0,05 m³ ou 50 litros (metade do volume do coletor solar).

A câmara é acoplada ao coletor solar e, para garantir a vedação entre os dois equipamentos, foi colocada uma fita adesiva emborrachada. O ar de secagem que sai do coletor

por uma abertura retangular entra na câmara de secagem por uma abertura retangular nas mesmas dimensões.

O ar sai da câmara por uma abertura de 0,08 m por 0,08 m de dimensões localizada em seu teto. Nesta abertura, estão fixados dois *coolers* de 0,08 m de diâmetro e 12 V de tensão que são responsáveis por fazer a convecção forçada do ar de secagem. A velocidade do ar foi medida com o anemômetro da Figura 3.5 em intervalos de 1 hora.

Na Figura 3.14, é apresentado a câmara de secagem desenvolvida com destaque para o sistema exaustor constituídos de dois *coolers* de 0,08 m cada e 12 V de tensão.

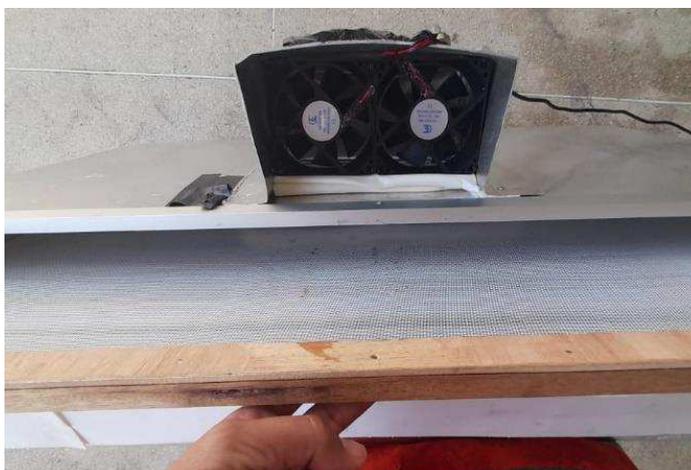
Figura 3.14 - Câmara de secagem e sistema exaustor.



Fonte: Própria autora.

Na câmara de secagem, foi instalada uma bandeja feita de *nylon* e madeira, com dimensões de 0,79 m de largura e 0,44 m de comprimento, totalizando uma área de 0,35 m², aproximadamente. Nesta bandeja, foram dispostas as amostras de banana para a realização dos testes (Figura 3.15).

Figura 3.15 - Bandeja na câmara de secagem.



Fonte: Própria autora.

3.4 Testes de secagem

Após o desenvolvimento do SMAD, com as determinações das configurações ótimas para a unidade dessecante e para o coletor solar e a construção de duas câmaras de secagem, foram montados dois sistemas de secagem solar cujas características construtivas encontram-se na Tabela 3.5.

Como pode-se observar na Tabela 3.5, um dos sistemas de secagem consiste em uma unidade dessecante, um coletor solar plano e uma câmara de secagem (S_{com} – sistema de secagem solar com unidade dessecante), enquanto o segundo sistema de secagem é constituído de um coletor solar plano e uma câmara de secagem (S_{sem} – sistema de secagem solar sem unidade dessecante).

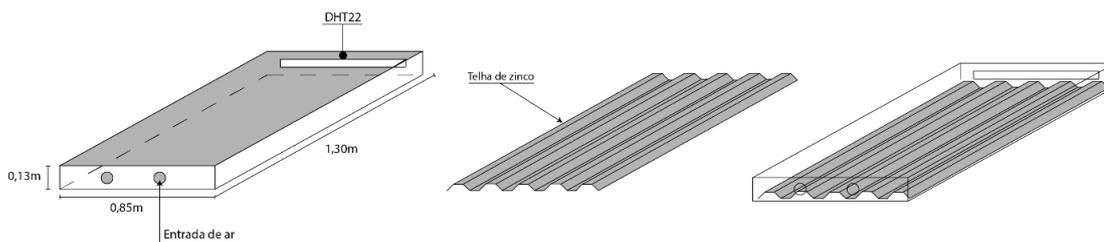
Vale ressaltar que, em ambos os sistemas, os coletores e as câmaras são idênticos. Nas Figuras 3.16 e 3.17, são apresentados os desenhos esquemáticos do coletor solar com e sem a telha de zinco pintada de preto fosco e da câmara de secagem.

Tabela 3.5 - Principais características construtivas dos sistemas de secagem solar.

	S_{com}	S_{sem}
Coletor solar	Apresentadas na tabela 3.2	Apresentadas na tabela 3.2
Câmara de secagem	Volume: 50 l Corpo: Isopor Revestimento: Alumínio Entrada de ar: 0,70 m x 0,04 m Saída de ar: 0,16 m x 0,08 m Bandejas: 1	Volume: 50 l Corpo: Isopor Revestimento: Alumínio Entrada de ar: 0,70 m x 0,04 m Saída de ar: 0,16 m x 0,08 m Bandejas: 1
Unidade dessecante	Corpo: isopor	Sem
SMAD	Arduino e sensores DHT22	Arduino e sensores DHT22
Sistema exaustor	2 coolers de 0,08 m e 12 V	2 coolers de 0,08 m e 12 V

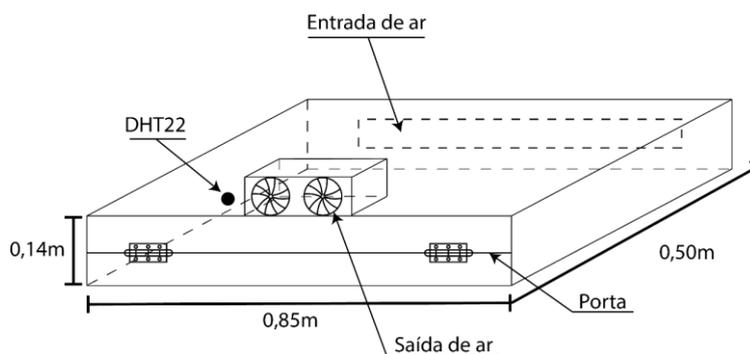
Fonte: Própria autora.

Figura 3.16 - Desenho esquemático do coletor solar e da telha de zinco.



Fonte: Própria autora.

Figura 3.17 - Desenho esquemático da câmara de secagem.



Fonte: Própria autora.

Os testes dos sistemas de secagem desenvolvidos foram realizados nas cidades de Campina Grande e Pombal, com início às 08:00 h. Às 16:00 h, o experimento foi interrompido devido à queda na intensidade de incidência de radiação solar. As amostras de banana foram cuidadosamente guardadas em embalagens hermeticamente fechadas e identificadas (cf. Figura 3.18). O experimento é retomado no dia seguinte, também às 08:00 h, e finalizado às 16:00 h, com exceção dos experimentos ECG3com e ECG3sem, devido às chuvas.

Figura 3.18 – Amostras embaladas para continuação do experimento de secagem.



Fonte: Própria autora.

Sensores do tipo DHT22 foram utilizados para medir a temperatura e a umidade relativa do ar em pontos estratégicos, como:

No sistema Scom:

- Ar ambiente (temperatura do ar ambiente - T_a e Umidade relativa do ar ambiente - UR_a);
- Ar de saída da unidade dessecante (Temperatura do ar na saída da unidade dessecante - T_{sUD} - e umidade relativa do ar na saída da unidade dessecante - UR_{sUD});
- Ar de saída do coletor solar (Temperatura do ar na saída do coletor solar do sistema de secagem com unidade dessecante - T_{sCcom} - e umidade relativa do ar na saída do coletor solar do sistema de secagem com unidade dessecante - UR_{sCcom});
- Ar de saída da câmara de secagem (Temperatura do ar na saída da câmara de secagem do sistema de secagem com unidade dessecante - T_{sKcom} - e umidade relativa do ar na saída da câmara de secagem do sistema de secagem com unidade dessecante - UR_{sKcom}).

Considerou-se que:

- A temperatura e a umidade relativa do ar na entrada da unidade dessecante são as mesmas do ar ambiente ($T_{eUD} = T_a$ e $UR_{eUD} = UR_a$);
- A temperatura e a umidade relativa do ar na entrada do coletor solar é a mesma temperatura e a mesma umidade relativa do ar na saída da unidade dessecante ($T_{eCcom} = T_{sUD}$ e $UR_{eCcom} = UR_{sUD}$);
- A temperatura e a umidade relativa do ar na entrada da câmara de secagem é a mesma temperatura e a mesma umidade relativa do ar na saída do coletor solar ($T_{eKcom} = T_{sCcom}$ e $UR_{eKcom} = UR_{sCcom}$).

E no sistema Ssem:

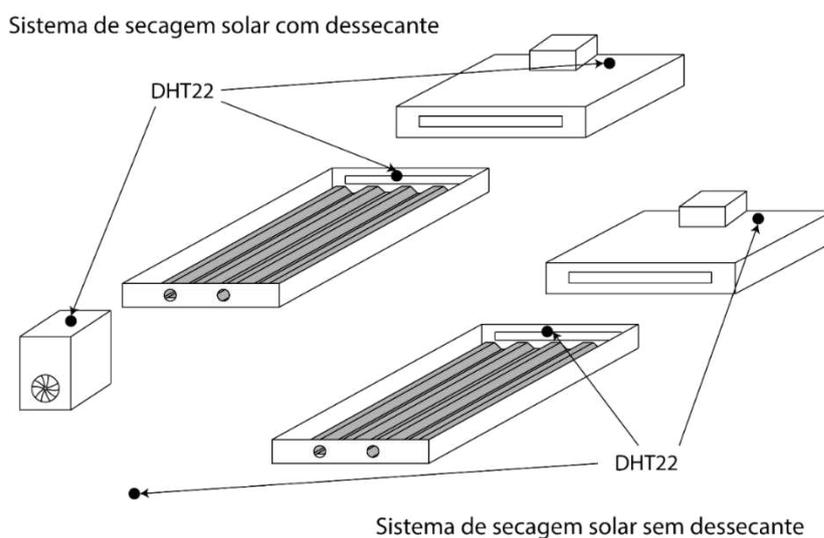
- Ar ambiente (temperatura do ar ambiente - T_a - e Umidade relativa do ar ambiente - UR_a);
- Ar de saída do coletor solar (Temperatura do ar de saída do coletor solar do sistema de secagem com unidade dessecante - T_{sCsem} - e umidade relativa do ar de saída do coletor solar do sistema de secagem com unidade dessecante - UR_{sCsem});
- Ar na saída da câmara de secagem (Temperatura do ar na saída da câmara de secagem do sistema de secagem com unidade dessecante - T_{sKsem} - e umidade relativa do ar na saída da câmara de secagem do sistema de secagem com unidade dessecante - UR_{sKsem}).

Considerou-se que:

- A temperatura e a umidade relativa do ar na entrada do coletor solar é a mesma temperatura e a mesma umidade relativa do ar ambiente ($T_{eCsem} = T_a$ e $UR_{eCsem} = UR_a$);
- A temperatura e a umidade relativa do ar na entrada da câmara de secagem é a mesma temperatura e a mesma umidade relativa do ar na saída do coletor solar ($T_{eKsem} = T_{sCsem}$ e $UR_{eKsem} = UR_{sCsem}$).

Na Figura 3.19, é apresentado um desenho esquemático dos sistemas de secagem e do posicionamento dos sensores DHT22.

Figura 3.19 - Desenhos esquemáticos dos sistemas e destaque para os posicionamentos dos sensores DHT22.



Fonte: Própria autora.

Na Figura 3.20, é apresentado o registro de um dos experimentos realizados na cidade de Pombal. Pode-se notar que os dois sistemas de secagem foram identicamente construídos e posicionados, sendo que a única diferença entre eles é que um dos sistemas está conectado a uma unidade dessecante. Em cada ensaio de secagem, os sistemas com e sem unidade dessecante operam simultaneamente, nas mesmas condições meteorológicas.

Figura 3.20 - Testes de secagem com ambos os sistemas.



Fonte: Própria autora.

Na Figura 3.21, pode-se observar a conexão da unidade dessecante ao coletor solar no sistema de secagem com unidade dessecante.

Figura 3.21 - Conexão da unidade dessecante e do coletor solar no Scdm.



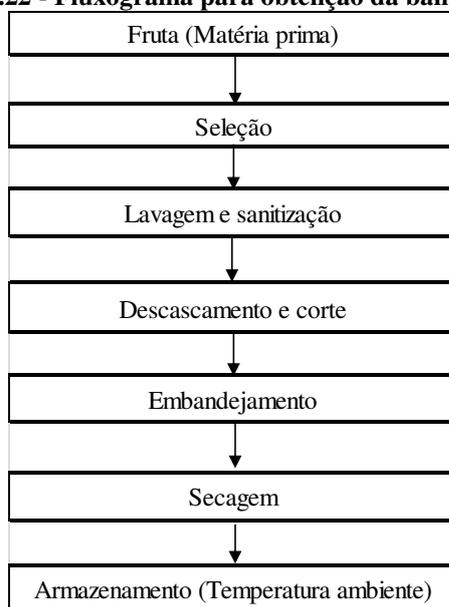
Fonte: Própria autora.

3.5 frutas

A banana prata foi a fruta utilizada nos processos de secagem nos sistemas de secagem desenvolvidos. Os frutos foram adquiridos no comércio popular na cidade de Pombal, sempre no mesmo comerciante, visando manter um padrão para todos os experimentos. Inclusive, os frutos usados na secagem, em Campina Grande, também foram adquiridos em Pombal.

O processo de produção da banana passa é representado pelo fluxograma apresentado na Figura 3.22.

Figura 3.22 - Fluxograma para obtenção da banana passa.



Fonte: Própria autora.

Para realizar a secagem, as bananas estavam em ponto de maturação para consumo, sem apresentar danos físicos ou deterioração provenientes de insetos (cf. Figura 3.23). As bananas foram higienizadas, descascadas e cortadas longitudinalmente com faca de aço inoxidável. Em cada experimento, foram utilizadas três bananas, sendo que cada metade da fruta foi colocada na câmara de secagem de um dos sistemas. Assim, a análise do processo seria mais fiel.

Figura 3.23 - Banana *in natura* utilizada na secagem.



Fonte: Própria autora.

Todas as amostras tinham massa inicial de $37,60 \pm 0,05$ g e, aproximadamente, 0,11 m de comprimento e 0,03 m de largura (cf. Figura 3.24).

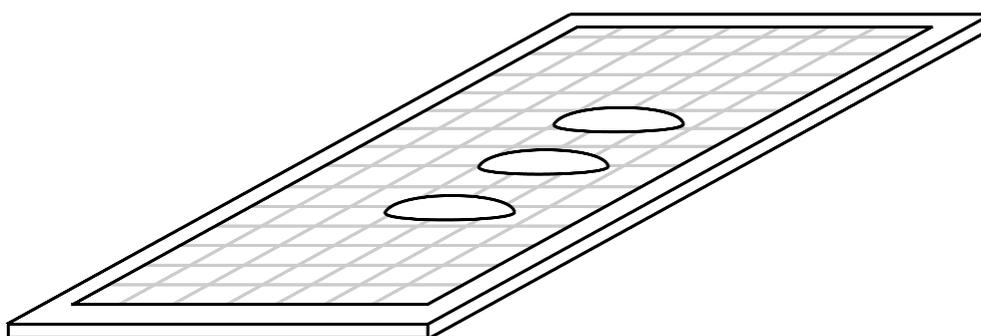
Figura 3.24 – Cortes e pesagem das bananas para o processo de secagem.



Fonte: Própria autora.

Na Figura 3.25, são mostradas as posições das amostras e das fatias de banana na bandeja da câmara de secagem.

Figura 3.25 - Desenho esquemático da posição das amostras de banana na bandeja da câmara de secagem.



Fonte: Própria autora.

As pesagens foram feitas a cada uma hora de experimento e o valor das massas registrados em tabelas, como na Tabela 3.6. Foram calculadas as médias das três amostras em cada sistema de secagem.

Tabela 3.6 – Modelo de tabela de decaimento da massa da banana.

Data	2021	Sistema com dessecante			Sistema sem dessecante		
Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)
	08:00						
60	09:00						
120	10:00						
180	11:00						
...	...						

Fonte: Própria autora.

onde:

Mt é a massa total do produto (média das três amostras);

Ma é a massa de água do produto;

Xt é o teor de água do produto, em base úmida.

O valor necessário da massa seca para determinar a massa de água da banana e, conseqüentemente, o teor de água instantâneo, bem como o teor de água de equilíbrio necessário para determinar a razão de umidade (RX), foram calculados para cada penca de bananas da qual foram retiradas as frutas para os experimentos.

A balança digital de precisão utilizada para as pesagens das amostras de bananas possui duas casas decimais de precisão para gramas (cf. Figura 3.26) e é da marca SuFeng, com capacidade de até 500,00 g.

Figura 3.26 - Balança digital de precisão.



Fonte: Própria autora.

Concluído o processo de secagem, o produto foi resfriado a temperatura ambiente por um período de 20 minutos, tempo necessário ao equilíbrio térmico com o meio ambiente. Esta etapa é imprescindível para evitar o condensamento de vapor de água no interior da embalagem. Após o resfriamento, o produto foi embalado em sacos plásticos estéril de polipropileno com espessura de 0,04 μm , e armazenado a temperatura ambiente protegido do sol.

Na Figura 3.27 é apresentada algumas bananas cortadas longitudinalmente antes da secagem (*in natura*) no início do processo e no final após o processo de armazenamento.

Figura 3.27 – Bananas cortadas longitudinalmente *in natura* e banana passa.



Fonte: própria autora.

3.5.1 Massa seca

Com a finalidade de determinar a massa seca, o teor de água de equilíbrio e o teor de água inicial da banana, as amostras foram previamente secas nos sistemas de secagem desenvolvidos e utilizou-se uma adaptação do método da estufa aplicado por Farias (2011).

Ao término de cada experimento, foi calculada a média da temperatura do ar de saída do coletor solar do sistema com e do sistema sem dessecante. Então, foi calculada a média desses dois valores que chamaremos temperatura média de secagem ($T_{\text{média de secagem}}$). As amostras secas foram levadas à estufa por 24 horas na $T_{\text{média de secagem}}$. Após esse tempo, as amostras foram colocadas em dessecador até atingir temperatura próxima ao ambiente e, ao fim, pesadas. Em seguida, foram levadas novamente à estufa por mais 24 horas, à temperatura de 70°C. Ao término deste período, as amostras foram levadas ao dessecador e, depois de duas ou três horas, nova pesagem foi realizada para determinar o teor de água inicial das amostras.

As primeiras 24 horas de secagem na estufa servem para determinar o teor de água de equilíbrio da fruta e as últimas 24 horas servem para determinar sua massa seca. A Figura 3.28 ilustra a estufa e o dessecador utilizados na determinação do teor de água inicial e o teor de água de equilíbrio das amostras de banana utilizadas nos experimentos de secagem.

Figura 3.28 - Estufa com circulação e renovação de ar SL 102 e dessecador.



Fonte: Própria autora.

3.6 Avaliação dos sistemas de secagem

A avaliação do processo de secagem foi feita a partir da determinação das curvas de secagem e seu ajuste aos modelos matemáticos de Page e de Midilli *et al.* e a avaliação dos

sistemas de secagem foram feitas por meio do cálculo dos rendimentos térmicos dos equipamentos e do tempo médio de secagem obtido em cada sistema.

3.6.1 Determinação das curvas de secagem

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

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

onde,

RX é a razão de umidade, base seca;

X é o teor de umidade, base seca;

X_e é o teor de umidade de equilíbrio, base seca;

X_0 é o teor de umidade inicial, base seca.

A avaliação da cinética de secagem foi obtida comparando os valores experimentais com os modelos matemáticos empíricos de Page (Equação 3.2) e de Midilli *et al.* (Equação 3.3) utilizando o programa computacional *Statistica* versão 10.0, onde se determinou os respectivos coeficientes de determinação (R^2) e verificou-se a predição ou não do processo por meio dos modelos matemáticos analisados.

$$RX = \exp(-k \cdot t^n) \quad (3.2)$$

Onde:

k é a constante de secagem [min^{-1}];

n é o parâmetro do modelo;

t é o tempo de secagem [min].

e,

$$RX = a \cdot \exp(-kt^n) + bt \quad (3.3)$$

Onde:

k é a constante de secagem [min^{-1}];

n é o parâmetro do modelo;

a e b são os coeficientes do modelo;

t é o tempo de secagem [min].

3.6.2 Rendimento térmico do equipamento

Segundo Nunes (2016), o desempenho ou a eficiência de um sistema de secagem solar está relacionado com seu rendimento térmico.

No cálculo do rendimento térmico, utilizam-se os conceitos termodinâmicos — derivados da conservação da massa e da primeira lei da termodinâmica — através da aplicação do balanço de energia a cada sistema de secagem. Para tanto, é preciso levantar os dados de temperatura e umidade relativa do ar.

3.6.2.1 Conservação da massa

A lei da conservação da massa estabelece que a taxa temporal de variação de massa contida no interior do volume de controle, em um instante de tempo t , é igual à taxa temporal de fluxo de massa através da entrada (e) no instante t , menos a taxa temporal de fluxo de massa através da saída (s), no instante t . Sua expressão é representada pela Equação 3.4:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (3.4)$$

Onde:

$\frac{dm_{vc}}{dt}$ é a taxa temporal da variação da massa contida no interior do volume de controle ($\frac{\text{kg}}{\text{s}}$).

\dot{m}_e e \dot{m}_s são as vazões mássicas instantâneas na entrada e na saída do volume de controle, respectivamente $\left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$.

3.6.2.2. Primeira Lei da Termodinâmica

A primeira lei da termodinâmica, também conhecida como lei da conservação da energia, estabelece que “a taxa temporal de variação da energia contida no interior do volume de controle no instante t é igual à taxa líquida na qual a energia está sendo transferida para dentro do volume de controle por transferência de calor no instante t , menos a taxa líquida na qual a energia está sendo transferida para fora do volume de controle por trabalho no instante t , mais a taxa líquida da energia transferida para o volume de controle juntamente com fluxo de massa.” Matematicamente, aplicando a primeira lei da termodinâmica ao volume de controle, tem-se a Equação 3.5.

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (3.5)$$

onde:

$\frac{dE_{vc}}{dt}$ = Taxa temporal de variação de energia contida no volume de controle (W);

\dot{Q}_{vc} = Taxa de transferência de calor através da fronteira do volume de controle (W);

\dot{W}_{vc} = Taxa de transferência de trabalho através da fronteira do volume de controle (W);

\dot{m}_e = Vazão mássica na entrada do volume de controle $\left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$;

\dot{m}_s = Vazão mássica na saída do volume de controle $\left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$;

h_e = Entalpia específica do ar na entrada no volume de controle $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$;

h_s = Entalpia específica do ar na saída no volume de controle $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$;

v_e^2 = Velocidade do ar na entrada do volume de controle $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$;

v_s^2 = Velocidade do ar na saída do volume de controle $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$;

g = Aceleração da gravidade $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$;

z_e = Valor absoluto da posição vertical (altura) da entrada do volume de controle (m);

z_s = Valor absoluto da posição vertical (altura) da saída do volume de controle (m).

A vazão mássica do fluido de trabalho para o coletor solar pode ser calculada pela equação 3.6.

$$\dot{m} = \rho_e V_e A_e = \rho_s V_s A_s \quad (3.6)$$

Onde:

\dot{m} = Vazão mássica do fluido de trabalho $\left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$;

ρ_e = Massa específica do fluido de trabalho na entrada do volume de controle $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$;

ρ_s = Massa específica do fluido de trabalho na saída do volume de controle $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$;

V_e = Velocidade de entrada do fluido no volume de controle $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$;

V_s = Velocidade de saída do fluido no volume de controle $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$;

A_e = Área de entrada do fluido no volume de controle (m^2);

A_s = Área de saída do fluido no volume de controle (m^2).

A medição da velocidade do ar que passa através das sessões de entrada e de saída do volume de controle, foram feitas com o anemômetro digital utilizado nos experimentos com a unidade dessecante.

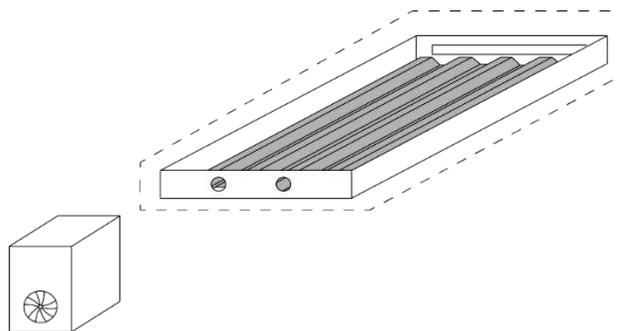
3.6.2.3 Cálculo do rendimento pela primeira lei da termodinâmica

Para execução dos cálculos de rendimento térmico do equipamento, aplicando a primeira lei da termodinâmica, faz-se necessário definir um volume de controle e sua respectiva fronteira.

a) Coletor solar

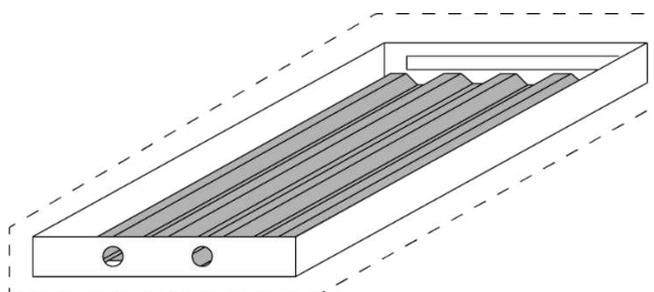
Nas Figuras 3.29 e 3.30, podem ser observadas as representações esquemáticas dos volumes de controle dos coletores solares construídos.

Figura 3.29 - Representação esquemática do volume de controle para o coletor solar no Scom.



Fonte: Própria autora.

Figura 3.30 - Representação esquemática do volume de controle para o coletor solar no Ssem.



Fonte: Própria autora.

Além disso, alguns pontos podem ser destacados nestes coletores. Pode-se considerar que a energia cinética e a potencial na entrada e na saída do coletor são iguais, devido a suas características construtivas e operacionais. É de se considerar, também, que o trabalho realizado pelo coletor é nulo, uma vez que um coletor solar é um equipamento térmico e não uma máquina térmica, então:

$$EC_e = EC_s$$

$$EP_e = EP_s$$

$$\dot{W}_{e-s} = 0$$

onde:

EC_e e EC_s são as energias cinéticas de entrada e de saída do coletor solar;

EP_e e EP_s são as energias potenciais de entrada e de saída do coletor solar;

\dot{W}_{e-s} é o trabalho realizado.

Como a massa que entra no coletor solar é igual à massa que sai, aplicando a lei de conservação de massa e de conservação de energia, tem-se:

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}$$

Assim, a Equação (3.5) se reduz a:

$$\dot{Q}_{s-e} = \dot{m} (h_s - h_e)$$

Onde:

\dot{Q}_{s-e} é o \dot{Q}_{real} , ou seja, a energia transferida ao ar de secagem.

Aplicando o conceito de eficiência térmica, pela primeira e segunda leis da termodinâmica para o volume de controle, chega-se à expressão que representa o rendimento térmico do coletor solar desenvolvido, dado pela Equação 3.7.

$$\eta_{coletor} = \eta_c = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{solar}} = \frac{\dot{m} (h_s - h_e)}{A \cdot \dot{Q}_{média}} \quad (3.7)$$

Onde:

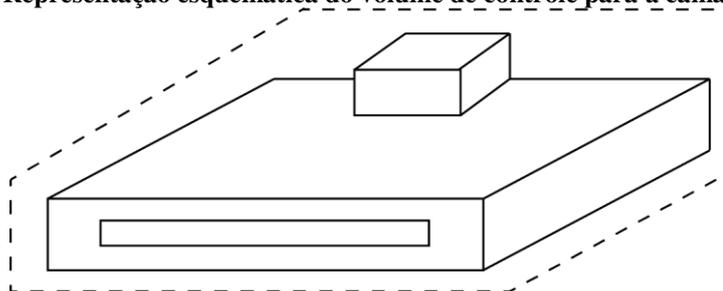
A = Área da cobertura transparente do secador solar (m²);

$\dot{Q}_{média}$ = Média da irradiação solar, incidente sobre o secador solar, durante o processo de secagem ($\frac{W}{m^2}$).

b) Câmara de secagem

A Figura 3.31 ilustra a representação esquemática do volume de controle da câmara de secagem para ambos os sistemas de secagem.

Figura 3.31 - Representação esquemática do volume de controle para a câmara de secagem.



Fonte: Própria autora.

Levando em consideração que, na câmara de secagem, a massa de ar que sai é maior que a massa de ar que entra, uma vez que sai da câmara de secagem a massa de ar que entra, vindo do coletor solar, mais a massa de vapor de água que é retirada do produto a ser seco durante o processo de secagem. Assim, o rendimento térmico da câmara de secagem, aplicando a primeira lei da termodinâmica, é dado por:

$$\eta_{\text{câmara}} = \eta_k = \frac{\dot{m}'_s h_s + \dot{E}_b}{\dot{m}_e h_e} \quad (3.8)$$

Onde:

\dot{m}'_s representa a vazão mássica do ar que sai da câmara de secagem sem levar em consideração o vapor de água retirado do produto a ser seco.

\dot{E}_b representa a vazão mássica de energia retirada da banana durante o processo de secagem e é dado pela equação:

$$\dot{E}_b = h_v \dot{m}_{\text{água retirada da banana}}$$

Onde:

h_v é a entalpia da água saturada, como vapor saturado, na temperatura média de saída, em (kJ/kg);

$\dot{m}_{\text{água retirada da banana}}$ é a massa de água retirada da banana no período de tempo, dado em (kg/s).

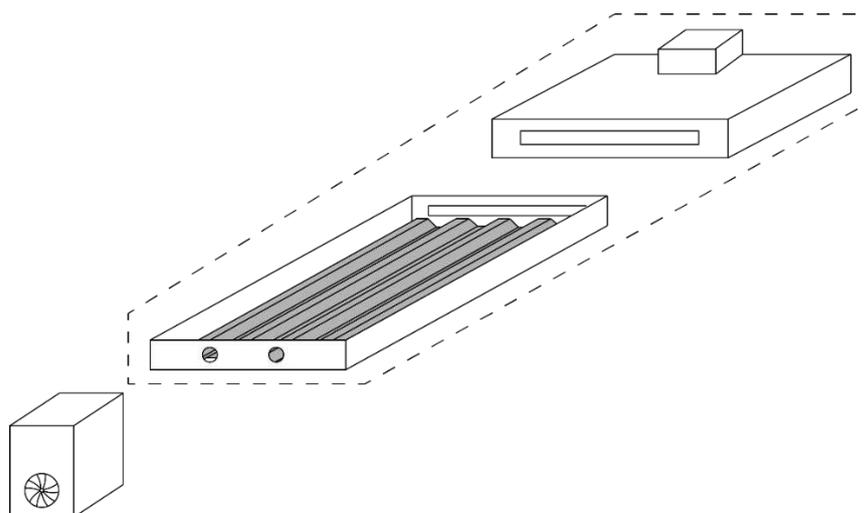
c) Sistema de secagem

Ainda segundo Nunes (2016), o rendimento térmico do sistema de secagem é dado pelo produto dos rendimentos do coletor solar e da câmara de secagem, dado pela equação:

$$\eta = \eta_c \times \eta_k \quad (3.9)$$

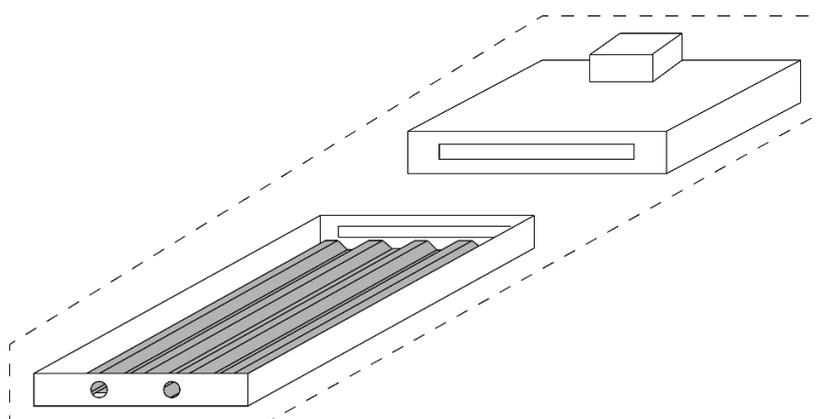
Nas Figuras 3.32 e 3.33, são apresentadas representações esquemáticas do volume de controle aplicado a cada sistema de secagem.

Figura 3.32 - Representação esquemática do volume de controle para o sistema com unidade dessecante.



Fonte: Própria autora.

Figura 3.33 - Representação esquemática do volume de controle para o sistema sem unidade dessecante.



Fonte: Própria autora.

3.7 Regeneração do dessecante sílica gel

Uma das razões para a escolha da sílica gel como dessecante do ar de secagem é devido à sua capacidade de regeneração. O processo de regeneração do dessecante utilizado nos experimentos de secagem foi feito utilizando energia solar térmica.

O coletor solar desenvolvido por meio do planejamento experimental fatorial foi utilizado para o processo de regeneração do da sílica gel. Os processos de regeneração foram realizados na cidade de Pombal, PB.

O dessecante saturado, devido seu uso durante o processo de secagem realizado pelo sistema de secagem com unidade dessecante, é espalhado em camada fina em uma bandeja de nylon (a mesma utilizada para depósito das amostras de banana na câmara de secagem) e colocada no interior do coletor solar próximo a saída do ar. O processo dura de 3 a 4 horas e inicia-se, em geral, às 9:00 h.

O processo de regeneração é acompanhado a cada uma hora e considera-se que o dessecante está regenerado quando sua coloração se torna uma mistura de laranja e transparente, não apresentando mais pontos esverdeados. Ao fim do processo, a sílica gel é deixada para resfriar por 1 hora e então armazenada para ser utilizada novamente em outro experimento de secagem.

Na Figura 3.34, é possível observar a realização de um dos experimentos de regeneração da sílica gel.

Figura 3.34 – Regeneração da sílica gel.



Fonte: Própria autora.

Capítulo IV
RESULTADOS E DISCUSSÕES

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos representam a aplicação da metodologia do planejamento experimental fatorial no dimensionamento dos componentes da unidade dessecante e do coletor solar de um sistema de secagem solar de frutas para inferência da significância estatística das variáveis analisadas através das respostas determinadas.

São apresentados, também, os resultados dos processos de secagem solar da banana realizados pelos sistemas desenvolvidos para análise do tempo de secagem e do rendimento termodinâmico dos equipamentos testados nas cidades de Campina Grande e Pombal, em condições meteorológicas distintas e com os ajustes dos modelos matemáticos de cinética de secagem de Page e de Midilli *et al.* aos dados obtidos experimentalmente.

Dos 8 experimentos de secagem realizados na cidade de Campina Grande, foram tratados com mais detalhes, neste capítulo, os seguintes experimentos: ECG1_{com}, ECG1_{sem}, ECG3_{com}, ECG3_{sem} — que tratam, respectivamente, de secagens realizadas nos períodos de Primavera/Verão e de Outono/Inverno. Do mesmo modo, dos 8 experimentos de secagem realizados na cidade de Pombal, foram tratados com mais detalhes, neste capítulo, os experimentos: EPM1_{com}, EPM1_{sem}, EPM3_{com}, EPM3_{sem}, — que tratam, respectivamente, de secagens realizadas nos períodos de Primavera/Verão e de Outono/Inverno.

Os dados dos demais experimentos encontram-se nos Apêndices E e F.

4.1 Ensaio experimentais para a unidade dessecante

Entre os dias 02 e 15 de novembro de 2020, foram realizados os testes das unidades dessecantes na cidade de Pombal/PB, verificando a massa de vapor d'água adsorvida no dessecante sílica gel.

Cada configuração de unidade dessecante ficou por 03 (três) horas seguidas numa sala fechada, com condições climáticas de temperatura e umidade relativa controladas com temperatura ambiente média de 23,98°C e umidade relativa do ar ambiente média de 60,40%. Os dados de temperatura e umidade relativa do ar foram obtidos pelos sensores DHT22 e armazenados em cartões de memória.

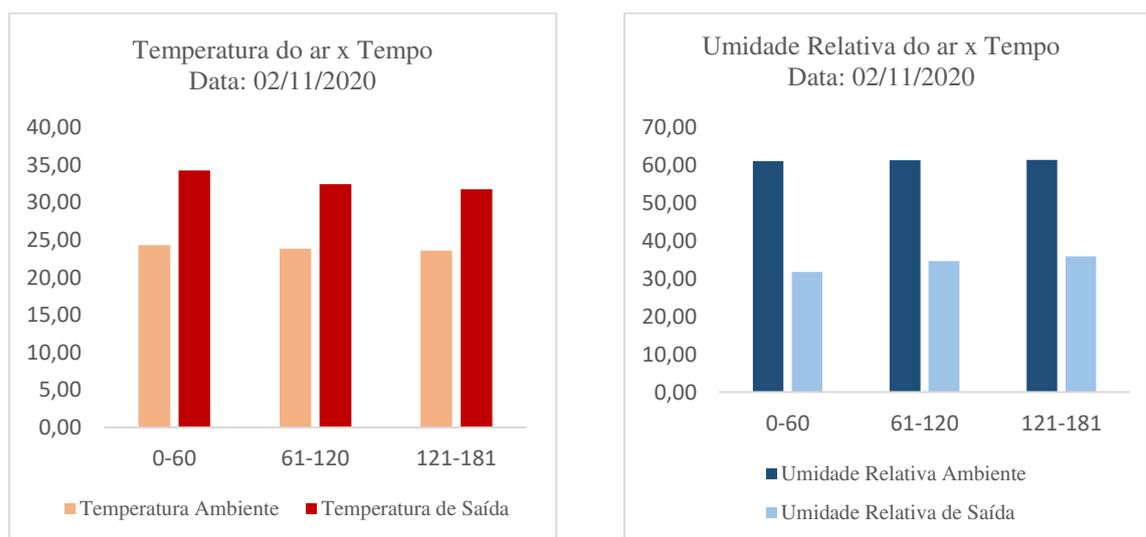
Os experimentos com a unidade dessecante 1 (UD1 - velocidade de 1 m/s, 1 bandeja e volume interno de 7 litros) foram realizados nos dias 02 e 03 de novembro de 2020. Na Tabela 4.1, consta o resumo das principais informações destes experimentos cujos dados são apresentados nos gráficos de temperatura e umidade relativa (Figura 4.1 e Figura 4.2). As massas de vapor de água adsorvidas, nestes experimentos, foram de 57,00 g e de 56,00 g.

Tabela 4.1 - Resumo de dados dos experimentos com a Unidade dessecante 1.

	Experimento 1	Experimento 2
Umidade relativa ambiente média (%)	61,30	61,22
Umidade relativa de saída média (%)	34,13	33,74
Temperatura ambiente média (°C)	23,91	24,34
Temperatura de saída média (°C)	32,82	33,82
Média UR _a – UR _{sUD} (%)	27,17	27,48
Média T _{sUD} – T _a (°C)	8,90	9,48

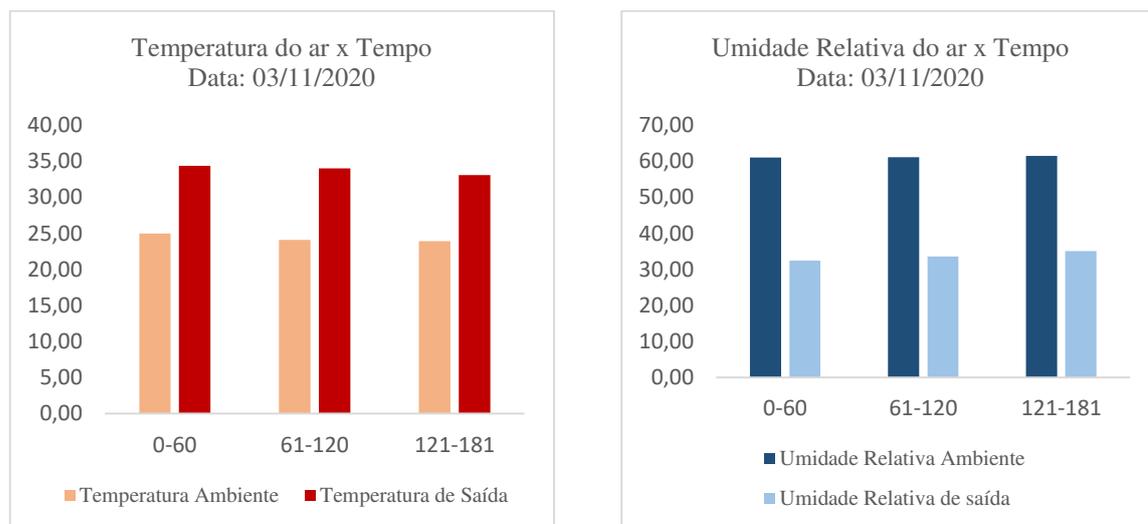
Fonte: Própria autora.

Figura 4.1 - Temperatura e umidade relativa do ar no meio ambiente e na saída da UD1 (experimento 1).



Fonte: Própria autora.

Figura 4.2 - Temperatura e umidade relativa do ar no meio ambiente e na saída da UD1 (experimento 2).



Fonte: Própria autora.

Observando os dados apresentados nos gráficos de temperatura do ar ambiente e do ar na saída da unidade dessecante 1, é possível inferir que, durante o processo de adsorção de vapor d'água pela sílica gel, há aumento de temperatura do ar que entra nesta unidade dessecante. Observa-se que o ganho médio de temperatura é de 8,91°C e 9,48°C nos experimentos realizados. Com isso, conclui-se que esta configuração de unidade dessecante promove aumento de temperatura do ar que entra nela.

A diferença média entre a umidade relativa do ar na entrada da unidade dessecante e a umidade relativa do ar na saída da unidade dessecante é de 27,17% e de 27,48% nos experimentos realizados, o que mostra que, nesta configuração de unidade dessecante, obtém-se diminuição da umidade relativa.

Vale salientar que a diminuição da umidade relativa é consequência de dois fatores: redução da quantidade de água, em forma de vapor, presente no ar (adsorção pela sílica gel); e aumento da temperatura do ar (que acarreta a expansão deste ar).

Os experimentos realizados com a unidade dessecante 2 (velocidade de 2 m/s, 1 bandeja e volume interno de 7 litros) ocorreram nos dias 04 e 05 de novembro de 2020. A Tabela e as Figuras de temperatura e umidade relativa que apresentam o resumo das principais informações desses experimentos, bem como dos testes realizados com as unidades dessecantes 3, 4, 5, 6 e 7 encontram-se no Apêndice B.

Quando duas unidades dessecantes apresentam duas (de três) características em comum, opta-se por destacar alguns pontos relevantes obtidos nos experimentos realizados.

Na Tabela 4.2, constam as principais informações dos experimentos realizados com as unidades dessecantes cujo volume interno é de 7 litros.

Tabela 4.2 - Resumo dos dados dos experimentos com as unidades dessecantes 1, 2, 3 e 4.

	ΔT (°C)	ΔUR (%)	Massa de água adsorvida (g)
UD1	8,91 e 9,48	27,17 e 27,48	57,00 e 56,00
UD2	4,55 e 2,69	16,44 e 12,44	85,00 e 67,00
UD3	4,03 e 3,64	18,50 e 14,98	27,00 e 22,00
UD4	3,61 e 4,14	13,20 e 18,13	54,00 e 61,00

Fonte: Própria autora.

Comparando-se os resultados obtidos com os experimentos realizados com as unidades dessecantes 1 e 2 observa-se que a diferença de velocidade do ar nestas unidades provocou uma adsorção de 19,50 g de água a mais, em média, pela sílica gel.

A partir das informações destacadas na Tabela 4.2, pode-se observar que o ganho de temperatura nos experimentos realizados com a unidade dessecante 2 é menor que os registrados nos experimentos realizados com a unidade dessecante 1. Isso, provavelmente, deve-se ao fato de que, na UD2, o ar passa pela sílica gel com velocidade maior que na UD1, mantendo contato com o dessecante por menos tempo e, conseqüentemente, este cede menos calor para o ar.

Comparando-se os resultados obtidos com os experimentos realizados com a unidade dessecante 2 e a unidade dessecante 4 (velocidade de 2 m/s, 2 bandejas e volume interno de 7 litros) observa-se que o aumento no número de bandejas provocou uma adsorção de 32,00 g de vapor d'água a menos, em média, pela sílica gel.

E comparando-se os resultados obtidos com os experimentos realizados com a unidade dessecante 2 e a unidade dessecante 4 (velocidade de 1 m/s, 2 bandejas e volume interno de 7 litros) observa-se que o aumento no número de bandejas provocou uma adsorção de 18,50 g de vapor d'água a menos, em média, pela sílica gel.

Finalmente comparando-se os resultados obtidos com os experimentos realizados com a unidade dessecante 3 e a unidade dessecante 4 observa-se que o aumento da velocidade do ar acarretou uma adsorção de 33,00 g de vapor d'água a mais, em média, pela sílica gel.

Foi possível também observar, comparando os experimentos realizados com as unidades dessecantes que possuem volume interno de 7 litros que:

- Uma bandeja e velocidade do ar de 2 m/s é quando se obtém os maiores valores de adsorção de água.
- Duas bandejas e velocidade do ar de 1 m/s é quando se obtém os menores valores de adsorção de água.

Na Tabela 4.3, constam as principais informações dos experimentos realizados com as unidades dessecantes cujo volume interno é de 24 litros.

Tabela 4.3 - Resumo dos dados dos experimentos com as unidades dessecantes 5, 6, 7 e 8.

	ΔT (°C)	ΔUR (%)	Massa de água adsorvida (g)
UD5	2,95 e 4,14	11,12 e 13,74	53,00 e 56,00
UD6	3,23 e 4,37	16,64 e 17,33	110,00 e 123,00
UD7	3,99 e 5,23	17,66 e 14,93	76,00 e 71,00
UD8	4,40 e 3,01	18,75 e 15,17	148,00 e 143,00

Fonte: Própria autora.

Comparando-se os resultados obtidos com os experimentos realizados com a unidade dessecante 5 (velocidade do ar de 1 m/s, 1 bandeja e volume interno de 24 litros) e a unidade dessecante 6 (velocidade do ar de 2 m/s, 1 bandejas e volume interno de 24 litros) observa-se que o aumento na velocidade do ar provocou uma adsorção de 62,00 g de vapor d'água a mais, em média, pela sílica gel.

Comparando-se os resultados obtidos com os experimentos realizados com a unidade dessecante 5 (velocidade do ar de 1 m/s, 1 bandeja e volume interno de 24 litros) e a unidade dessecante 7 (velocidade do ar de 1 m/s, 2 bandejas e volume interno de 24 litros) observa-se que o aumento no número de bandejas provocou uma adsorção de 72,00 g de vapor d'água a mais, em média, pela sílica gel.

Então, de modo geral, foi possível observar que:

- O aumento na velocidade do ar proporcionou maiores valores de massa de vapor d'água adsorvida na sílica gel;

- Na unidade dessecante de 7 litros o aumento no número de bandejas promoveu diminuição da sua eficiência;
- Na unidade dessecante de 24 litros o aumento no número de bandejas promoveu aumento da sua eficiência.

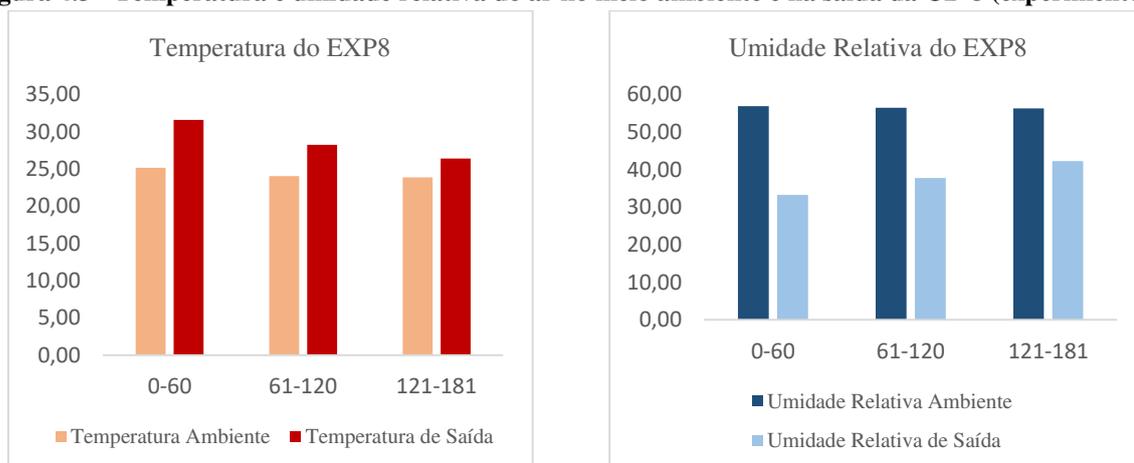
O resumo das principais informações obtidas na realização dos experimentos com a unidade dessecante 8 é apresentado na Tabela 4.4 e nas figuras de temperatura de umidade relativa do ar.

Tabela 4.4 - Resumo de dados dos experimentos com a Unidade dessecante 8.

	Experimento 1	Experimento 2
Umidade relativa do ar ambiente média (%)	56,54	61,02
Umidade relativa do ar de saída média (%)	37,79	45,82
Temperatura do ar ambiente média (°C)	24,35	23,40
Temperatura do ar de saída média (°C)	28,75	26,41
Média UR _a – UR _{sUD} (%)	18,76	15,20
Média TsUD – Ta (°C)	4,40	3,01

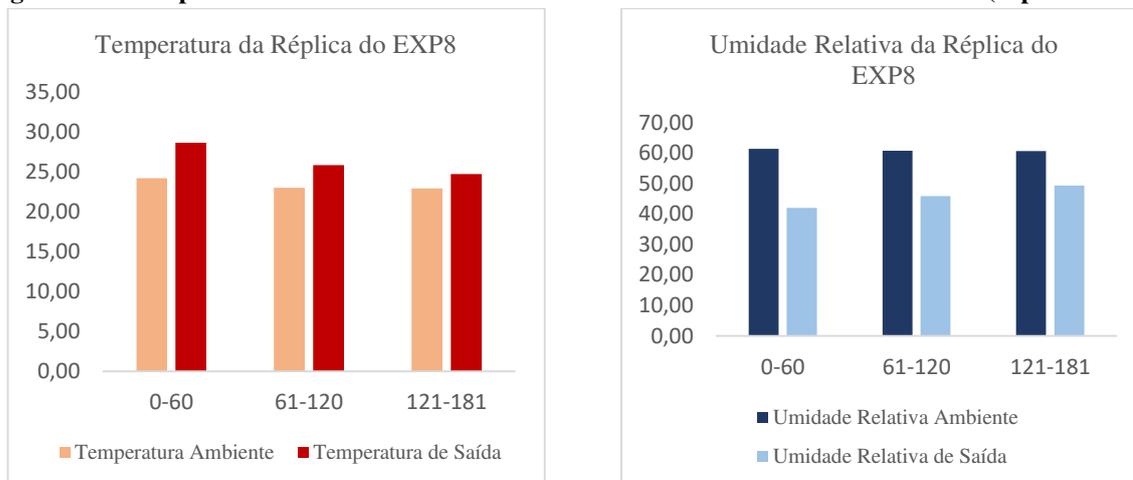
Fonte: Própria autora.

Figura 4.3 - Temperatura e umidade relativa do ar no meio ambiente e na saída da UD 8 (experimento 1).



Fonte: Própria autora.

Figura 4.4 - Temperatura e umidade relativa do ar no meio ambiente e na saída da ud8 (experimento 2).



Fonte: Própria autora.

Na Figura 4.5, pode-se observar a massa de sílica gel após a realização de um dos experimentos com a unidade dessecante 8. A sílica, que no início do experimento era uma mistura de laranja e transparente, se tornou uma mistura de transparente com uma coloração verde escuro. Esta coloração indica que a sílica adsorveu água.

Neste experimento, 143 g de vapor de água foram adsorvidos. A tara utilizada tem massa de 52 g ($1.195 - 52 = 1.143$, sendo que 1.000 g correspondem à massa inicial da sílica).

Figura 4.5 - Sílica gel após um dos experimentos com a ud8 e disposição do dessecante nas bandejas.



Fonte: Própria autora.

Na Figura 4.6, pode-se observar a massa de sílica gel após a realização de um dos experimentos com a unidade dessecante 4. É possível observar que alguns grãos de sílica adquiriram coloração mais escura, indicando que o processo de adsorção ocorreu.

Neste experimento, 61 g de vapor de água foram adsorvidos. A tara utilizada tem massa de 52 g ($1.113 - 52 = 1061$ g, sendo que 1.000 g correspondem à massa inicial da sílica.).

Figura 4.6 - Sílica gel após um dos experimentos com a ud4 e disposição do dessecante nas bandejas.



Fonte: Própria autora.

Uma conquista importante e inédita alcançada neste trabalho foi a regeneração do dessecante através do uso da energia solar térmica.

Na Figura 4.7, foi possível observar a sílica gel após a realização de um processo de secagem solar (saturada) e após sua regeneração.

Figura 4.7 – Sílica gel antes e após regeneração.



Fonte: Própria autora.

4.1.1 Planejamento experimental fatorial para a unidade dessecante

Embora uma análise superficial possa ser feita a partir dos dados obtidos nos experimentos, a aplicação de um método seguro, confiável e amplamente utilizado nos meios científicos, como é o caso do planejamento experimental fatorial, pode garantir a validade dos

experimentos e indicar com segurança qual a configuração ótima para o equipamento em desenvolvimento.

Os 16 experimentos necessários para realizar um planejamento experimental completo 2^3 , com réplica, foram realizados entre os dias 02 e 15 de novembro de 2020 na cidade de Pombal /PB, com condições climáticas de umidade relativa do ar ambiente média de 60,40% e temperatura do ar ambiente média de 23,98°C

Como os experimentos foram realizados em ambiente controlado de temperatura e umidade relativa do ar, a dispersão destes dados em torno da média é mínima, fato assegurado pelos coeficientes de variação de 3% e 4%, respectivamente, para a temperatura do ar ambiente e para a umidade relativa do ar ambiente. A matriz codificada do planejamento realizado está na Tabela 4.5, com as respectivas respostas obtidas em cada ensaio.

Tabela 4.5: Matriz do planejamento experimental codificada para a unidade dessecante.

	Velocidade do ar	Número de Bandejas	Volume interno	Massa de água adsorvida (g)	Massa de água adsorvida (g)
UD1	-1	-1	-1	57	56
UD2	+1	-1	-1	85	67
UD3	-1	+1	-1	27	22
UD4	+1	+1	-1	54	61
UD5	-1	-1	+1	53	56
UD6	+1	-1	+1	110	123
UD7	-1	+1	+1	76	71
UD8	+1	+1	+1	148	143

Fonte: Própria autora.

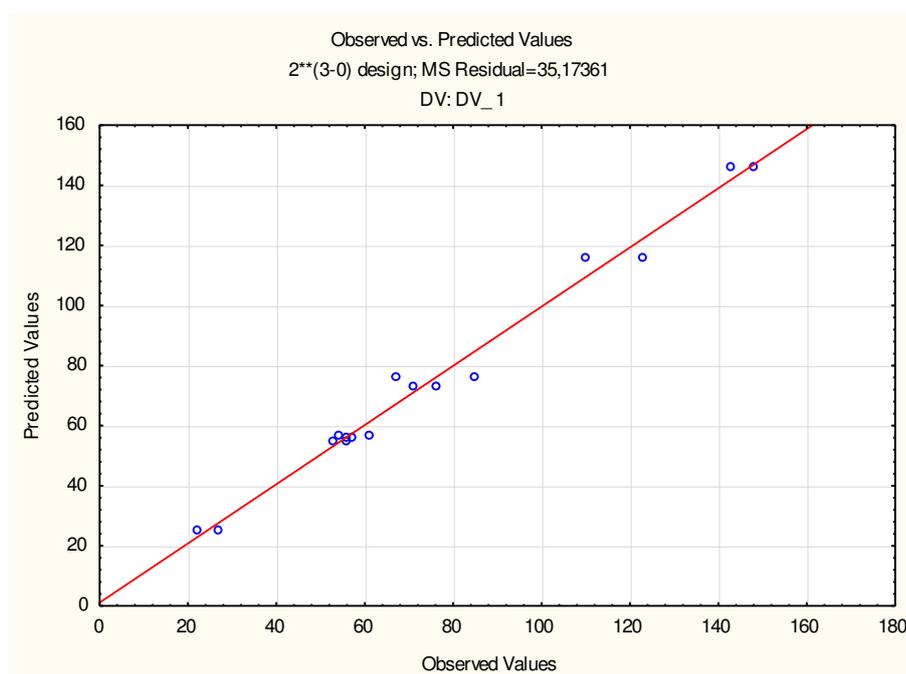
Os resultados obtidos nos experimentos foram tratados pelo *Design of Experimental* (DOE) – planejamento experimental no *software Statistic* versão 10.0, permitindo, assim, extrair as informações estatísticas necessárias à interpretação e otimização da unidade dessecante, a qual será integrada a um dos sistemas de secagem solar propostos.

Os testes realizados obtiveram um coeficiente de correlação ou porcentagem de variação explicada de 98,48%, o que é resultado excelente já que, para este tipo de análise, o coeficiente

de correlação acima de 95% é considerado satisfatório. A Figura 4.8 apresenta os valores observados experimentalmente e previstos pela aplicação da técnica do planejamento experimental fatorial utilizando o *Statistic* versão 10.0.

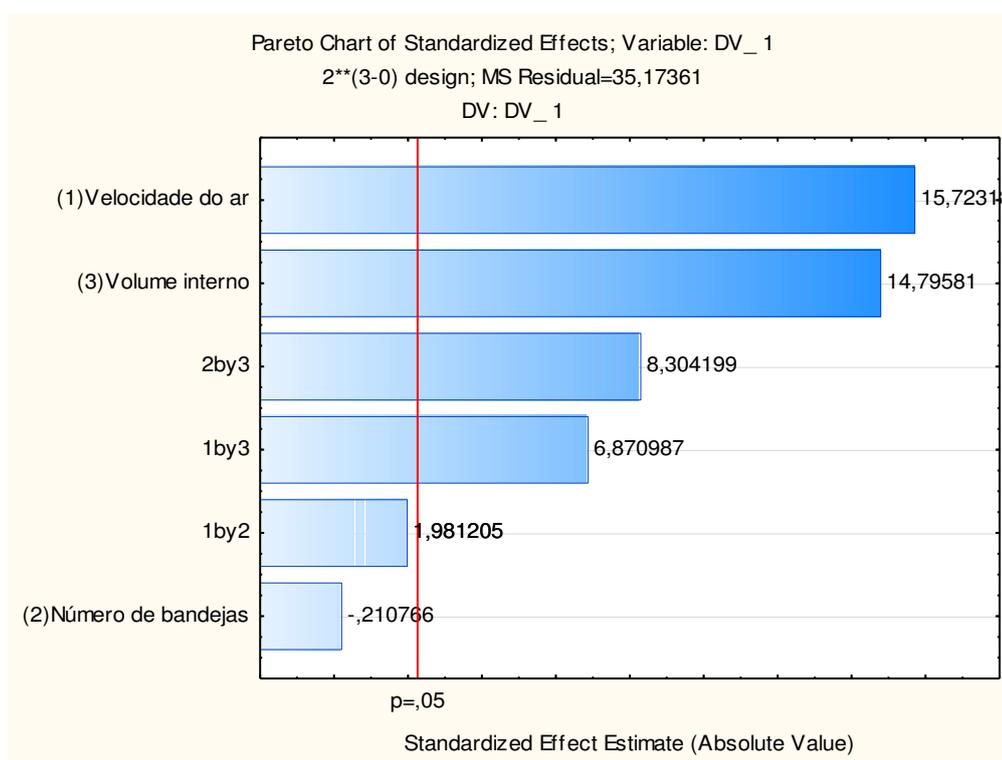
A interpretação das variáveis com significância estatística para a obtenção da configuração ótima para a unidade dessecante pode ser feita observando o gráfico de Pareto gerado pelo planejamento experimental. (cf. Figura 4.9).

Figura 4.8- Valores observadores x valores previstos no planejamento experimental para a unidade dessecante.



Fonte: Própria autora.

Figura 4.9 - Gráfico de Pareto para a unidade dessecante.



Fonte: Própria autora.

A partir do Gráfico de Pareto, foi possível constatar que as variáveis mais significativas para o processo são, nesta ordem: velocidade do ar, volume interno, interação entre número de bandejas e volume interno e interação entre velocidade do ar e volume interno. Observada individualmente, a variável número de bandejas não é significativa, nem sua interação com a velocidade do ar é significativa.

No modelo linear estatístico do planejamento experimental, entram apenas as variáveis significativas, o erro e a média; então, neste caso, o modelo obtido é:

$$Y = 75,56 + 23,31A + 21,94B + 10,19AC + 12,31BC + 2,96$$

Onde:

- A é a variável velocidade do ar;
- B é a variável número de bandejas;
- C é a variável volume interno da unidade dessecante;
- AC é a interação entre A e B ;
- BC é a interação entre B e C .

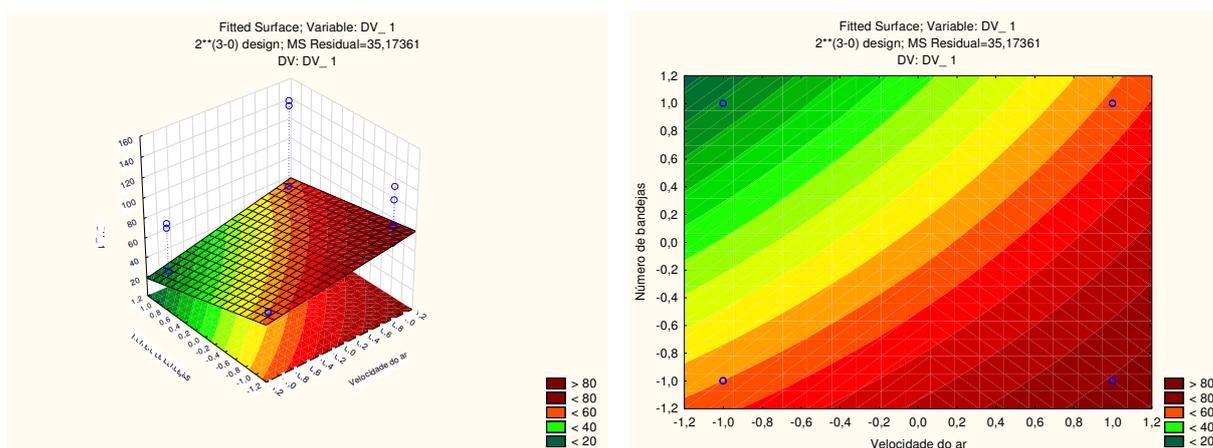
A partir dos gráficos de superfície de resposta do planejamento experimental e sua respectiva projeção no plano, foi possível determinar a configuração ótima para a unidade dessecante em desenvolvimento.

As análises gráficas feitas pelo programa só permitem estudar duas variáveis por vez e, a cada par de variáveis, a terceira variável é considerada no nível inferior, no nível superior ou é desconsiderada.

a) Analisando as **variáveis velocidade do ar e número de bandejas** temos três possibilidades:

- **Caso 1: A variável volume interno está no nível inferior;**

Figura 4.10 - superfície de resposta e projeção no plano para o caso 1



Fonte: Própria autora.

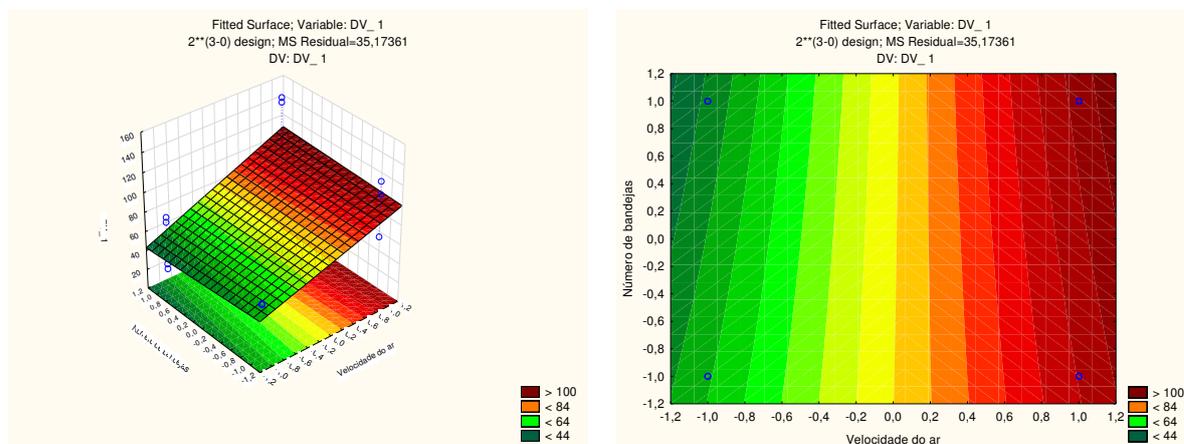
Quando o volume interno da unidade dessecante é de 7 litros, se a variável velocidade do ar está no nível inferior, ou seja, 1 m/s, a adsorção de água pela sílica gel é mínima quando o número de bandejas está no nível superior, ou seja, duas bandejas.

Quando o número de bandejas está no nível inferior, há tendência de crescimento da massa de água adsorvida quando a velocidade do ar aumenta e, quando está no nível superior, o crescimento da velocidade do ar provoca pequeno aumento na massa de água adsorvida.

Por sua vez, quando a velocidade do ar está no nível inferior ou no nível superior, a adsorção de água tende a diminuir com o aumento do número de bandejas.

- **Caso 2: A variável volume interno é desconsiderada;**

Figura 4.11 - Superfície de resposta e projeção no plano para o caso 2.



Fonte: Própria autora.

Quando o volume interno da unidade dessecante não é levado em consideração, o gráfico obtido para velocidade do ar *versus* número de bandejas é diferente de quando o volume está no nível inferior.

Foi possível notar que, quando as duas variáveis estão no nível inferior e quando velocidade está no inferior e número de bandejas no superior, temos configurações menos favoráveis à adsorção de água pela sílica gel.

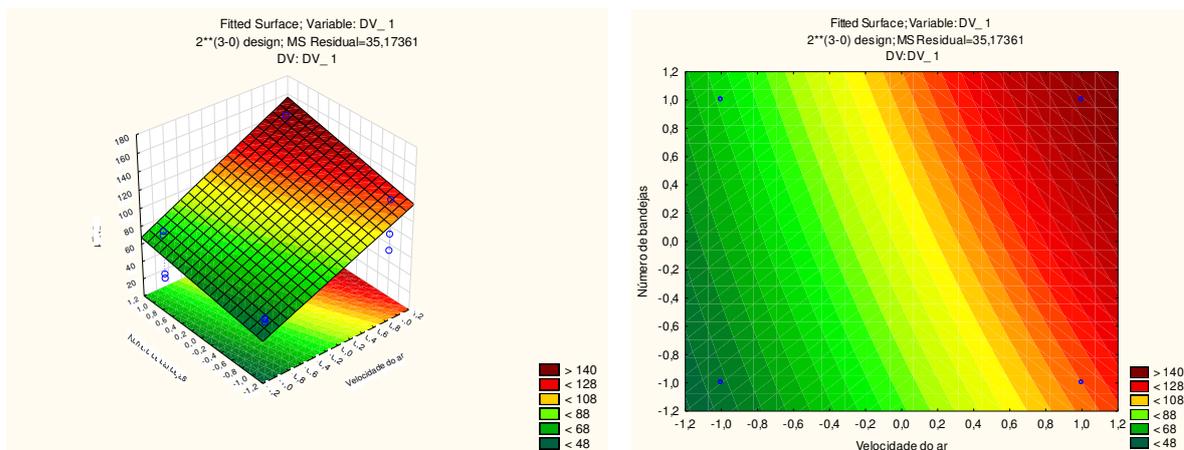
Quando número de bandejas está no nível inferior ou superior, há uma tendência de crescimento na adsorção de água pelo dessecante quando a velocidade do ar cresce.

Para este caso, a melhor configuração da unidade foi com as duas variáveis no nível superior (velocidade do ar de 2 m/s e duas bandejas).

- **Caso 3: A variável volume interno está no nível superior**

Para este caso em que o volume interno da unidade dessecante é de 24 litros, os resultados obtidos estão mais próximos aos obtidos quando não se considera o volume interno. O que difere, principalmente, é o fato de a configuração menos favorável ser aquela em que as variáveis estão ambas no nível inferior (cf. Figura 4.12).

Figura 4.12 - Superfície de resposta e projeção no plano para o caso 3.

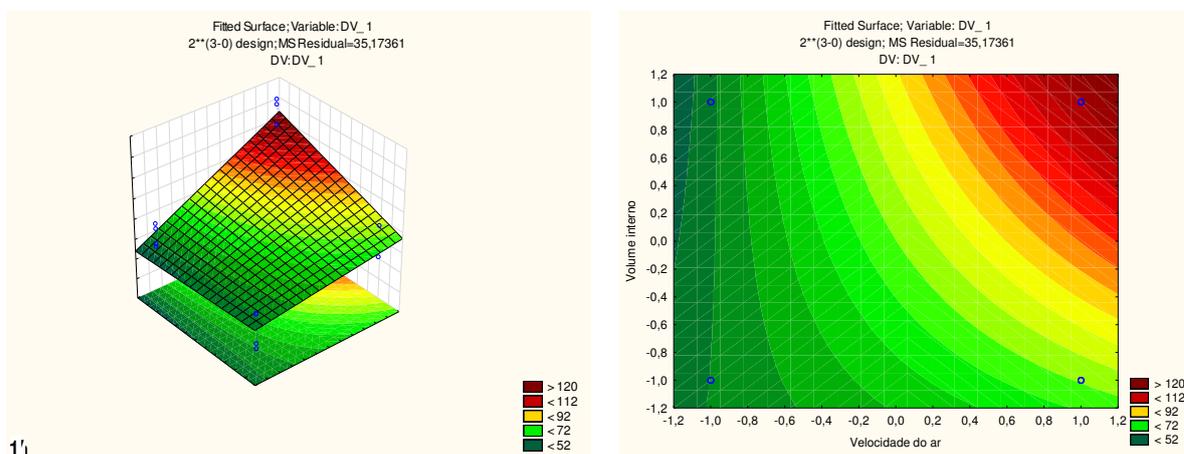


Fonte: Própria autora.

b) Analisando as variáveis **velocidade do ar** e **volume interno**, temos mais três possibilidades:

- **Caso 4: A variável número de bandejas está no nível inferior;**

Figura 4.13 - Superfície de resposta e projeção no plano para o caso 4.

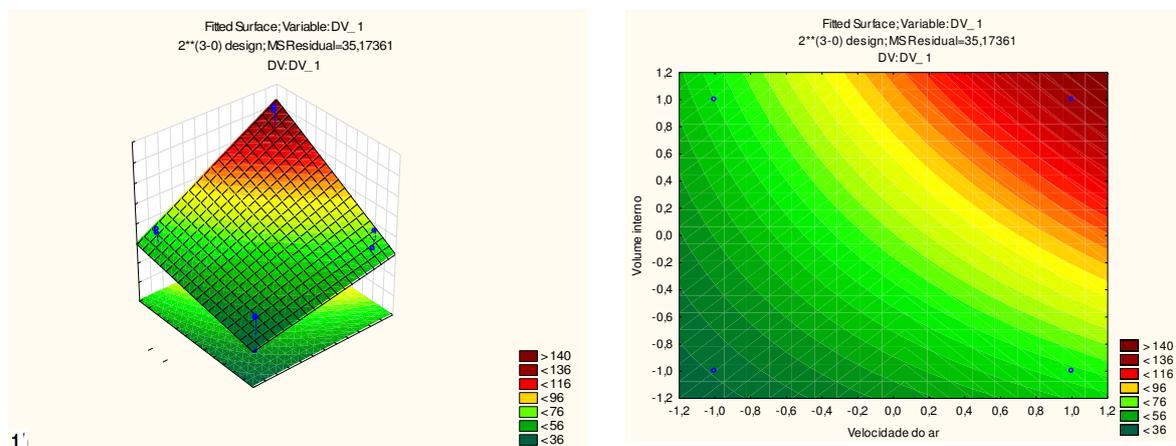


Fonte: Própria autora.

Neste caso, a configuração mais eficiente é aquela em que as variáveis estão no nível superior. As demais configurações não são favoráveis, sendo a menos favorável aquela em que a velocidade está no nível inferior e o volume interno no nível superior.

- **Caso 5: A variável número de bandejas é desconsiderada;**

Figura 4.14 - Superfície de resposta e projeção no plano para o caso 5.

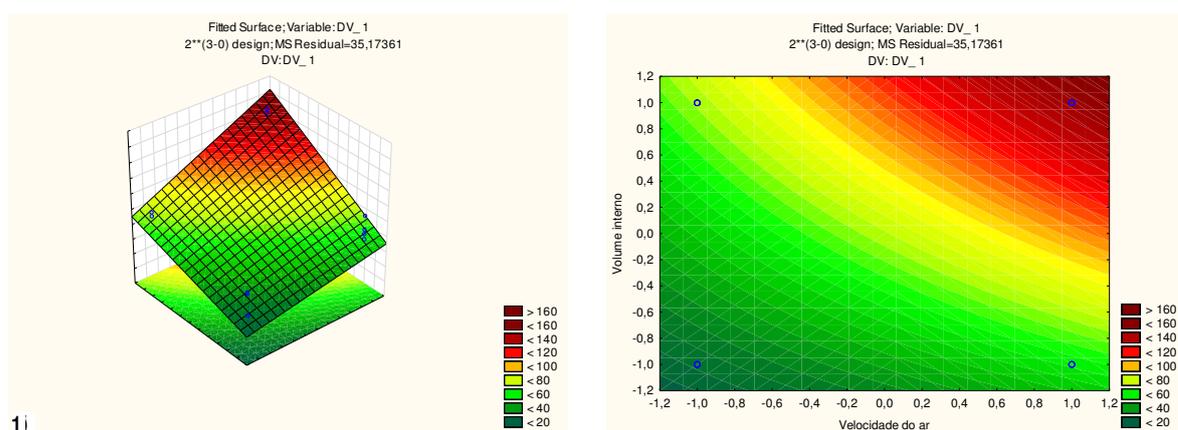


Fonte: Própria autora.

O comportamento aqui é parecido com o anterior, diferindo na configuração menos favorável, que é quando as duas variáveis estão no nível inferior e nos valores de massa de água adsorvidos que, neste caso, foi superior a 140 g.

- **Caso 6: A variável número de bandejas está no nível superior**

Figura 4.15 - Superfície de resposta e projeção no plano para o caso 6.



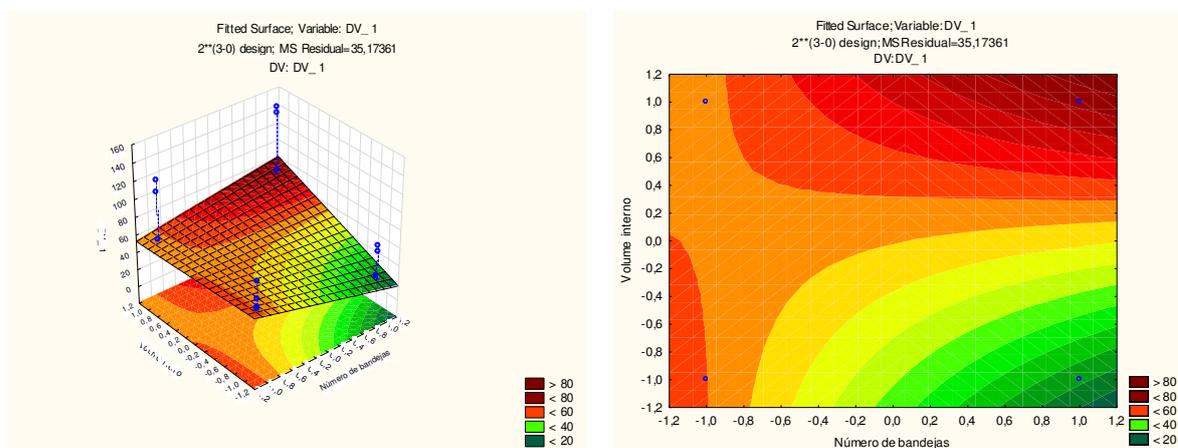
Fonte: Própria autora.

O comportamento do caso 6 é semelhante aos casos 4 e 5, diferindo um pouco na extensão da faixa em vermelho, que é maior, e na tendência de massa de água, que pode ser adsorvida no dessecante. Vale destacar que a faixa em vermelho mais escuro passa dos 160 g.

c) Analisando as **variáveis número de bandejas e volume interno**, temos as três últimas possibilidades:

- **Caso 7: A variável velocidade do ar está no nível inferior;**

Figura 4.16 - Superfície de resposta e projeção no plano para o caso 7.



Fonte: Própria autora.

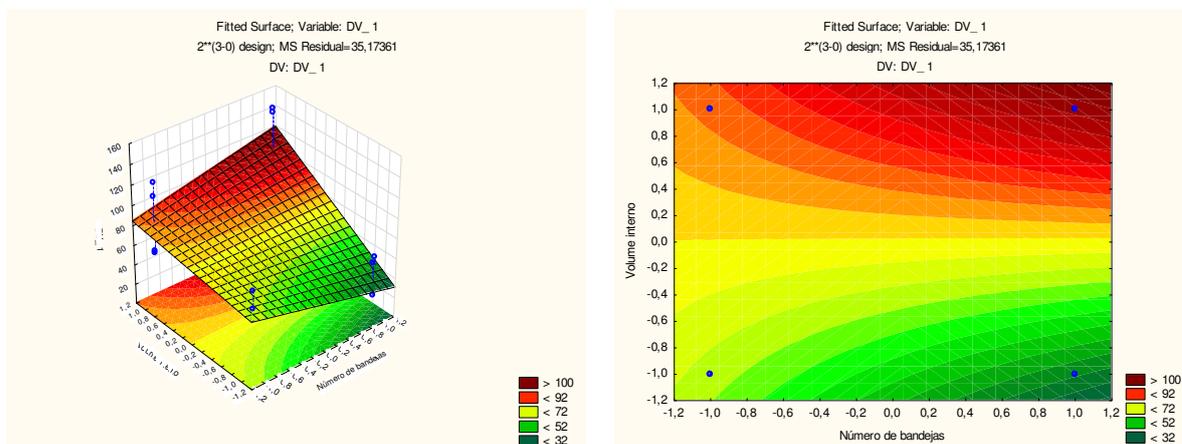
Neste caso, em que a variável velocidade do ar é 1m/s, apenas uma configuração da unidade dessecante foi desfavorável à adsorção de água pela sílica gel, a saber, quando o número de bandejas está no nível superior e o volume interno no nível inferior. A melhor configuração se apresenta quando ambas as variáveis estão no nível superior, seguida daquela em que ambas as variáveis estão no nível inferior.

- **Caso 8: A variável velocidade do ar é desconsiderada;**

Quando se desconsidera a velocidade do ar, as melhores configurações são quando a variável volume interno está no nível superior, sendo a configuração ótima quando ambas as variáveis estão no nível superior. Se o volume interno está no nível inferior, o aumento no

número de bandejas provoca diminuição na massa de água adsorvida no dessecante, como pode ser observado na Figura 4.17.

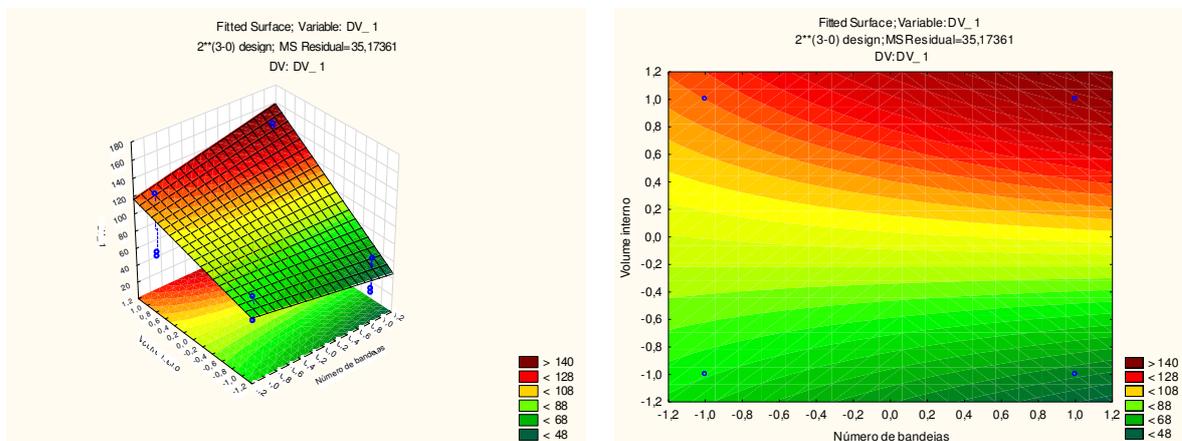
Figura 4.17: Superfície de resposta e projeção no plano para o caso 8.



Fonte: Própria autora.

- **Caso 9: A variável velocidade do ar está no nível superior.**

Figura 4.18 - Superfície de resposta e projeção no plano para o caso 9.



Fonte: Própria autora.

Finalmente, quando a velocidade está no nível superior, foi possível observar que o crescimento do número de bandejas, quando o volume é de 7 litros, provoca decréscimo na massa de água adsorvida no dessecante enquanto que se a volume interno está no nível superior, o crescimento no número de bandejas melhora significativamente o desempenho do equipamento.

Analisando o Gráfico de Pareto, tem-se que as variáveis mais significativas para o processo são velocidade do ar e volume interno da unidade dessecante. Através da matriz de planejamento experimental (Tabela 4.5), pode-se observar que as configurações de unidade dessecante mais eficientes foram: UD6 e UD8. Elas adsorveram, respectivamente, em média, 116,50 g e 145,50 g de vapor de água. Nos experimentos realizados com as UD6 e UD8 o volume interno foi de 24 litros e a velocidade do ar foi de 2 m/s.

E, por fim, observando as análises das superfícies de resposta dos casos 4, 5 e 6 (que estudam as variáveis velocidade do ar e volume interno), nota-se que quando o número de bandejas está no nível inferior, a adsorção de água foi um pouco maior que 120,00 g e quando é desconsiderado, ou está no nível superior, foi maior que 140,00 g. Sendo que quando está o nível superior (duas bandejas) a faixa em vermelho é mais abrangente e pode apresentar valores superiores a 160,00 g.

Diante do exposto, foi possível inferir como configuração ótima para a unidade dessecante: Velocidade do ar de 2 m/s, duas bandejas e volume interno de 24 litros. Esta configuração permitiu adsorção de 148,00 g e 143,00 g de vapor d'água nos experimentos realizados.

A Tabela ANOVA (Tabela 4.6) para este planejamento ficou como apresentado a seguir. A partir do teste F, que utiliza a tabela de distribuição F de Fisher-Snedecor, pode-se concluir que o planejamento experimental fatorial realizado gerou um modelo linear significativo e preditivo.

Tabela 4.6 - Tabela ANOVA para a unidade dessecante.

Fonte de Variação	Soma dos quadrados (S.Q)	Graus de liberdade (G.L)	Quadrado da Média (Q.M)	Teste F
Regressão	20621,26	4	5155,32	146,58
Resíduos	316,56	11	35,17	1
Total	20937,92	-	-	-
Coefficiente de Correlação: R²			98,49%	

Fonte: Própria autora.

Como o $F_{calculado}$ para a regressão foi de **146,58** (ver Tabela 4.6) e, para este caso o $F_{tabelado}$ é 3,36 (obtido na Tabela do teste estatístico F - apêndice C - para os graus de liberdade 4 e 9 da regressão e dos resíduos, respectivamente).

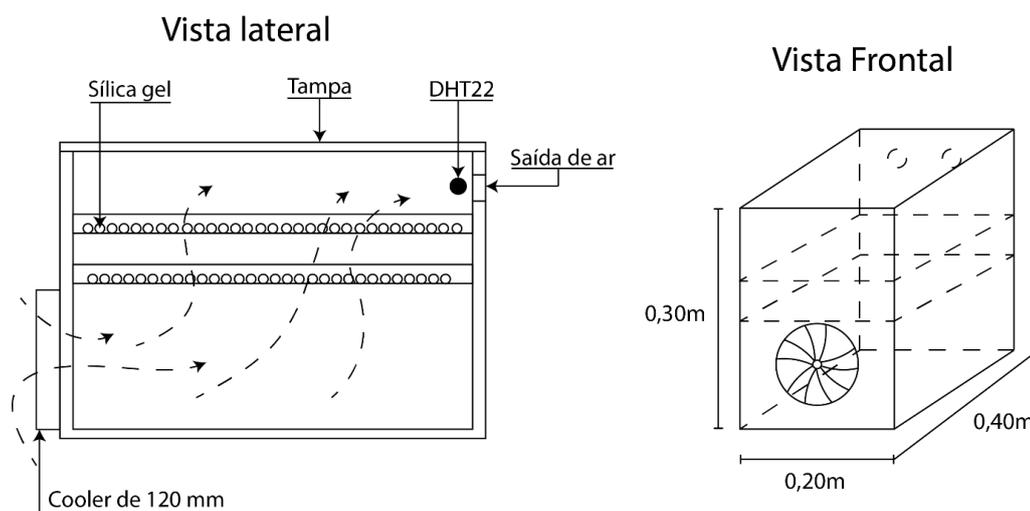
Assim, o modelo é significativo e preditivo, ou seja, além de representar adequadamente os experimentos realizados, o modelo pode ser utilizado para fins preditivos afim de prever respostas aproximadas para outras réplicas dos testes realizados.

Assim, pode-se resumir os experimentos e o tratamento feito a partir da técnica do planejamento experimental como segue:

- O nível de acurácia dos experimentos, $R^2 = 98,49\%$, é considerado satisfatório;
- O modelo linear obtido é preditivo, ou seja, pode ser utilizado para repetições dos experimentos;
- São significativas duas variáveis e duas combinações de variáveis.
- A configuração ótima obtida para a unidade dessecante foi a com níveis codificados por [+1] para ambas as variáveis analisadas, ou seja, aquela com 24 litros de volume interno, possui duas bandejas e o ar que entra na unidade tem velocidade de 2 m/s.

Na Figura 419, é apresentado uma representação esquemática da unidade dessecante otimizada. E na Figura 4.20, pode-se observar a imagem da unidade dessecante utilizada nos experimentos de secagem.

Figura 4.19 - Desenho esquemático da unidade dessecante otimizada.



Fonte: Própria autora.

Figura 4.20 – Unidade dessecante desenvolvida e otimizada através do DOE.



Fonte: Própria autora.

4.2 Ensaaios experimentais para o coletor solar

Entre os dias 01 e 30 de novembro de 2020 (período de primavera), foram realizados testes experimentais dos coletores solares, sem carga, na cidade de Pombal/PB, verificando a variação de temperatura alcançada entre a temperatura do ar ambiente (T_a) e a temperatura do ar na saída do coletor (T_{sC}).

Cada coletor ficou exposto à radiação solar por 04 (quatro) horas, sempre das 10:00 h às 14:00 h. Os dados de temperatura e umidade relativa do ar foram obtidos pelos sensores DHT22 e armazenados em cartões de memória para posterior tratamento. Foram realizados 12 experimentos sendo 3 experimentos para cada configuração de coletor solar.

Para os dados de temperatura do ar ambiente, umidade relativa do ar ambiente e irradiação solar durante a realização destes 12 experimentos, foram calculados a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação (c.v) de cada intervalo de uma hora, de modo a garantir que todos os experimentos foram realizados sob condições climáticas e meteorológicas similares e assegurar que a interpretação dos resultados não seja prejudicada pelo fato destes testes não terem sido realizados simultaneamente.

Os dados da média e do coeficiente de variação obtidos, para cada intervalo de uma hora de experimento, estão apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Média e coeficiente de variação dos experimentos.

Intervalo	Temperatura (°C)		Umidade Relativa (%)		Irradiação solar ($\frac{W}{m^2}$)	
	Média (°C)	c.v (%)	Média (%)	c.v (%)	Média ($\frac{W}{m^2}$)	c.v (%)
10:00 – 11:00	39,53	4	38,90	5,7	998,91	7,5
11:00 - 12:00	41,72	4,7	35,14	6,8	990,09	6,5
12:00 – 13:00	43,58	4,4	38,63	5,7	958,86	6,4
13:00 – 14:00	43,48	3,9	35,13	7,1	822,74	8,2

Fonte: Própria autora.

Assim, como o coeficiente de variação, nos quatro intervalos de tempo de uma hora, para os dados de temperatura e umidade relativa do ar ambiente e para os dados de irradiação solar média incidente, para os 12 experimentos realizados, foi de, no máximo, 8,2%, pode-se concluir que a dispersão dos dados em torno da média é baixa, o que significa que nos 12 ensaios, as condições climáticas e meteorológicas são similares, de modo que pode-se considerar que estes experimentos foram realizados, estatisticamente, sob as mesmas condições de temperatura, umidade relativa e irradiação solar.

Os experimentos realizados com o coletor solar 3 ocorreram nos dias 01, 10 e 30 de novembro de 2020 e a Tabela 4.8 apresenta o resumo das principais informações obtidas.

Tabela 4.8 - Resumo de dados dos experimentos realizados com o coletor solar 3.

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
Umidade relativa do ar ambiente média (%)	36,74	36,64	36,89
Umidade relativa do ar de saída média (%)	22,47	20,57	21,50
Temperatura do ar ambiente média (°C)	43,06	41,23	40,89
Temperatura do ar de saída média (°C)	70,88	66,10	67,70
Média UR _a – UR _{sC} (%)	14,27	16,06	15,39
Média T _{sC} – T _a (°C)	27,83	24,87	26,81

Fonte: Própria autora.

Foi possível observar que a variação média de temperatura foi de 26,50°C e a variação de umidade relativa foi de 15,24%.

Nas Tabelas 4.9 e 4.10, são apresentadas as médias de temperatura e de umidade relativa do ar ambiente e do ar na saída do coletor solar 3 quando da realização dos experimentos.

Tabela 4.9 - Valor da temperatura (°C) média no coletor solar 3.

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3	
		Data: 01/11/2020		Data: 10/11/2020		Data: 30/11/2020	
		Ta	TsC	Ta	TsC	Ta	TsC
0-60	10:00-11:00	39,29	61,81	39,35	63,10	39,61	66,13
60-120	11:00-12:00	43,23	72,98	40,32	64,87	41,41	70,07
120-180	12:00-13:00	45,34	76,83	42,66	69,59	41,78	69,81
180-240	13:00-14:00	44,35	71,90	42,56	66,84	40,77	64,83

Fonte: Própria autora.

Tabela 4.10 - Valor da umidade relativa (%) média no coletor solar 3.

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3	
		Data: 01/11/2020		Data: 10/11/2020		Data: 30/11/2020	
		URa	URsC	URa	URsC	URa	URsC
0-60	10:00-11:00	40,40	25,55	40,04	22,15	40,95	22,62
60-120	11:00-12:00	37,74	22,05	37,81	20,95	36,97	21,20
120-180	12:00-13:00	40,22	25,32	39,86	21,84	40,87	22,60
180-240	13:00-14:00	37,86	22,03	37,91	21,18	36,87	21,16

Fonte: Própria autora.

Com base nos dados apresentados nas Tabelas 4.9 e 4.10, referentes ao experimento realizado no dia 01 de novembro de 2020, é possível observar que a umidade relativa do ar ambiente entre 10:00 h e 11:00 h e entre 12:00 h e 13:00 h estão entorno de 40% enquanto a

temperatura fica abaixo de 40°C no primeiro caso e por volta de 45°C no segundo caso, o que pode ter influenciado no aumento de temperatura para cerca de 60°C e para mais que 75°C, respectivamente. Mostrando a influência da quantidade de água presente no ar no processo de aquecimento deste ar. Pode-se ainda observar que entre 11:00 h e 12:00 h e entre 13:00 h e 14:00 h as umidades relativas e a temperaturas ambiente são praticamente iguais e gerou iguais ganhos de temperatura.

Com base nos dados apresentados nas Tabelas 4.9 e 4.10, pode-se observar o mesmo comportamento em relação ao ganho de temperatura do ar e a diminuição da umidade relativa do ar nas duas réplicas do experimento, o que mostra que estes experimentos foram conduzidos com a mesma metodologia e sob condições semelhantes. Vale sempre destacar que isto é muito importante para uma análise mais precisa dos resultados.

Assim, nos três experimentos realizados com o coletor solar sem telha de zinco e com cobertura transparente feita de plástico estufa, pode-se observar um ganho médio de temperatura entre 24°C e 28°C, e a influência da água presente no ar ambiente neste aquecimento.

Na Tabela 4.11, constam as principais informações dos experimentos realizados com os coletores solares 1, 2, 3 e 4.

Tabela 4.11 - Resumo dos dados dos experimentos com os coletores solares 1, 2, 3 e 4.

Coletor solar	ΔT (°C)			ΔUR (%)		
	Experimento			Experimento		
	1	2	3	1	2	3
CS1	22,01	23,00	24,48	13,67	11,65	12,72
CS2	37,20	35,35	30,54	16,12	13,80	14,38
CS3	27,83	24,87	26,81	14,27	16,06	15,39
CS4	46,65	47,96	44,06	23,02	15,10	18,47

Fonte: Própria autora.

Comparando-se os resultados obtidos com os experimentos realizados com o coletor solar 1 (coletor sem telha e com cobertura de plástico estufa) e o coletor solar 3 (coletor sem

telha e com cobertura de policarbonato alveolar) observa-se que a mudança no material da cobertura transparente do coletor solar provocou uma diferença de temperatura de 3,34°C a menos.

Comparando-se os resultados obtidos com os experimentos realizados com o coletor solar 2 (coletor com telha e com cobertura de plástico estufa) e o coletor solar 4 (coletor com telha e com cobertura de policarbonato alveolar) observa-se que a mudança no material da cobertura transparente do coletor solar provocou uma diferença de temperatura de 19,72°C a mais.

Comparando-se os resultados obtidos com os experimentos realizados com o coletor solar 3 (coletor sem telha e com cobertura de policarbonato alveolar) e o coletor solar 4 (coletor com telha e com cobertura de policarbonato alveolar) observa-se que a inserção de uma telha de zinco pintada de preto fosco no coletor solar provocou uma diferença de temperatura de 23,06°C a mais.

Os experimentos realizados com o coletor solar 4 ocorreram nos dias 18, 23 e 26 de novembro de 2020 e a Tabela 4.12 apresenta o resumo das principais informações obtidas.

Tabela 4.12 - Resumo de dados dos experimento realizados com o coletor solar 4.

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
Umidade relativa do ar ambiente média (%)	34,70	31,94	33,36
Umidade relativa do ar de saída média (%)	11,68	16,85	14,88
Temperatura do ar ambiente média (°C)	39,76	42,67	43,11
Temperatura do ar de saída média (°C)	86,40	90,64	87,18
Média $UR_a - UR_{sC}$ (%)	23,02	15,10	18,47
Média $T_{sC} - T_a$ (°C)	46,65	47,96	44,06

Fonte: Própria autora.

É possível observar que a variação média de temperatura é de 46,22°C e a variação média de umidade relativa é de 18,86%.

Nas Tabelas 4.12 e 4.13, são apresentadas as médias de temperatura e de umidade relativa do ar ambiente e do ar na saída do coletor solar 4 quando da realização dos experimentos

Tabela 4.13 - Valor da temperatura (°C) média no coletor solar 4.

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3	
		Data: 18/11/2020		Data: 23/11/2020		Data: 26/11/2020	
		T _a	T _{sC}	T _a	T _{sC}	T _a	T _{sC}
0-60	10:00-11:00	37,44	83,40	40,85	91,11	38,43	74,36
60-120	11:00-12:00	38,82	86,42	43,07	95,94	43,25	93,58
120-180	12:00-13:00	40,96	90,65	43,87	92,04	45,20	93,93
180-240	13:00-14:00	41,78	85,17	42,91	83,57	45,54	86,83

Fonte: Própria autora.

Tabela 4.14 - Valor da umidade relativa (%) média no coletor solar 4.

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3	
		Data: 01/11/2020		Data: 10/11/2020		Data: 30/11/2020	
		UR _a	UR _{sC}	UR _a	UR _{sC}	UR _a	UR _{sC}
0-60	10:00-11:00	39,97	12,24	36,27	18,14	42,05	18,24
60-120	11:00-12:00	36,23	12,01	31,86	17,49	32,54	14,35
120-180	12:00-13:00	39,61	12,23	36,13	18,11	41,41	16,94
180-240	13:00-14:00	36,29	11,99	31,69	17,45	32,16	14,36

Fonte: Própria autora.

Observando os dados apresentados na Tabela 4.12 foi possível concluir que durante as duas primeiras horas do experimento com o coletor solar 4, a temperatura média do ar ambiente fica um pouco abaixo de 40°C e nas duas últimas horas fica acima deste valor. Durante todo o experimento a temperatura média do ar na saída fica acima dos 80°C chegando a passar dos 90°C entre 12:00 h e 13:00 h.

Com relação a umidade relativa do ar, o crescimento do valor da temperatura acompanha o decréscimo do valor de umidade relativa. Sendo que a umidade relativa média do ar ambiente fica entre 35% e 40%, obtendo valores menores que 15% na saída em todo o experimento.

As informações dos experimentos realizados com os coletores 2 e 3 encontram-se no Apêndice D, de modo a otimizar e tornar mais fluida a leitura deste texto.

Vale salientar que embora temperaturas acima de 80°C não sejam ideais para a secagem de frutas como a banana, os experimentos foram realizados com o objetivo de identificar qual configuração de coletor solar permite maior ganho de temperatura e que estes testes foram realizados com convecção natural. Na convecção natural o ar passa pelo coletor mais lentamente e conseqüentemente mantém maior contato com o trocador de calor e sua temperatura pode chegar a níveis mais elevados que na convecção forçada.

4.2.1 Planejamento experimental fatorial para o coletor solar

Os resultados ora apresentados representam a aplicação da metodologia do planejamento experimental na determinação da configuração ótima de um sistema capaz de elevar a temperatura do ar ambiente a níveis suficientes para realizar o processo de secagem solar.

Identificar qual configuração de coletor solar permite obter um maior ganho de temperatura, ou seja, maior diferença (ΔT) de temperatura entre a temperatura do ar ambiente (T_a) (que entra no coletor) e a temperatura do ar que sai deste coletor (T_{sC}) foi o objetivo deste planejamento, por esta razão ΔT será estudada como resposta do planejamento experimental.

Os 12 experimentos necessários para realizar um planejamento experimental completo 2^2 com duas réplicas foram realizados entre os dias 01 e 30 de novembro de 2020 na cidade de Pombal/PB com condições climáticas de umidade relativa ambiente média de 34,54% e temperatura ambiente média de 42,08°C. A matriz codificada do planejamento está representada na Tabela 4.15, com a respectiva resposta obtida em cada ensaio.

Tabela 4.15 - Matriz do planejamento experimental codificada para o coletor solar.

	Capacitor térmico	Cobertura transparente	ΔT_{EXP1} (°C)	ΔT_{EXP2} (°C)	ΔT_{EXP3} (°C)
CS1	-1	-1	27,83	24,87	26,81
CS2	+1	-1	37,20	35,35	30,54

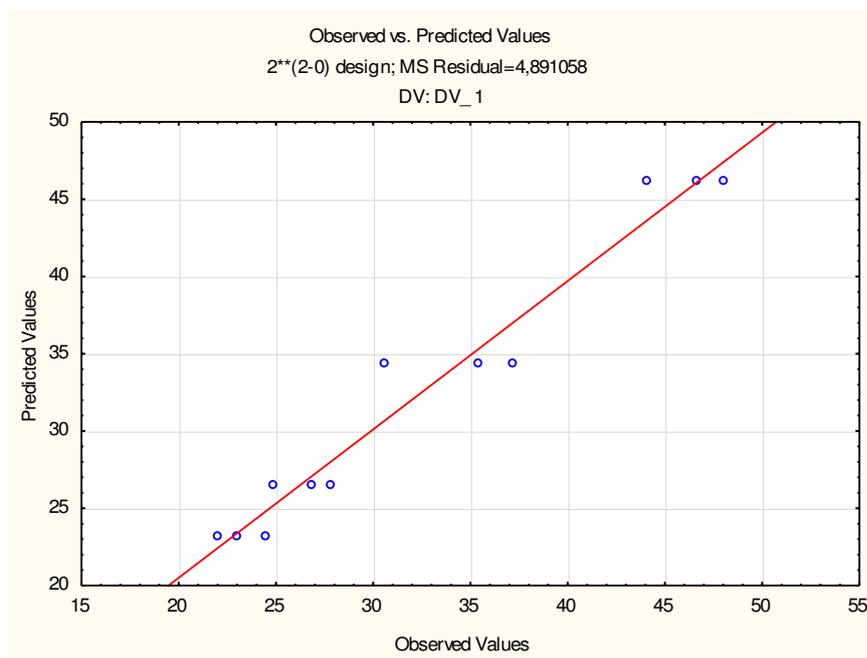
CS3	-1	+1	22,01	23,00	24,48
CS4	+1	+1	46,65	47,96	44,06

Fonte: Própria autora.

Os resultados obtidos nos experimentos foram tratados pelo *Design of Experimental (DOE)* – planejamento experimental no *software Statistic* versão 10.0, permitindo, assim, extrair as informações estatísticas necessárias à interpretação e otimização do coletor solar para o sistema de secagem proposto.

Os testes realizados obtiveram um coeficiente de correlação de 96,10%, o que representa um resultado muito bom, já que para este tipo de análise o coeficiente de correlação acima de 95% é considerado satisfatório. A Figura 4.21, ilustra os valores observados e previstos.

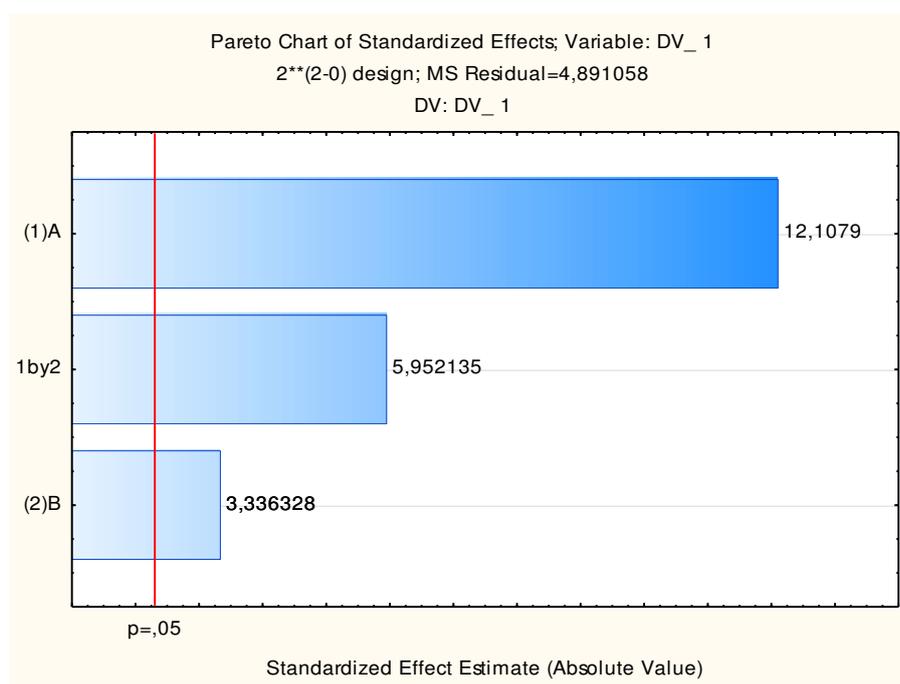
Figura 4.21 - Valores observados x valores previstos para o planejamento experimental fatorial para o coletor solar.



Fonte: Própria autora.

A interpretação das variáveis com significância estatística para o processo pode ser feita observando o gráfico de Pareto (Figura 4.22).

Figura 4.22 - Gráfico de Pareto para o coletor solar.



Fonte: Própria autora.

A partir do Gráfico 4.17, foi possível concluir que tanto as variáveis capacitor térmico e cobertura transparente, bem como a interação entre elas são significativas. Sendo a variável capacitor a mais relevante, seguida da interação com a variável cobertura e por esta.

O modelo linear estatístico do planejamento realizado é

$$Y = 32,56 + 7,73A + 2,13B + 3,80AB + 1,28$$

onde:

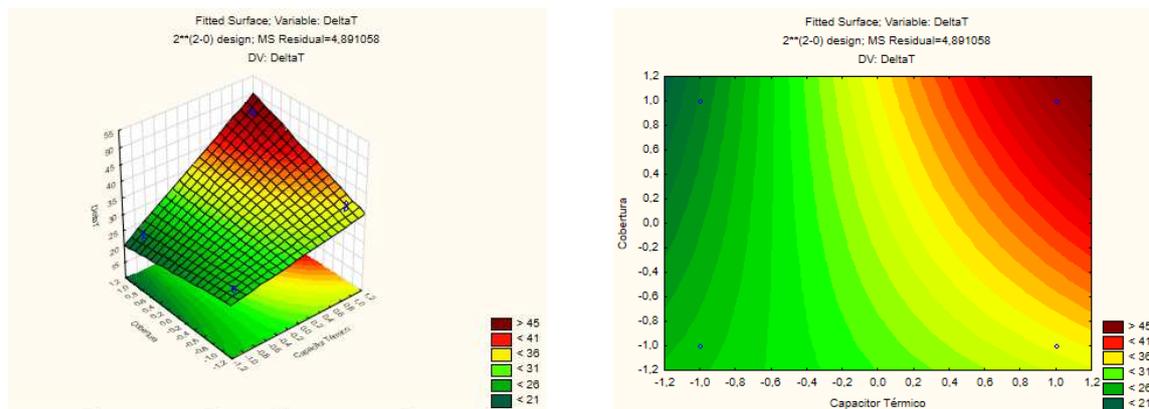
A é a variável capacitor térmico;

B é a variável cobertura transparente;

AB é a interação entre as variáveis A e B.

A Figura 4.23, apresenta a superfície de resposta e sua projeção no plano cartesiano para o planejamento experimental fatorial realizado para o coletor solar.

Figura 4.23 - Superfície de resposta e projeção no plano para o coletor solar.



Fonte: Própria autora.

É possível observar que a configuração ótima é obtida quando ambas as variáveis estão no nível superior, ou seja, uso do capacitor térmico e cobertura de polycarbonato alveolar.

Em contrapartida, o coletor solar que se apresentou menos eficiente foi o de cobertura de polycarbonato e sem capacitor.

Ainda analisando os gráficos de superfície de resposta pode-se observar que o ganho de temperatura na configuração de cobertura transparente codificado por [-1], ou seja, plástico estufa apresenta tendência de crescimento quando combinado com o capacitor térmico codificado por [+1], ou seja, telha de zinco pintada de preto fosco e que o ganho de temperatura para esta configuração, que é na faixa de 31°C a 36°C, é suficiente para que o processo de secagem solar aconteça quando se faz uso de convecção natural.

O estudo deste equipamento com convecção forçada fica como proposta para trabalhos futuros.

Com isto foi possível apresentar ao produtor em regime de agricultura familiar uma opção de material transparente barato e tecnicamente viável para ser usado no processo de secagem solar usando convecção natural.

A Tabela ANOVA para este planejamento ficou como apresentado na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Tabela ANOVA para o coletor solar.

Fonte de Variação	Soma dos quadrados (S.Q)	Graus de liberdade (G.L)	Quadrado da Média (Q.M)	Teste F
Regressão	948,83	3	316,28	65,48
Resíduos	38,63	8	4,83	1
Total	987,46	-	-	-

Coefficiente de Correlação: R² 96,10%

Fonte: Própria autora.

Neste caso o $F_{calculado}$ para a regressão foi de **65,48** (ver Tabela 4.16) e o $F_{tabelado}$ foi 4,07 (obtido na Tabela do teste estatístico F - apêndice C - para os graus de liberdade 3 e 8 da regressão e dos resíduos, respectivamente).

Assim, conclui-se que modelo linear obtido é significativo e preditivo, ou seja, além de representar adequadamente os experimentos realizados, o modelo pode ser utilizado para fins preditivos afim de prever respostas aproximadas para outras réplicas dos testes realizados.

Pode-se resumir os experimentos e o tratamento feito a partir da técnica do planejamento experimental fatorial como segue:

- O nível de acurácia dos experimentos, $R^2 = 96,10\%$, é considerado satisfatório;
- O modelo linear obtido é preditivo, ou seja, pode ser utilizado para repetições dos experimentos;
- As duas variáveis estudadas são significativas, bem como a interação entre elas;
- A configuração ótima obtida para o coletor solar foi a com níveis codificados por [+1] para ambas as variáveis analisadas, ou seja, aquele que usa a telha de zinco pintada de preto fosco como capacitor térmico e cuja cobertura transparente é o policarbonato alveolar.

4.3 Análise dos ensaios experimentais de secagem

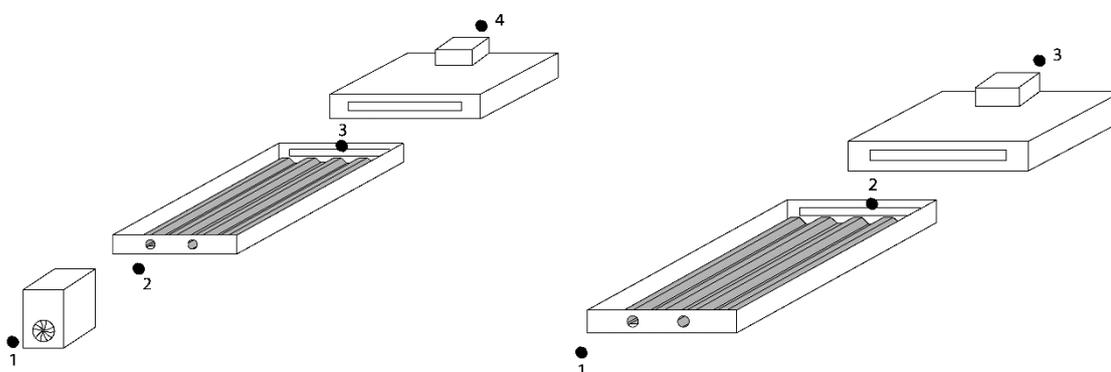
Nesta sessão são apresentados os resultados obtidos na realização de oito (08), dos dezesseis (16), experimentos de secagem solar utilizando os sistemas de secagem desenvolvidos.

Em cada experimento foram medidos:

- Massa da banana (g) (no início do processo de secagem e de hora em hora);
- Massa da sílica gel (1000,0 g no início do processo de secagem);
- Temperatura e umidade relativa do ar ambiente (T_a e UR_a);
- Temperatura e umidade relativa na saída da unidade dessecante (T_{sUD} e UR_{sUD});
- Temperatura e umidade relativa na saída do coletor solar do S_{com} (T_{sCcom} e UR_{sCcom});
- Temperatura e umidade relativa na saída do coletor solar do S_{sem} (T_{sCsem} e UR_{sCsem});
- Temperatura e umidade relativa na saída da câmara de secagem do S_{com} (T_{sKcom} e UR_{sKcom});
- Temperatura e umidade relativa na saída da câmara de secagem do Sistema S_{sem} (T_{sKsem} e UR_{sKsem}).

Na Figura 4.24, são apresentados, para facilitar a leitura e a compreensão dos experimentos realizados, informações detalhadas da posição dos sensores de temperatura e umidade relativa do ar nos sistemas de secagem.

Figura 4.24 - Posição dos sensores de temperatura e umidade relativa do ar.



Fonte: Própria autora.

Os dados de radiação solar foram obtidos no site no INMET.

Os dados de temperatura e umidade relativa obtidos pelos sensores DHT22 no SMAD foram obtidos em intervalos de um minuto e a média horária desses valores foram registradas em tabelas e gráficos.

A partir dos valores obtidos nos experimentos de secagem, são calculados e apresentados os demais parâmetros necessários à construção das respectivas curvas de secagem e do cálculo do rendimento térmico do equipamento.

Os experimentos ocorreram entre 08:00 h e 16:00 h.

Os sistemas de secagem foram montados, o SMAD ligado, as amostras de banana (em triplicada) foram cortadas longitudinalmente, pesadas e medidas e cada uma das metades de cada banana foi destinada a um sistema de secagem. Ajustes foram feitos de modo que cada amostra fosse colocada na bandeja com $37,60 \pm 0,05$ g, ou seja, cada sistema de secagem recebeu $112,80 \pm 0,05$ g de banana.

4.3.1 Testes experimentais realizados no período Primavera/Verão de 2020/2021

Os testes experimentais realizados no período de primavera/verão (2020/2021) foram realizados entre os dias 18 e 21 de janeiro de 2021 em Campina Grande, PB e entre os dias 24 e 28 de janeiro de 2021 em Pombal, PB.

Os testes realizados em Campina Grande foram os primeiros testes realizados com os sistemas de secagem desenvolvidos. Logo, além do processo de secagem em si, foram analisados pontos como vedação entre os componentes, funcionamento adequado do SMAD e viabilidade técnica do sistema como um todo, uma vez que até então a unidade dessecante e o coletor solar haviam sido testados separadamente e analisados via planejamento experimental fatorial e a câmara de secagem ainda não fora testada.

Levou-se em consideração que não há perda de temperatura na conexão entre o coletor solar e a câmara de secagem devido o cuidado com a vedação e o monitoramento das estruturas durante a realização de cada experimento. Assim, considera-se que a temperatura de saída do coletor solar e a de entrada da câmara de secagem são iguais, bem como os valores da umidade relativa no mesmo local.

No sistema sem dessecante, a temperatura e a umidade relativa do ar de entrada no coletor solar é a temperatura e a umidade relativa do ar ambiente, por sua vez, no sistema com

dessecante a temperatura e a umidade relativa de entrada do coletor são os dados de saída da unidade dessecante, mais uma vez considerando o adequado isolamento da conexão.

4.3.1.1 Experimentos realizados em Campina Grande, PB

Em Campina Grande foram realizados quatro (04) testes de secagem entre os dias 18 e 21 de janeiro de 2021. A notação, a descrição e a data de cada experimento encontram-se na Tabela 3.1

O primeiro experimento realizado em Campina Grande, no sistema com unidade dessecante (ECG1_{com}), e o primeiro experimento realizado em Campina Grande no sistema sem unidade dessecante (ECG1_{sem}), foram realizados nos dias 18 e 19 de janeiro, entre 08:00 h e 16:00 h com temperatura do ar ambiente média de 32,8°C, umidade relativa do ar ambiente média de 45,5% e a incidência de radiação solar média de 668,12 W/m².

O segundo experimento realizado em Campina Grande, no sistema com unidade dessecante (ECG2_{com}), e o segundo experimento realizado em Campina Grande no sistema sem unidade dessecante (ECG2_{sem}), foram realizados nos dias 20 e 21 de janeiro de 2021, entre 08:00 h e 16:00 h com temperatura do ar ambiente média de 32,0°C, umidade relativa do ar ambiente média de 49,4% e irradiação solar média de 661,15 W/m².

As bananas utilizadas nestes experimentos possuíam teor de água inicial de 71,10%, massa seca de 10,87 g, massa de equilíbrio de 11,52 g e teor de água de equilíbrio de 5,72%.

Os dados de decaimento médio da massa da banana ao longo da realização dos experimentos estão registrados na Tabela 4.17, para os experimentos ECG1_{com} e ECG1_{sem} e no Apêndice E para os experimentos ECG2_{com} e ECG2_{sem}.

Na Tabela 4.17, pode-se observar que o teor de água máximo, em base úmida, de 25%, estabelecido pela ANVISA é obtido no S_{com} após 780 minutos (13 horas) de experimentos e no S_{sem} após 960 minutos (16 horas) de experimentos, obtendo-se então um ganho de três horas no tempo de secagem ao se utilizar o dessecante sílica gel na unidade dessecante no sistema de secagem solar desenvolvido.

Nestes experimentos a massa da banana correspondente ao teor de água de 25% em base úmida é de 14,50 g. Após 780 minutos a massa média das bananas no sistema com dessecante

é de 14,49 g e somente após 960 minutos é que a massa média das bananas no sistema sem dessecante é menor que 14,50 g, à saber, 14,32 g.

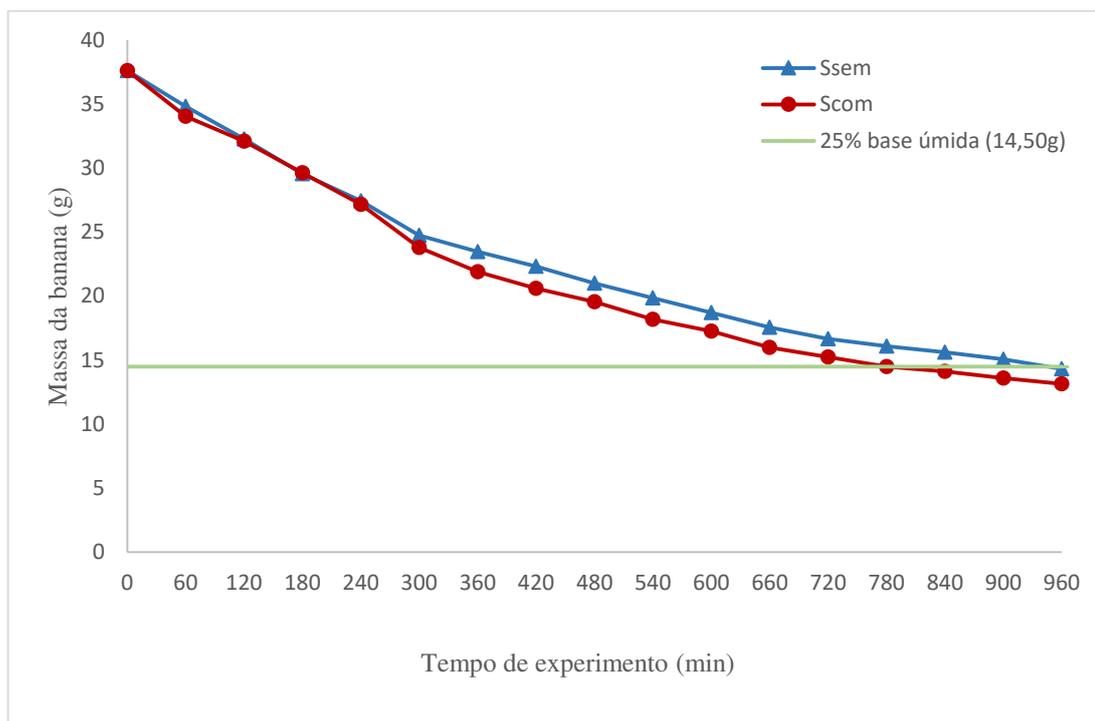
Tabela 4.17 - Decaimento da massa da banana nos experimentos ECG1com e ECG1sem.

Data 18 e 19 /01/2021		ECG1com			ECG1sem		
Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)
0	08:00	37,60	26,73	71,10	37,60	26,73	71,10
60	09:00	34,04	23,18	68,08	34,81	23,94	68,78
120	10:00	32,09	21,23	66,14	32,27	21,40	66,32
180	11:00	29,62	18,76	63,32	29,55	18,69	63,23
240	12:00	27,15	16,28	59,97	27,43	16,56	60,38
300	13:00	23,79	12,93	54,33	24,75	13,88	56,09
360	14:00	21,89	11,02	50,35	23,47	12,60	53,70
420	15:00	20,61	9,74	47,26	22,32	11,45	51,31
480	16:00	19,56	8,70	44,45	20,99	10,12	48,22
540	09:00	18,19	7,32	40,26	19,86	9,00	45,29
600	10:00	17,26	6,39	37,04	18,71	7,84	41,92
660	11:00	15,98	5,11	31,98	17,55	6,68	38,07
720	12:00	15,23	4,37	28,66	16,67	5,81	34,82
780	13:00	14,49	3,66	25,00	16,08	5,22	32,43
840	14:00	14,11	3,24	22,98	15,62	4,75	30,43
900	15:00	13,60	2,73	20,09	15,05	4,18	27,79
960	16:00	13,15	2,28	17,36	14,32	3,46	24,13

Fonte: Própria autora.

Na Figura 4.25, pode-se observar o decaimento da massa da banana a partir dos dados da Tabela 4.17.

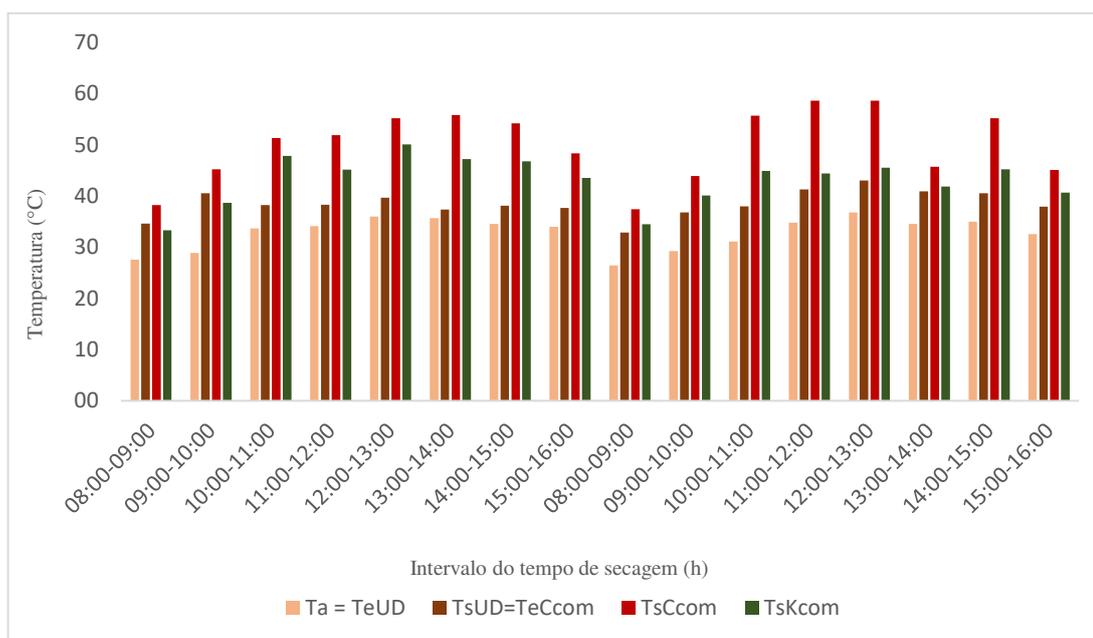
Figura 4.25 - Decaimento da massa da banana durante os experimentos ECG1com e ECG1sem.



Fonte: Própria autora.

Os dados de temperatura e umidade relativa do ar dos experimentos ECG1com e ECG1sem estão apresentados nas Figuras 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29.

Figura 4.26 - Temperaturas do ar no sistema de secagem solar no experimento ECG1com.



Fonte: Própria autora.

onde:

T_a é a temperatura do ar ambiente;

T_{eUD} é a temperatura do ar na entrada na unidade dessecante;

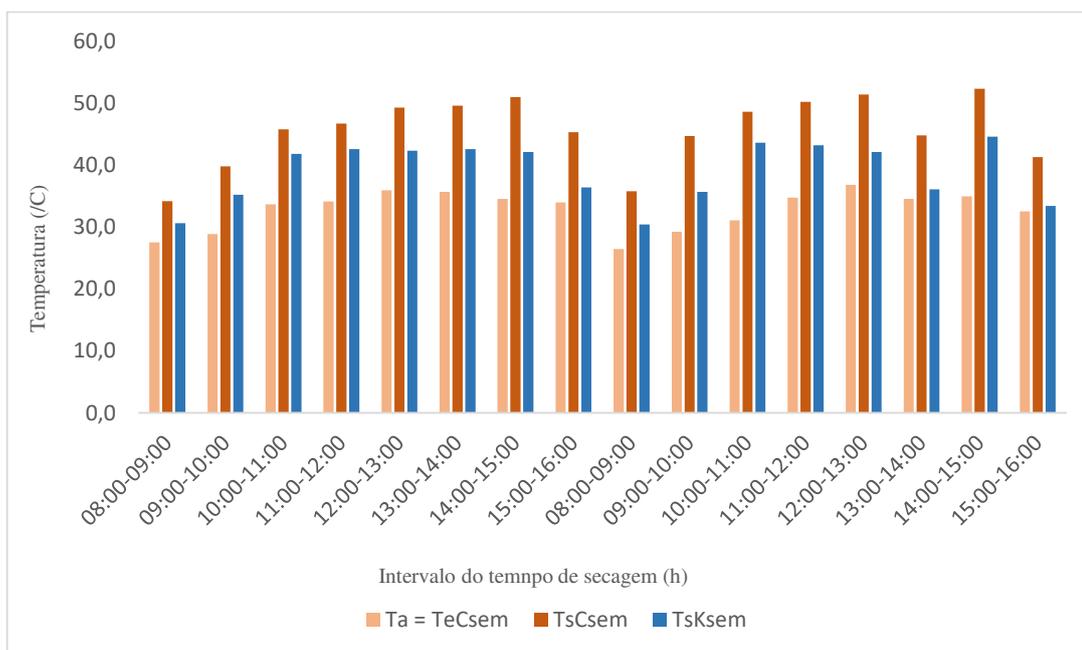
T_{sUD} é a temperatura do ar na saída da unidade dessecante;

T_{eCcom} é a temperatura do ar na entrada do coletor solar do sistema de secagem com unidade dessecante;

T_{sCcom} é a temperatura do ar na saída do coletor solar do sistema de secagem com unidade dessecante;

T_{sKcom} é a temperatura do ar na saída da câmara de secagem do sistema de secagem com unidade dessecante.

Figura 4.27 - Temperaturas do ar no sistema de secagem solar no experimento ECG1sem.



Fonte: Própria autora.

onde:

T_a é a temperatura do ar ambiente;

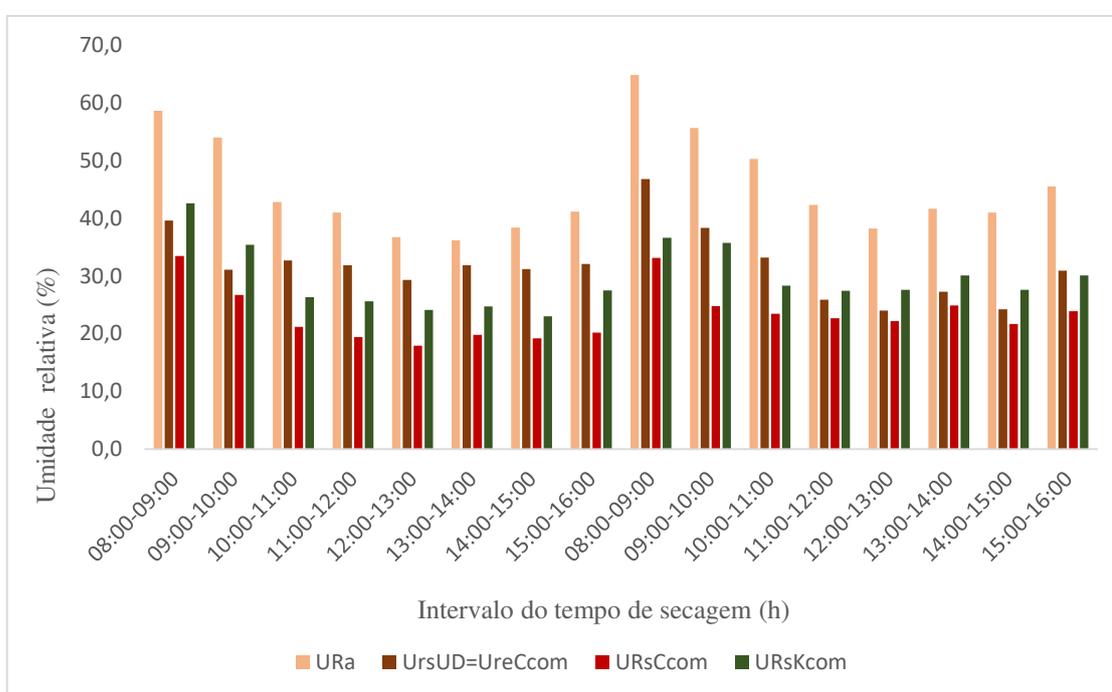
T_{csem} é a temperatura do ar na entrada do coletor solar do sistema de secagem sem unidade dessecante;

T_{sCsem} é a temperatura do ar na saída do coletor solar do sistema de secagem sem unidade dessecante;

T_{sKsem} é a temperatura do ar na saída da câmara de secagem do sistema de secagem sem unidade dessecante.

Foi possível observar que durante todo o experimento a temperatura na entrada do coletor solar do sistema com dessecante é maior que a temperatura do ar na entrada do coletor do sistema sem dessecante. O mesmo ocorre com as temperaturas de saída dos coletores.

Figura 4.28 - Umidades relativas do ar no sistema de secagem no experimento ECG1com.



Fonte: Própria autora.

onde:

UR_a é a unidade relativa do ar ambiente;

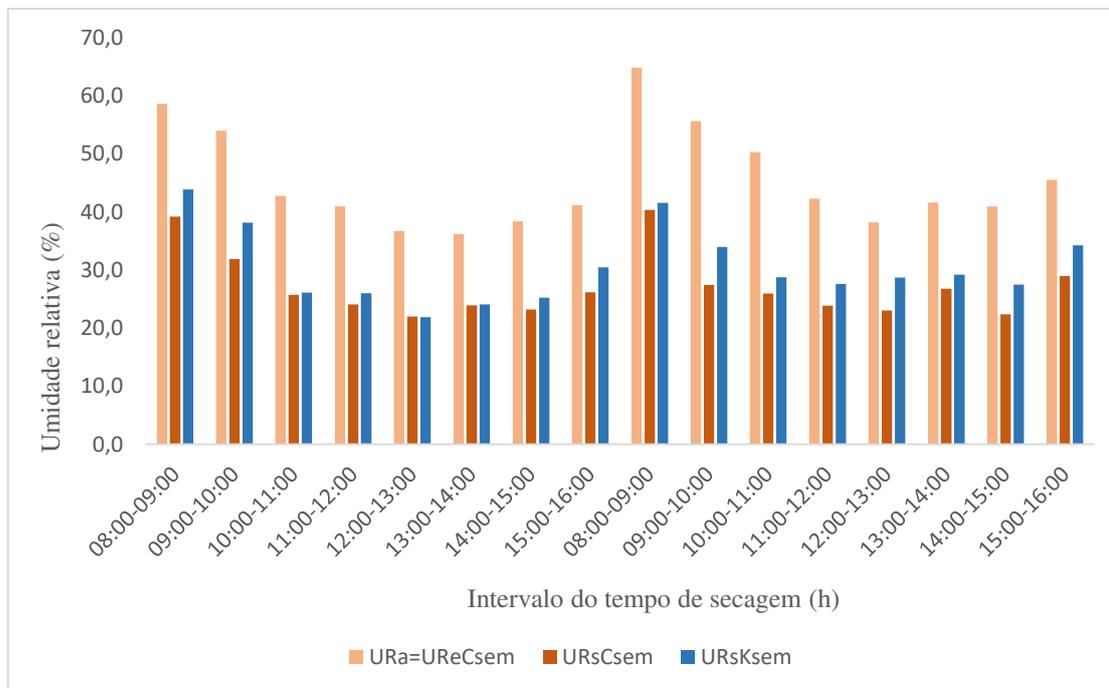
UR_{sUD} é a unidade relativa do ar na saída da unidade dessecante;

UR_{eCcom} é a unidade relativa do ar na entrada do coletor solar do sistema de secagem com unidade dessecante;

UR_{sCcom} é a unidade relativa do ar na saída do coletor solar do sistema de secagem com unidade dessecante;

URsKcom é a unidade relativa do ar na saída da câmara de secagem do sistema de secagem com unidade dessecante.

Figura 4.29 - Umidades relativas do ar no sistema de secagem no experimento ECG1sem.



Fonte: Própria autora.

onde:

URa é a unidade relativa do ar ambiente;

URcsem é a unidade relativa do ar na entrada do coletor solar do sistema de secagem sem unidade dessecante;

URsCsem é a unidade relativa do ar na saída do coletor solar do sistema de secagem sem unidade dessecante;

URsKsem é a unidade relativa do ar na saída da câmara de secagem do sistema de secagem sem unidade dessecante.

Nota-se que a umidade relativa do ar na entrada do coletor no sistema sem unidade dessecante é maior que a umidade relativa do ar de entrada do coletor solar no sistema com unidade dessecante. A diminuição da umidade relativa do ar, provocada pela adsorção de parte do vapor de água presente no ar ambiente pela sílica gel e pelo aumento de temperatura derivado do processo de adsorção, possibilitou uma temperatura do ar de saída média do coletor solar no

sistema com unidade dessecante de 58,9°C e no sistema sem unidade dessecante de 50,6°C, uma diferença de 8,3°C.

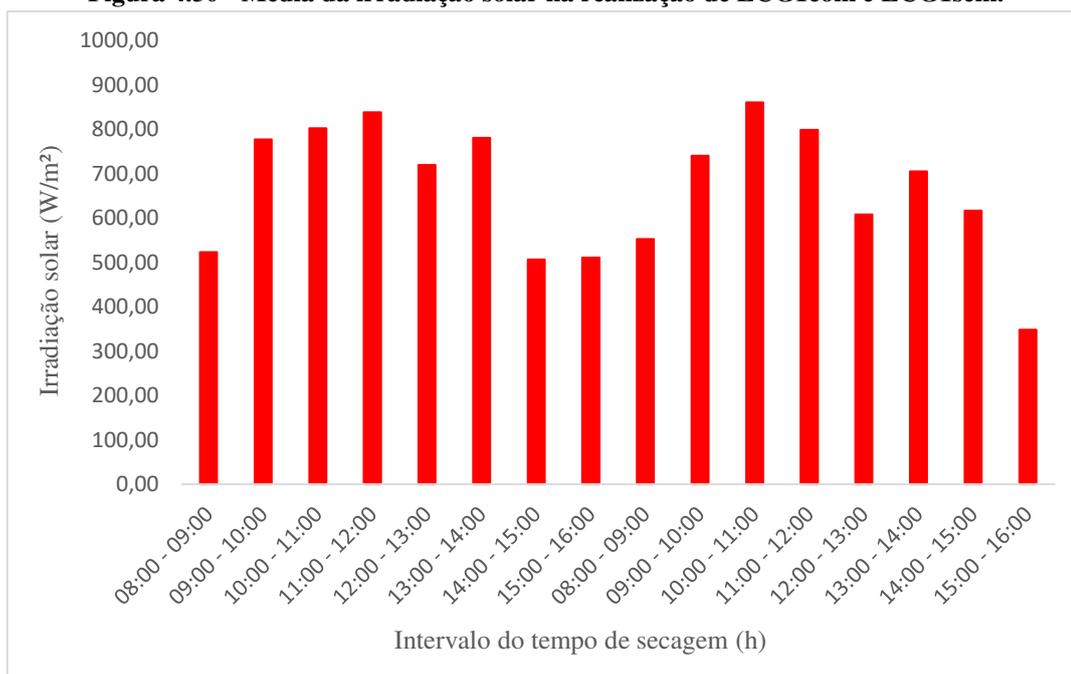
Estas diferenças de temperaturas (aumento de T) e umidades relativas (diminuição de UR) observadas são consequência da utilização de uma unidade dessecante no sistema de secagem e isto possibilitou uma diminuição de três horas (180 minutos) no tempo de secagem.

Os dados de temperatura e umidade relativa do ar dos experimentos ECG2com e ECG2sem encontram-se no Apêndice E.

As tabelas com os valores obtidos experimentalmente e que permitiram construir as Figuras 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29 estão disponíveis no Apêndice E.

Na Figura 4.30, são apresentados os dados médios horários da intensidade de radiação solar nos dias 18 e 19 de janeiro de 2021.

Figura 4.30 - Média da irradiação solar na realização de ECG1com e ECG1sem.



Fonte: Adaptado <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>.

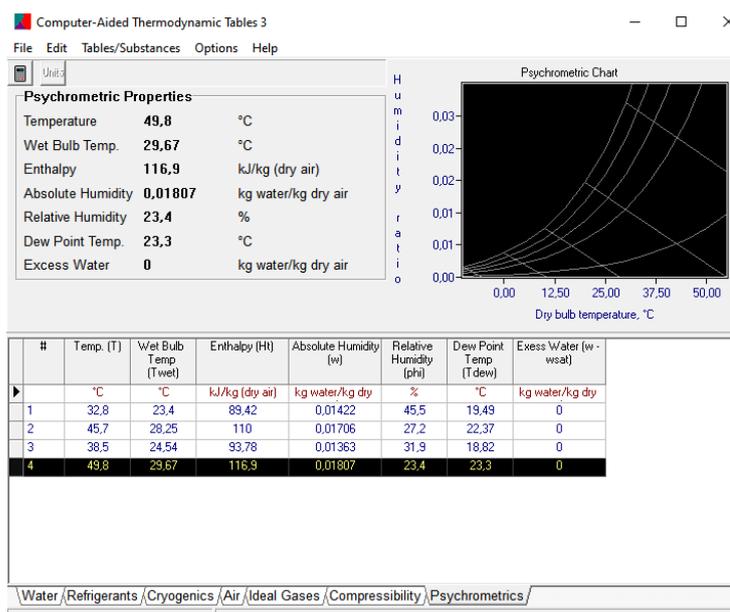
Observando a Figura 4.30, foi possível notar que a distribuição das irradiações solares são semelhantes nos dois dias de experimento, tendo atingido seu maior valor entre 11:00 h e 12:00 h no primeiro dia e entre 10:00 h e 11:00 h no segundo dia. O segundo dia deste experimento terminou parcialmente nublado com média de incidência menor que 350 W/m².

Rendimento térmico

Para calcular os rendimentos térmicos dos coletores solares dos experimentos ECG1_{com} e ECG1_{sem}, foi utilizado o método do balanço de energia. Para tanto, foram utilizados os dados de temperatura e umidade relativa do ar de secagem obtidos através do SMAD.

Primeiramente foram coletados os dados de entalpia específica, necessárias às equações termodinâmicas. Tais dados foram encontrados a partir das médias de temperatura e umidade relativa do ar de entrada e do ar de saída do coletor solar de ambos os sistemas de secagem nos experimentos ECG1_{com} e ECG1_{sem} e inseridas no *Computer-Aided Thermodynamic Tables 3* - CATT, como ilustrados na Figura 4.31.

Figura 4.31 - Dados termodinâmicos dos experimentos ECG1_{com} e ECG1_{sem} obtidos pelo CATT para os coletores solares.



Fonte: Própria autora.

Para o cálculo do rendimento termodinâmico do coletor solar foram utilizados os parâmetros da Tabela 4.18.

Tabela 4.18 - Propriedades do ar de secagem para o coletor solar.

Parâmetro	Valor/Unidade	Referência
Velocidade	2,000 m/s	Medido
Massa específica	1,2754 kg/m ³	Moran <i>et al.</i> (2018).
Área	0,00393 m ²	Medido
Vazão mássica	0,010017 kg/s	Calculado

Fonte: Própria autora.

Substituindo os valores obtidos para o sistema de secagem com unidade dessecante, tem-se:

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{solar}} = \frac{0,010017 \frac{kg}{s} \left(116,9 \frac{kJ}{kg} - 93,78 \frac{kJ}{kg} \right)}{1,00 m^2 \cdot 0,66812 \frac{kW}{m^2}} = 34,66\%$$

Substituindo os valores obtidos para o sistema de secagem sem unidade dessecante, tem-se:

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{solar}} = \frac{0,010017 \frac{kg}{s} \left(110 \frac{kJ}{kg} - 89,42 \frac{kJ}{kg} \right)}{1,00 m^2 \cdot 0,66812 \frac{kW}{m^2}} = 30,85\%$$

Observa-se que o valor do rendimento do coletor solar do sistema de secagem solar com unidade dessecante é superior ao do coletor do sistema sem unidade dessecante, sendo que o rendimento do coletor no sistema sem unidade dessecante representa 89,01% do rendimento térmico obtido no coletor solar do sistema com unidade dessecante.

Para calcular o rendimento térmico da câmara de secagem utilizou-se os parâmetros apresentados na Tabela 4.19.

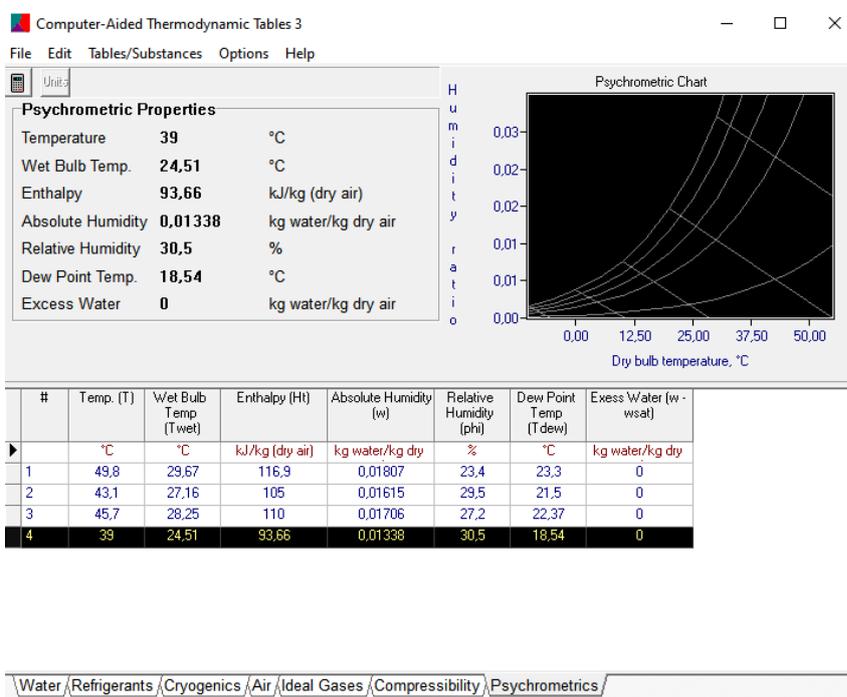
Tabela 4.19 - Propriedades do ar de secagem para a câmara de secagem.

Parâmetro	Valor/Unidade	Referência
Velocidade	1,500 m/s	Medido
Massa específica	1,2754 kg/m ³	Moran <i>et al.</i> (2018).
Área	0,0128 m ²	Medido
Vazão mássica	0,02448768 kg/s	Calculado

Fonte: Própria autora.

Foram coletados os dados de entalpia específica, necessárias às equações termodinâmicas. Tais dados foram encontrados a partir das médias de temperatura e umidade relativa do ar de entrada e do ar de saída da câmara de secagem de ambos os sistemas de secagem e inseridas no CATT, como ilustrados na Figura 4.32.

Figura 4.32 - Dados termodinâmicos dos experimentos ECG1com e ECG1sem obtidos pelo CATT para as câmaras de secagem.



Fonte: Própria autora.

Substituindo os valores obtidos para o sistema de secagem com unidade dessecante, tem-se:

$$\eta_K = \frac{\dot{m}_s h_s + \dot{E}_b}{\dot{m}_e h_e} = \frac{\left(0,02448768 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 105 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) + \left(0,00046607 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 163,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)}{0,02448768 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 116,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 92,76\%$$

Substituindo os valores obtidos para o sistema de secagem sem unidade dessecante, tem-se:

$$\eta_K = \frac{\dot{m}_s h_s + \dot{E}_b}{\dot{m}_e h_e} = \frac{\left(0,02448768 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 93,66 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) + \left(0,00040416 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 180,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)}{0,02448768 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 110 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 85,16\%$$

Observa-se que o valor do rendimento da câmara de secagem do sistema de secagem solar com unidade dessecante é superior ao rendimento da câmara de secagem do sistema sem unidade dessecante.

Como o rendimento do sistema de secagem é dado por:

$$\eta_{\text{sistema}} = \eta_C * \eta_K$$

Tem-se:

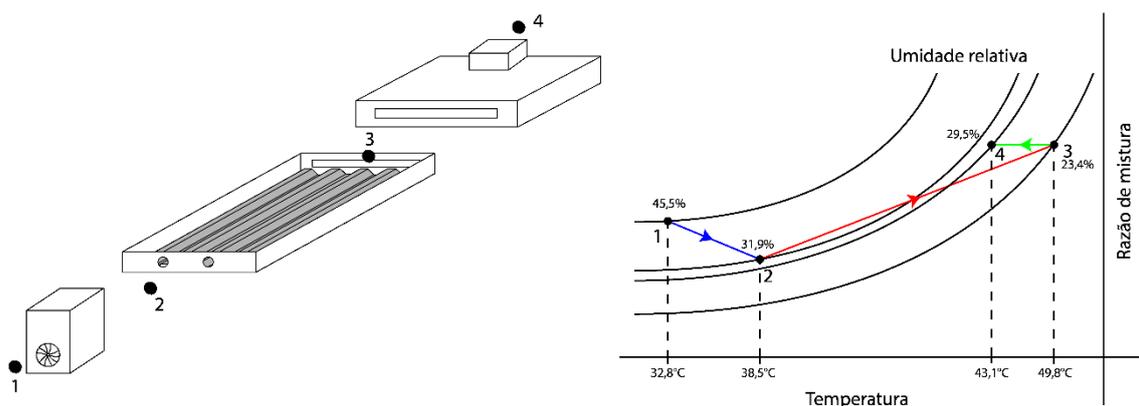
$$\eta_{\text{sistema com UD}} = 0,3466 * 0,9276 = 0,3215 = 31,15\%$$

E

$$\eta_{\text{sistema sem UD}} = 0,3085 * 0,8516 = 0,2627 = 26,27\%$$

Nas Figuras 4.33 e 4.34, são apresentadas desenhos esquemáticos dos processos de secagem solar, na carta Psicométrica, dos experimentos de secagem solar ECG1_{com} e ECG1_{sem}.

Figura 4.33 - Ilustração do processo de secagem na carta psicrométrica para o experimento ECG1com.



Fonte: Própria autora.

onde:

1 representa o estado termodinâmico 1, antes da unidade dessecante;

2 representa o estado termodinâmico 2, antes do coletor solar, que é o mesmo que na saída da unidade dessecante;

3 representa o estado termodinâmico 3, na saída do coletor solar, que é o mesmo que na entrada da câmara de secagem;

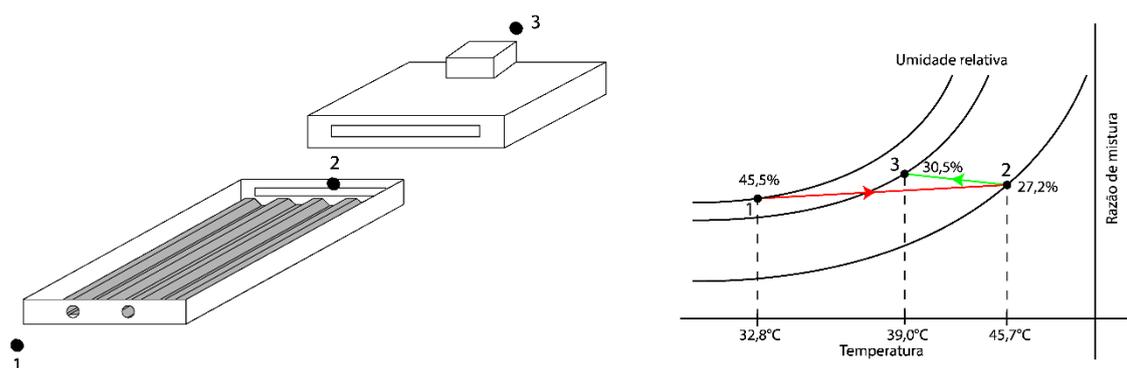
4 representa o estado termodinâmico 4, na saída da câmara de secagem.

1 → 2 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar passa do estado 1 para o estado 2. Neste processo ocorre redução da umidade relativa do ar (de 45,50% para 31,90%) e aumento da temperatura do ar (de 32,80°C para 38,50°C);

2 → 3 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar passa do estado 2 para o estado 3. Neste processo, ocorre, como consequência do aquecimento do ar no coletor solar, redução da umidade relativa do ar (de 31,90% para 23,40%) e aumento na temperatura do ar (de 38,50°C para 49,80°C);

3 → 4 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar passa do estado 3 para o estado 4. Neste processo, ocorrem, como consequência da transferência de massa de vapor d'água da banana para o fluido de trabalho, aumento da umidade relativa do ar (de 23,40% para 29,50%), e como consequência da transferência de calor do fluido de trabalho para a banana, diminuição na temperatura do ar (de 49,80°C para 43,10°C).

Figura 4.34 - Ilustração do processo de secagem na carta psicrométrica para o experimento ECG1sem.



Fonte: Própria autora.

1 representa o estado termodinâmico 1, que é o do ar ambiente;

2 representa o estado termodinâmico 2, na saída do coletor solar, que é o mesmo que na entrada da câmara de secagem;

3 representa o estado termodinâmico 3, na saída da câmara de secagem;

1 → 2 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar passa do estado 1 para o estado 2. Neste processo, ocorre, como consequência do aquecimento do ar no coletor solar, redução da umidade relativa do ar (de 45,50% para 27,20%) e aumento na temperatura do ar (de 32,80°C para 45,70°C);

2 → 3 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar passa do estado 2 para o estado 3. Neste processo, ocorrem, como consequência da transferência de massa de vapor d'água da banana para o fluido de trabalho, aumento da umidade relativa do ar (de 27,20% para 30,50%), e como consequência da transferência de calor do fluido de trabalho para a banana, diminuição na temperatura do ar (de 45,70°C para 39,00°C).

Ajuste dos modelos de Page e Midilli *et al* aos dados de cinética de secagem obtidos experimentalmente.

Os modelos matemáticos de cinética de secagem de Page e de Midilli *et al* foram ajustados aos dados de razão de umidade obtidos experimentalmente em os ambos os sistemas secagem solar.

Na Tabela 4.20, são apresentados os dados de coeficiente de correlação (R^2), desvio quadrático médio (DQM) e desvio padrão (σ) obtidos no *Statistic* versão 10.0 quando se ajustou os modelos de Page e de Midilli *et al* aos dados obtidos experimentalmente no período primavera/verão em Campina Grande.

Tabela 4.20 – Ajuste dos modelos de Page e Midilli *et al* aos dados dos Primavera/verão em Campina Grande, PB.

	Page			Midilli <i>et al</i>		
	R^2 (%)	DQM	σ	R^2 (%)	DQM	σ
ECG1com	99,77	0,01375	0,00743	99,67	0,01673	0,00968
ECG1sem	99,90	0,00844	0,0045	99,90	0,01056	0,00496
ECG2com	99,82	0,01241	0,00653	99,78	0,01366	0,00793
ECG2sem	99,84	0,01113	0,00609	99,80	0,01255	0,00667

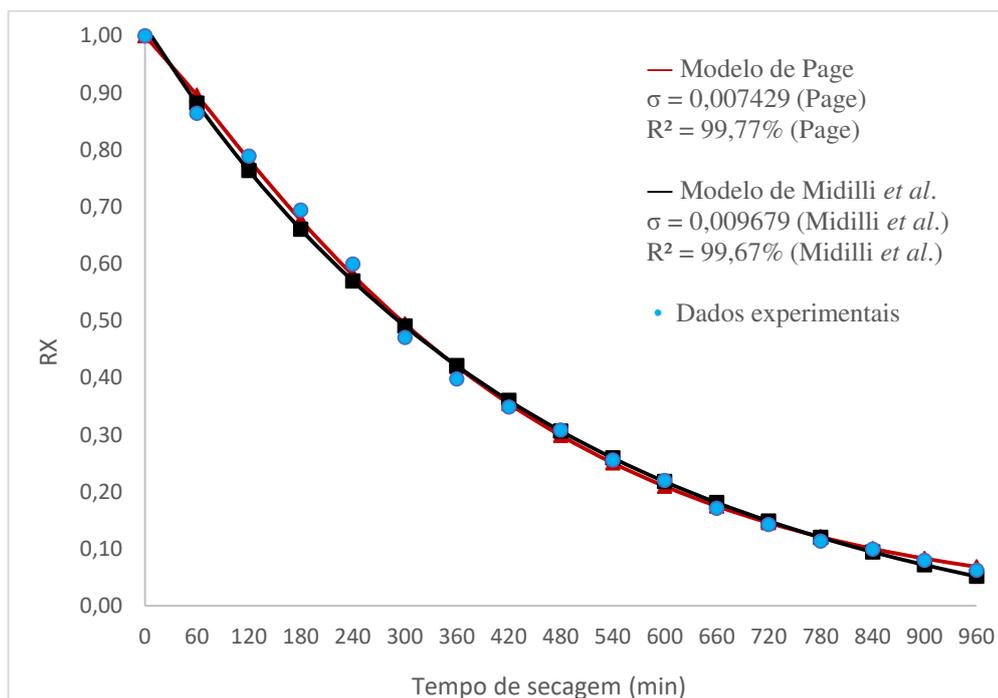
Fonte: Própria autora.

Foi possível observar, com base nos dados apresentados na Tabela 4.20, que os modelos matemáticos de Page e de Midilli *et al* se ajustaram satisfatoriamente aos dados experimentais de ambos os sistemas de secagem para os testes realizados no período correspondente às características climáticas e meteorológicas típicas do semestre primavera/verão da cidade de Campina Grande, PB.

Para o sistema com unidade dessecante, obteve-se, em média, R^2 de 99,79% e 99,72%, DQM de 0,01308 e 0,01519 e desvio padrão de 0,00698 e 0,00880, para os modelos de Page e de Midilli *et al*, respectivamente. Para o sistema sem unidade dessecante, obteve-se, em média, R^2 de 99,87% e 99,85%, DQM de 0,00979 e 0,01056 e desvio padrão de 0,00527 e 0,00581, para os modelos de Page e de Midilli *et al*, respectivamente.

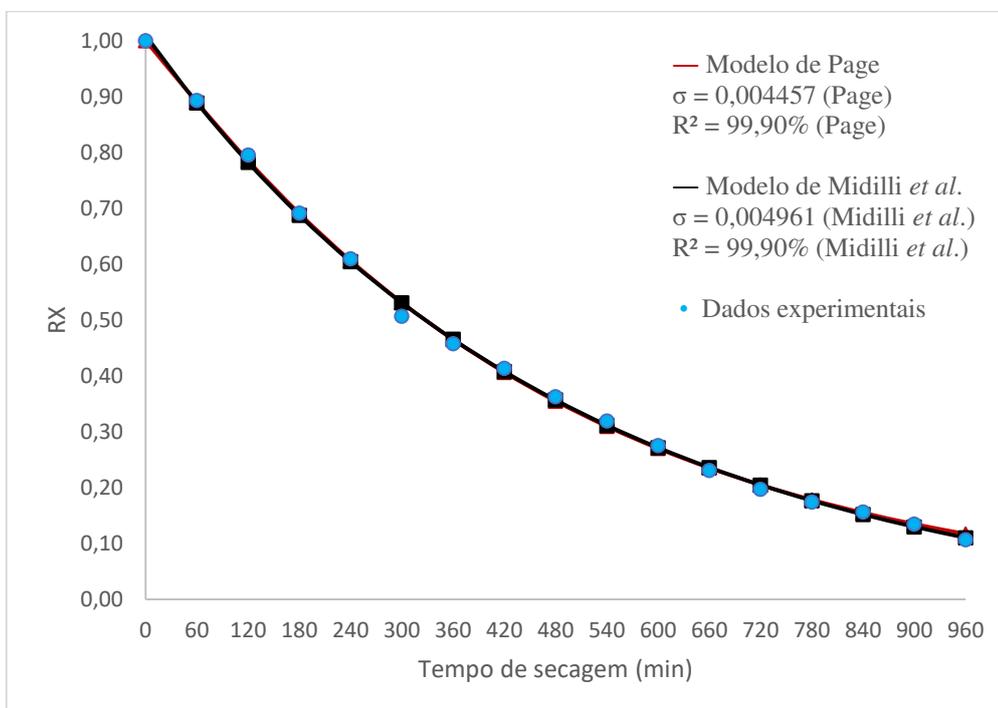
Nas Figuras 4.35 e 4.36, são apresentados os ajustes dos modelos de Page e Midilli *et al* aos dados experimentais dos ensaios ECG1com e ECG1sem.

Figura 4.35 – Ajuste dos modelos de Page e Midilli et al para ECG1com.



Fonte: Própria autora.

Figura 4.36 – Ajuste dos modelos de Page e Midilli et al para ECG1sem.



Fonte: Própria autora.

Na Tabela 4.21, é apresentado um resumo das principais informações relacionadas aos dados médios de temperatura do ar, umidade relativa do ar e rendimentos dos coletores solares,

das câmaras de secagem e dos sistemas de secagem nos experimentos realizados nas condições climáticas e meteorológicas típicas do período de primavera/verão em Campina Grande, PB.

Tabela 4.21 - Resumo dos dados dos experimentos ECG1com, ECG1sem, ECG2com e ECG2sem.

	ECG1com	ECG1sem	ECG2com	ECG2sem
tsec (min)	780	960	720	840
η_C (%)	34,66	30,85	36,59	32,15
η_K (%)	92,76	85,16	92,68	92,06
η_{sistema} (%)	31,15	26,27	33,91	29,60
Ta (°C)	32,8	32,8	31,9	31,9
URa (%)	45,5	45,5	49,4	49,4
TsUD (°C)	38,5	-	37,7	-
URsUD (%)	31,9	-	32,0	-
TsC (°C)	49,8	45,7	47,6	44,7
URsC (%)	23,4	27,2	26,7	29,8
TsK (°C)	43,1	39,0	40,7	39,2
URsK (%)	29,5	30,5	34,2	34,9

Fonte: Própria autora.

onde:

tsec é o tempo de secagem;

η_C é o rendimento térmico do coletor solar;

η_K é o rendimento térmico da câmara de secagem;

η_{sistema} é o rendimento térmico do sistema de secagem solar

Ta é a temperatura do ar ambiente;

TsUD é a temperatura do ar na saída da unidade dessecante;

TsC é a temperatura do ar na saída do coletor solar;

T_sK é a temperatura do ar na saída da câmara de secagem;

UR_a é a unidade relativa do ar ambiente;

UR_{sUD} é a unidade relativa do ar na saída da unidade dessecante;

UR_{sC} é a unidade relativa do ar na saída do coletor solar;

UR_{sK} é a unidade relativa do ar na saída da câmara de secagem;

4.3.1.2 Experimentos realizados em Pombal, PB

Em Pombal foram realizados quatro (04) testes de secagem entre os dias 24 e 28 de janeiro de 2021. A notação, a descrição e a data de cada experimento encontram-se na Tabela 3.1.

O primeiro experimento realizado em Pombal, no sistema com unidade dessecante (EPM1_{com}), e o primeiro experimento realizado em Pombal, no sistema sem unidade dessecante (EPM1_{sem}), foram realizados nos dias 24 e 25 de janeiro, entre 08:00 h e 16:00 h, a temperatura média ambiente foi de 38,5°C, a umidade relativa média ambiente foi de 30,8% e incidência de radiação solar média foi de 759,44 W/m².

O segundo experimento realizado em Pombal, no sistema com unidade dessecante (EPM2_{com}), e o segundo experimento realizado em Pombal, no sistema sem unidade dessecante (EPM2_{sem}), foram realizados nos dias 27 e 28 de janeiro, entre 08:00 h e 16:00 h, a temperatura média ambiente foi de 39,9°C, a umidade relativa média ambiente foi de 35,6 % e a radiação solar média de 703,13 W/m².

As bananas utilizadas nestes experimentos possuíam teor de água inicial de 70,72%, massa seca de 11,01 g e teor de água de equilíbrio de 5,72%.

Os dados de decaimento médio da massa da banana ao longo da realização dos experimentos estão registrados na Tabela 4.22, para os experimentos EPM1_{com} e EPM1_{sem} e no Apêndice E para os experimentos EPM2_{com} e EPM2_{sem}. A tabela completa com os dados de decaimento de massa nos experimentos EPM1_{com} e EPM1_{sem} encontra-se no Apêndice E.

Tabela 4.22 - Decaimento da massa da banana nos experimentos EPM1com e EPM1sem.

Data	24 e 25 /01/2021	EPM1com			EPM1sem		
Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)
0	08:00	37,60	26,59	70,72	37,60	26,59	70,72
60	09:00	32,45	21,44	66,07	32,69	21,68	66,32
...
540	09:00	15,57	4,56	29,29	16,68	5,67	33,98
600	10:00	14,61	3,60	24,66	15,49	4,48	28,91
660	11:00	13,99	2,98	21,28	14,61	3,60	24,64
720	12:00	13,46	2,45	18,20	13,97	2,96	21,17
...
960	16:00	12,18	1,17	9,58	12,78	1,77	13,83

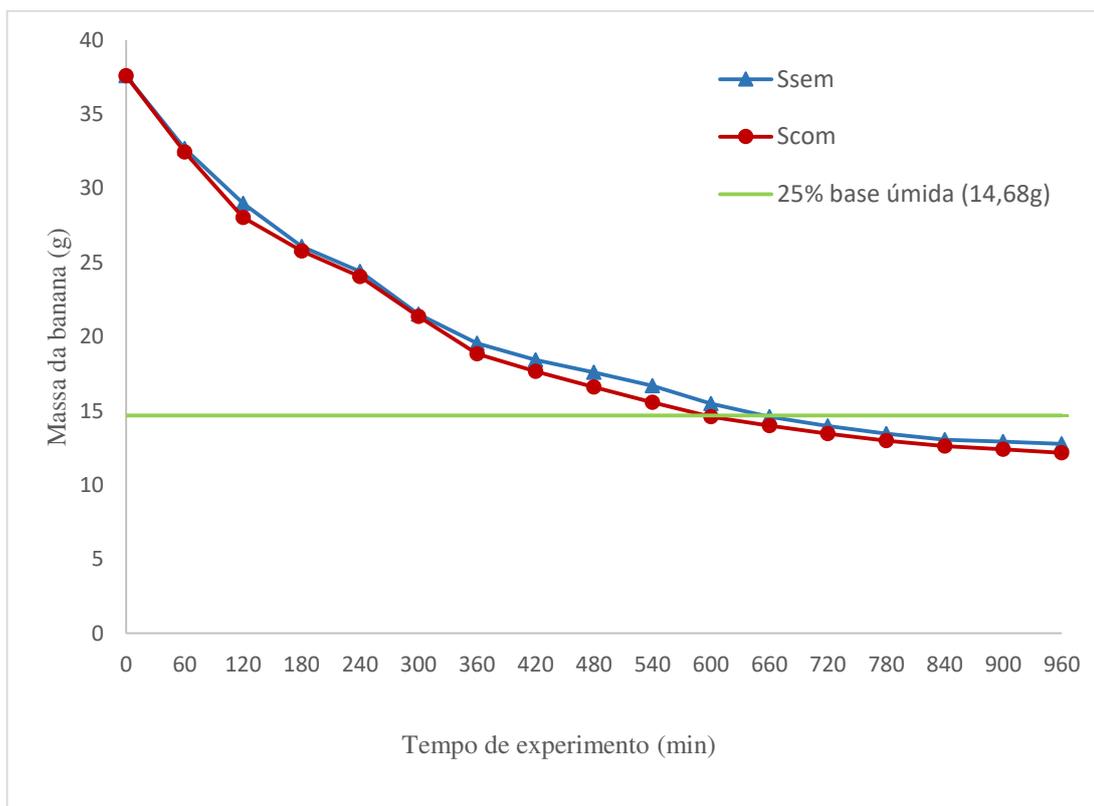
Fonte: Própria autora.

Na Tabela 4.22, pode-se observar que o teor de água máximo, em base úmida, de 25%, estabelecido pela ANVISA, para que a banana seja considerada banana passa, é obtido no S_{com} após 600 minutos de experimentos e no S_{sem} após 660 minutos de experimentos, obtendo-se então um ganho de uma hora de secagem ao se utilizar o dessecante sílica gel no processo.

Na Figura 2.37, pode-se observar o decaimento da massa da banana apresentado na Tabela 4.22.

Neste experimento a massa da banana correspondente ao teor de água de 25% em base úmida foi de 14,68 g. Após 600 minutos a massa média das bananas no sistema com dessecante foi de 14,61 g o que corresponde a um teor de água de 24,66% em base úmida. Após 660 minutos a massa média das amostras no sistema sem dessecante é também de 14,61 g.

A diferença entre os tempos de secagem nos dois sistemas foi de 60 minutos.

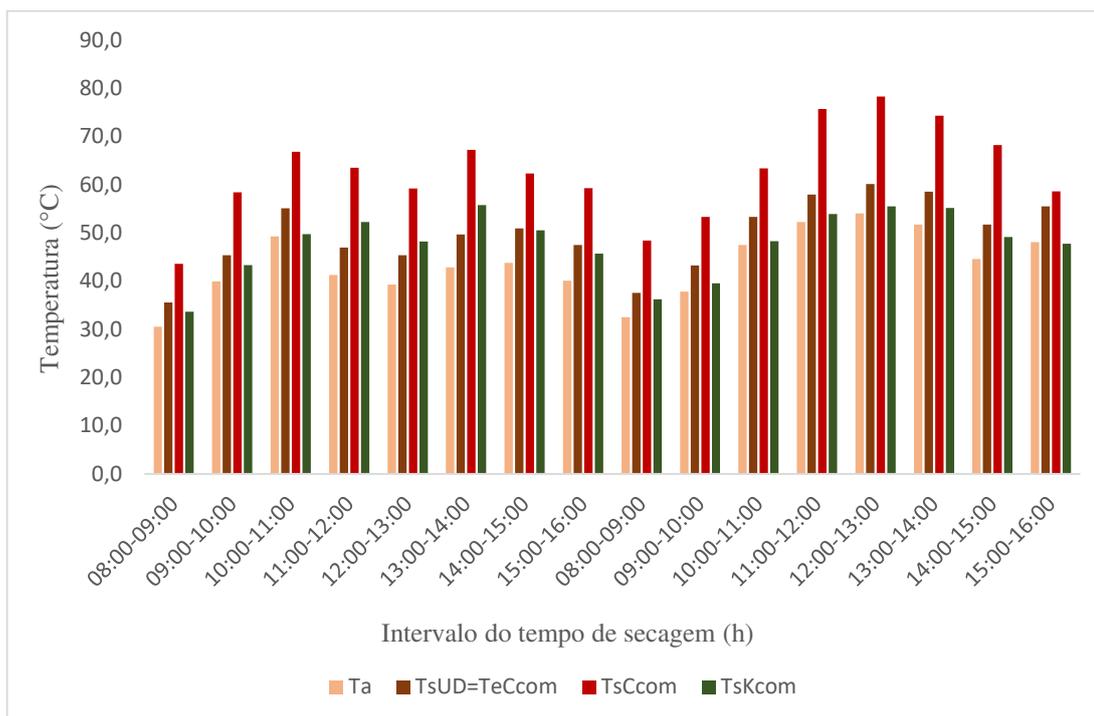
Figura 4.37 - Decaimento da massa da banana durante os experimentos EPM1com e EPM1sem.

Fonte: Própria autora.

Os dados de temperatura e umidade relativa do ar dos experimentos EPM1com e EPM1sem estão apresentados nas Figuras 4.38, 4.39, 4.40 e 4.41. Os dados de temperatura e umidade relativa do ar dos experimentos EPM2com e EPM2sem encontram-se no Apêndice E.

Devido ao grande número de dados os gráficos dos sistemas com e sem unidade dessecante foram plotados separadamente.

Figura 4.38 - Temperaturas do ar no sistema de secagem solar no experimento EPM1com.



Fonte: Própria autora.

onde:

Ta é a temperatura do ar ambiente;

TeUD é a temperatura do ar de entrada na unidade dessecante;

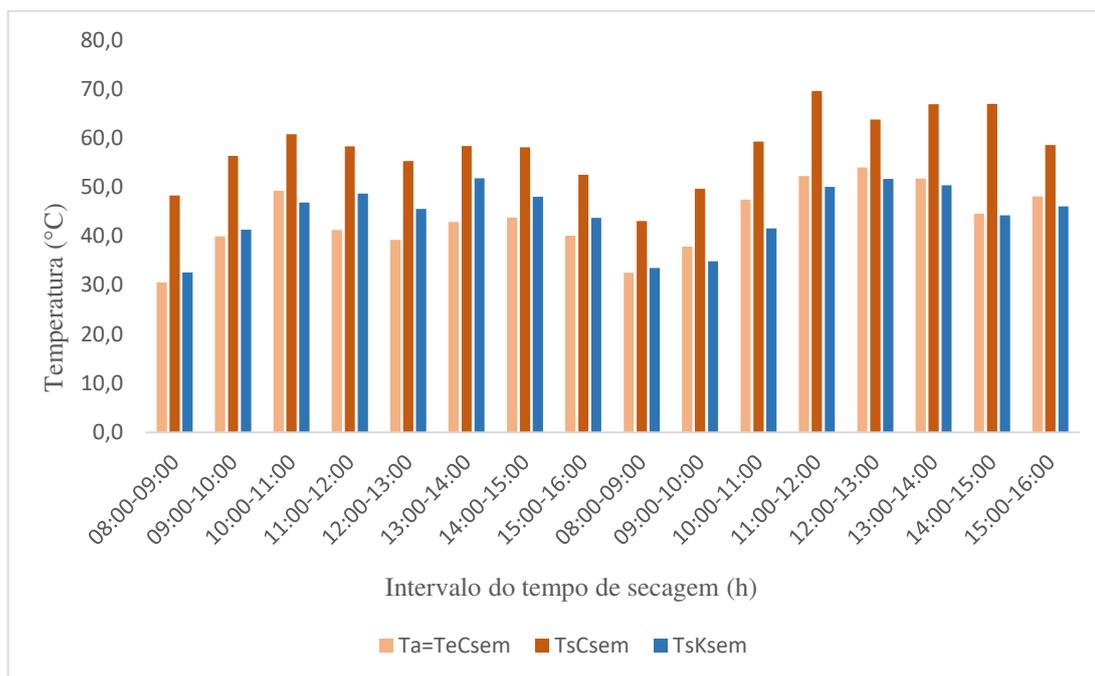
TsUD é a temperatura do ar na saída da unidade dessecante;

TeCcom é a temperatura do ar na entrada do coletor solar do sistema de secagem com unidade dessecante;

TsCcom é a temperatura do ar na saída do coletor solar do sistema de secagem com unidade dessecante;

TsKcom é a temperatura do ar na saída da câmara de secagem do sistema de secagem com unidade dessecante.

Figura 4.39 - Temperaturas do ar no sistema de secagem solar no experimento EPM1sem.



Fonte: Própria autora.

onde:

T_a é a temperatura do ar ambiente;

T_{eCsem} é a temperatura do ar na entrada do coletor solar do sistema de secagem sem unidade dessecante;

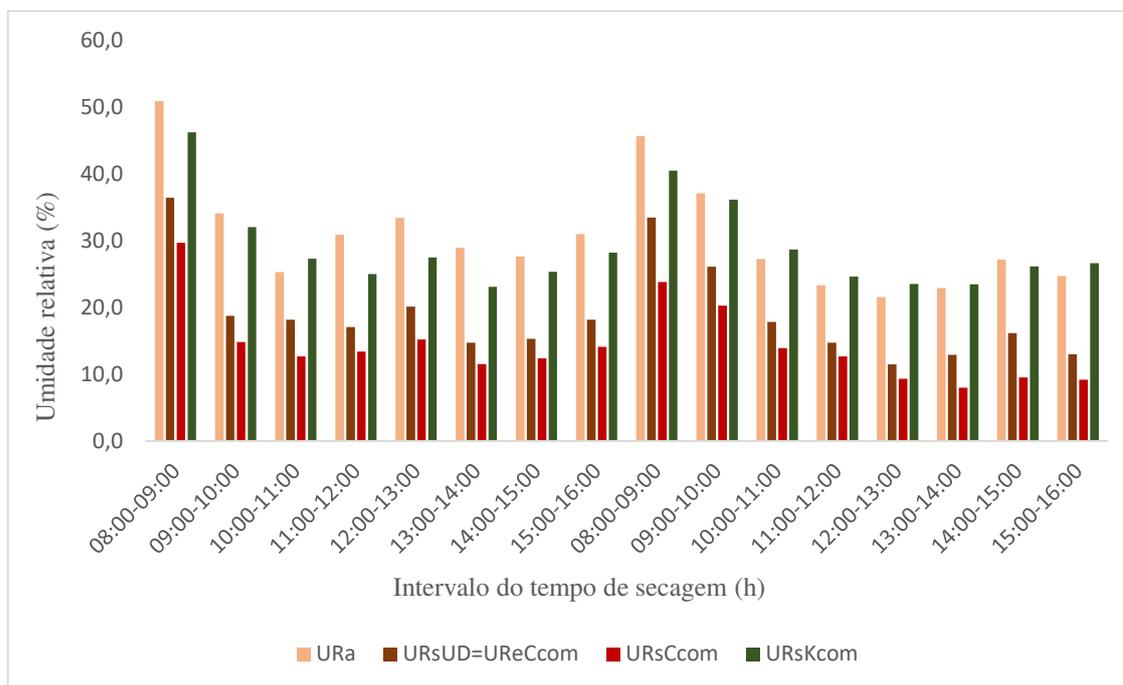
T_{sCsem} é a temperatura do ar na saída do coletor solar do sistema de secagem sem unidade dessecante;

T_{sKsem} é a temperatura do ar na saída da câmara de secagem do sistema de secagem sem unidade dessecante.

A partir dos dados de temperatura, obtidos experimentalmente e, apresentados nas Figuras 4.38 e 4.39, foi possível observar que ocorreu aumento de temperatura do ar ao passar pela unidade dessecante e, em consequência disto, o ar que entra no coletor solar no sistema com unidade dessecante possui temperatura mais elevada que o ar que entra no coletor solar no sistema sem unidade dessecante.

Além disso, o fato de o ar, no sistema com unidade dessecante, chegar ao coletor solar mais seco que no sistema sem unidade dessecante, facilitando o aumento de sua temperatura. Consequentemente, o ar que sai do coletor solar no sistema com unidade dessecante possui temperatura maior que o que sai do coletor solar no sistema sem unidade dessecante.

Figura 4.40 - Umidades relativas do ar no sistema de secagem no experimento EPM1com.



Fonte: Própria autora.

onde:

URa é a unidade relativa do ar ambiente;

URsUD é a unidade relativa do ar de saída da unidade dessecante;

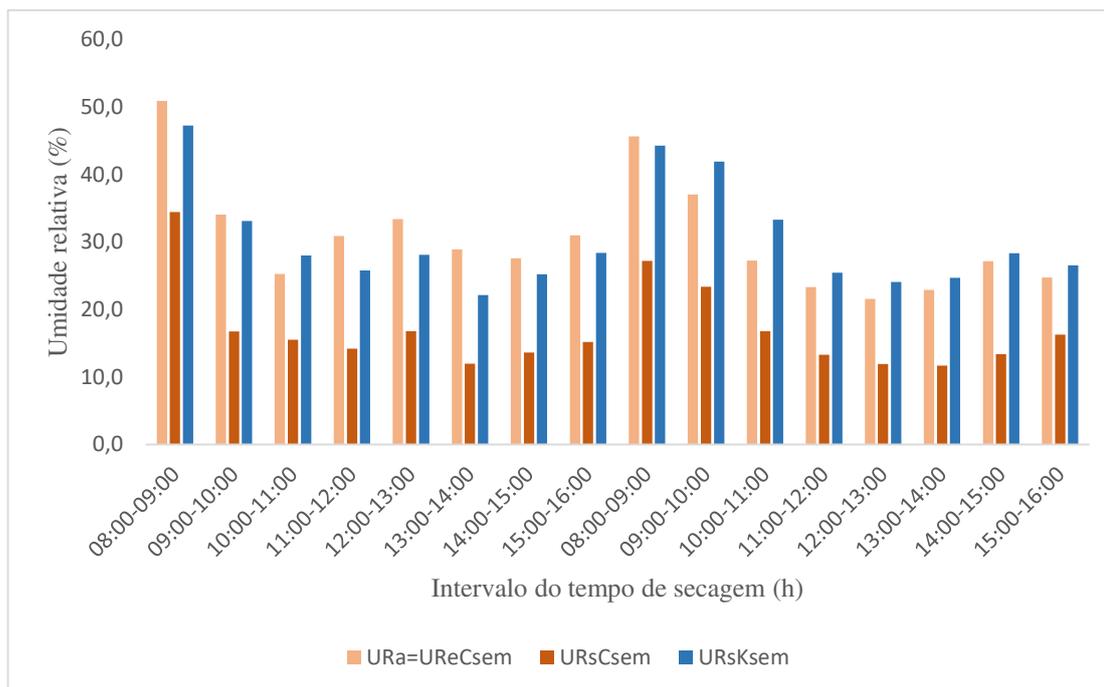
UReCcom é a unidade relativa do ar na entrada do coletor solar do sistema de secagem com unidade dessecante;

URsCcom é a unidade relativa do ar na saída do coletor solar do sistema de secagem com unidade dessecante;

URsKcom é a unidade relativa do ar na saída da câmara de secagem do sistema de secagem com unidade dessecante.

Na Figura 4.40, é possível observar diminuição da umidade relativa do ar ao passar pela unidade dessecante mostrando que mesmo em clima com umidade relativa do ar ambiente mais baixa o processo de adsorção ocorre.

Figura 4.41 - Umidades relativas do ar no sistema de secagem no experimento EPM1sem.



Fonte: Própria autora.

onde:

UR_a é a unidade relativa do ar ambiente;

UR_{eCsem} é a unidade relativa do ar de entrada do coletor solar do sistema de secagem sem unidade dessecante;

UR_{sCsem} é a unidade relativa do ar de saída do coletor solar do sistema de secagem sem unidade dessecante;

UR_{sKsem} é a unidade relativa do ar de saída da câmara de secagem do sistema de secagem sem unidade dessecante.

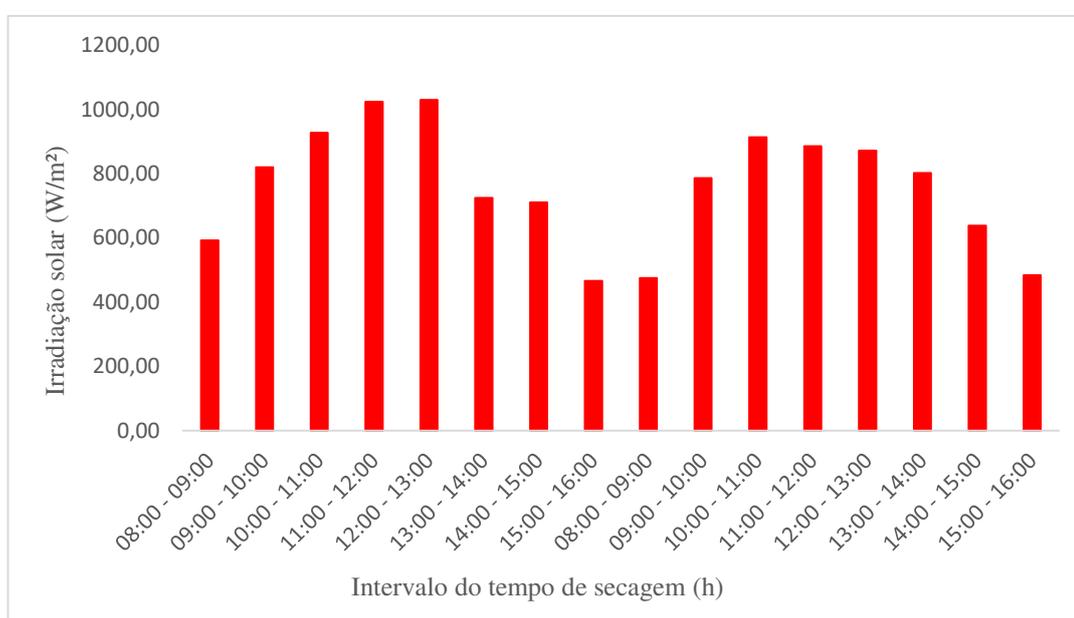
A partir das Figuras 4.40 e 4.41, é possível notar que a umidade relativa do ar na entrada do coletor no sistema sem unidade dessecante é maior que a umidade relativa do ar de entrada do coletor solar no sistema com unidade dessecante. A diminuição da umidade relativa do ar, provocada pela adsorção de parte do vapor de água presente no ar ambiente pela sílica gel e pelo aumento de temperatura, derivado do processo de adsorção, possibilitou uma temperatura do ar de saída média do coletor solar no sistema com unidade dessecante de $62,5^{\circ}\text{C}$ e no sistema sem unidade dessecante de $57,9^{\circ}\text{C}$, uma diferença de $4,6^{\circ}\text{C}$.

Estas diferenças de temperaturas (aumento de T) e umidades relativas (diminuição de UR) observadas são consequência da utilização de uma unidade dessecante no sistema de secagem e isto possibilitou uma diminuição de uma hora (60 minutos) no tempo de secagem.

As tabelas com os valores obtidos experimentalmente e que permitiram construir as Figuras 4.38, 4.39, 4.40 e 4.41 estão disponíveis no Apêndice E.

Na Figura 4.42, são apresentados os dados médios horários da intensidade de radiação solar nos dias 24 e 25 de janeiro de 2021.

Figura 4.42 - Média da irradiação solar na realização de EPM1com e EPM1sem.



Fonte: Adaptado <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>.

Observando a Figura 4.42, é possível notar que a distribuição das irradiações no primeiro dia dos experimentos é maior que no segundo dia, chegando a passar dos 1000 W/m² entre 11:00 e 13:00. Durante todo o experimento a menor incidência de radiação passou dos 400 W/m².

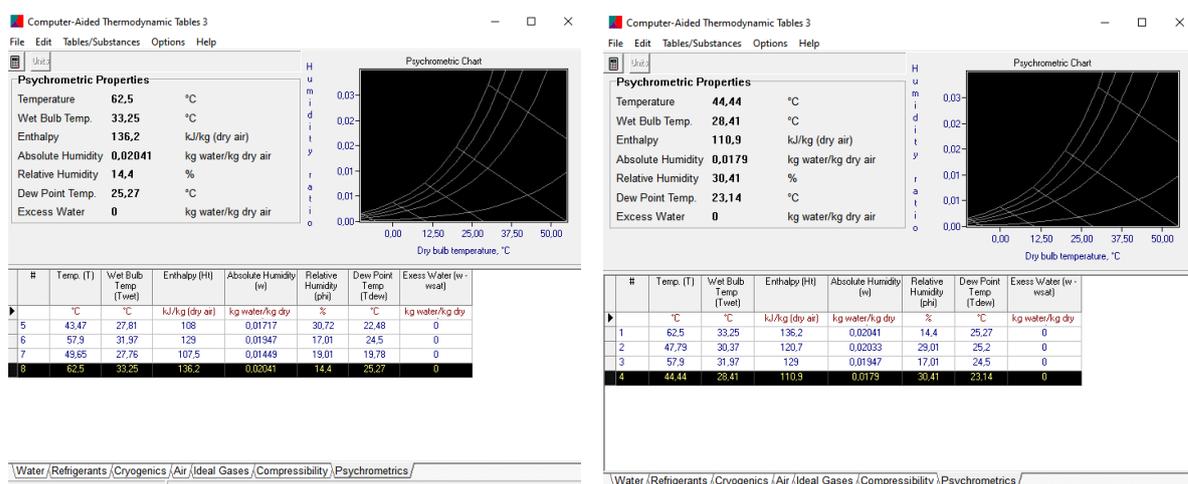
Rendimento térmico

Para calcular o rendimento térmico dos coletores solares dos experimentos EPM1com e EPM1sem, foi utilizado o método do balanço de energia. Para tanto, foram utilizados os dados de temperatura e umidade relativa do ar de secagem obtidos através do SMAD.

Para o cálculo do rendimento termodinâmico do coletor solar foram utilizados os parâmetros da Tabela 4.18. E para calcular o rendimento térmico da câmara de secagem utilizou-se os parâmetros apresentados na Tabela 4.19.

Na Figura 4.43, são apresentados os dados, obtidos pelo CATT, necessários aos cálculos dos rendimentos térmicos dos coletores solares e das câmaras de secagem nos experimentos EPM1com e EPM1sem.

Figura 4.43 - Dados termodinâmicos dos experimentos EPM1com e EPM1sem obtidos pelo CATT.



Fonte: Própria autora.

Coletor solar

Substituindo os valores obtidos para o sistema de secagem com unidade dessecante, tem-se:

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{solar}} = \frac{0,010017 \frac{kg}{s} \left(136,2 \frac{kJ}{kg} - 107,5 \frac{kJ}{kg} \right)}{1,00 m^2 \cdot 0,75996 \frac{kW}{m^2}} = 37,83\%$$

Substituindo os valores para o sistema de secagem sem unidade dessecante, tem-se:

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{solar}} = \frac{0,010017 \frac{kg}{s} \cdot (129 \frac{kJ}{kg} - 108 \frac{kJ}{kg})}{1,00 m^2 \cdot 0,75996 \frac{kW}{m^2}} = 27,68\%$$

Câmara de secagem

Substituindo os valores para o sistema de secagem com unidade dessecante, tem-se:

$$\eta_K = \frac{\dot{m}_s h_s + \dot{E}_b}{\dot{m}_e h_e} = \frac{(0,02448768 \frac{kg}{s} * 120,7 \frac{kJ}{kg}) + (0,0006386 \frac{kg}{s} * 200,1 \frac{kJ}{kg})}{0,02448768 \frac{kg}{s} * 136,2 \frac{kJ}{kg}} = 92,45\%$$

Substituindo os valores para o sistema de secagem sem unidade dessecante, tem-se:

$$\eta_K = \frac{\dot{m}_s h_s + \dot{E}_b}{\dot{m}_e h_e} = \frac{(0,02448768 \frac{kg}{s} * 110,9 \frac{kJ}{kg}) + (0,0005805 \frac{kg}{s} * 186,1 \frac{kJ}{kg})}{0,02448768 \frac{kg}{s} * 129 \frac{kJ}{kg}} = 89,39\%$$

Observa-se que o valor do rendimento do coletor solar do sistema de secagem com unidade dessecante é superior ao do coletor do sistema sem unidade dessecante, sendo que o rendimento do coletor no sistema sem representa 73,17% do rendimento térmico do coletor do sistema com unidade dessecante.

Observa-se, também, que o valor do rendimento da câmara de secagem do sistema de secagem solar com unidade dessecante é superior ao rendimento da câmara de secagem do sistema sem unidade dessecante.

Como o rendimento do sistema de secagem é dado por:

$$\eta_{sistema} = \eta_c * \eta_K$$

Tem-se:

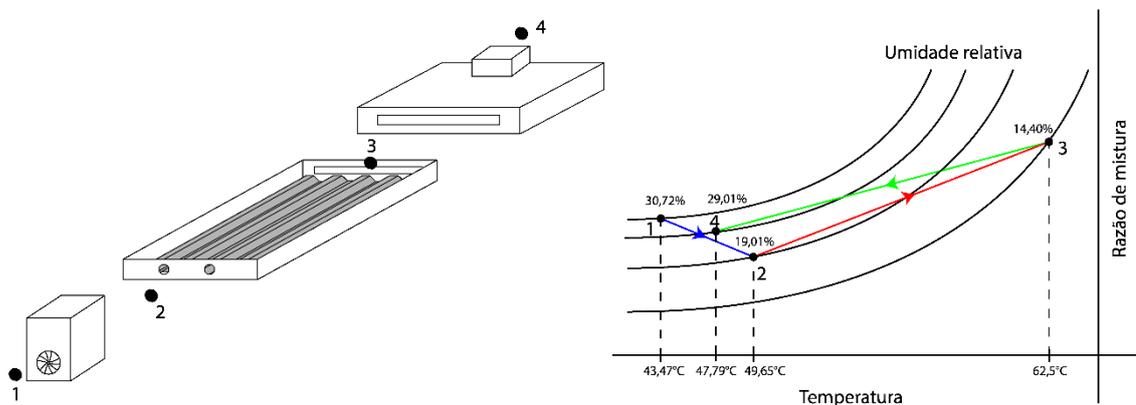
$$\eta_{sistema \text{ com UD}} = 0,3783 * 0,9245 = 0,3497 = 34,97\%$$

E

$$\eta_{\text{sistema sem UD}} = 0,2768 * 0,8939 = 0,2474 = 24,74\%$$

Nas Figuras 4.44 e 4.45, são apresentadas desenhos esquemáticos dos processos de secagem solar, na carta Psicrométrica, dos experimentos de secagem solar EPM1com e EPM1sem.

Figura 4.44 - Ilustração do processo de secagem na carta psicrométrica para o experimento EPM1com.



Fonte: Própria autora.

1 representa o estado termodinâmico 1, antes da unidade dessecante;

2 representa o estado termodinâmico 2, antes do coletor solar, que é o mesmo que na saída da unidade dessecante;

3 representa o estado termodinâmico 3, na saída do coletor solar, que é o mesmo que na entrada da câmara de secagem;

4 representado o estado termodinâmico 4, na saída da câmara de secagem.

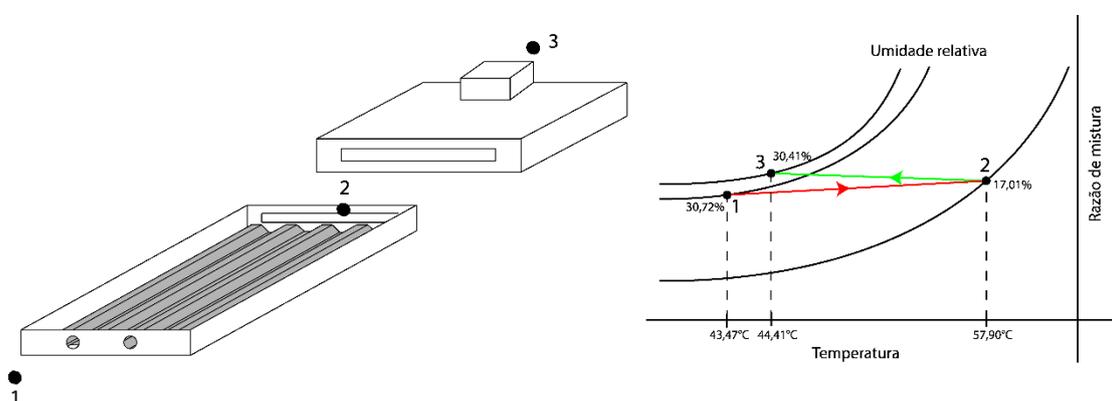
1 → 2 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar passa do estado 1 para o estado 2. Neste processo, ocorre, decorrente do processo de adsorção, redução da umidade relativa do ar (de 30,72% para 19,01%) e aumento da temperatura do ar (de 43,47°C para 49,65°C);

2 → 3 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar passa do estado 2 para o estado 3. Neste processo, ocorre, como consequência do aquecimento do ar no coletor

solar, redução da umidade relativa do ar (de 19,01% para 14,40%) e aumento na temperatura do ar (de 49,65°C para 62,50°C);

3 → 4 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar passa do estado 3 para o estado 4. Neste processo, ocorrem, como consequência da transferência de massa de vapor d'água da banana para o fluido de trabalho, aumento da umidade relativa do ar (de 14,40% para 29,01%), e como consequência da transferência de calor do fluido de trabalho para a banana, diminuição na temperatura do ar (de 62,50°C para 47,79°C).

Figura 4.45 - Ilustração do processo de secagem na carta psicrométrica para o experimento EPM1sem.



Fonte: Própria autora.

1 representa o estado termodinâmico 1, que é o do ar ambiente;

2 representa o estado termodinâmico 2, na saída do coletor solar, que é o mesmo que na entrada da câmara de secagem;

3 representa o estado termodinâmico 3, na saída da câmara de secagem;

1 → 2 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar passa do estado 1 para o estado 2. Neste processo, ocorre, como consequência do aquecimento do ar no coletor solar, redução da umidade relativa do ar (de 30,72% para 17,01%) e aumento na temperatura do ar (de 43,47°C para 57,90°C);

2 → 3 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar passa do estado 2 para o estado 3. Neste processo, ocorrem, como consequência da transferência de massa de vapor d'água da banana para o fluido de trabalho, aumento da umidade relativa do ar (de 17,01% para 30,41%), e como consequência da transferência de calor do fluido de trabalho para a banana, diminuição na temperatura do ar (de 57,90°C para 44,44°C).

Ajuste dos modelos de Page e Midilli *et al* aos dados de cinética de secagem obtidos experimentalmente.

Os modelos matemáticos de cinética de secagem de Page e de Midilli *et al.* foram ajustados aos dados de razão de umidade obtidos experimentalmente em os ambos os sistemas secagem solar.

Na Tabela 4.23, são apresentados os dados de coeficiente de correlação (R^2), desvio quadrático médio (DQM) e desvio padrão (σ) obtidos no *Statistic* versão 10.0 quando se ajustou os modelos de Page e de Midilli *et al.* aos dados obtidos experimentalmente no período primavera/verão em Pombal, PB.

Tabela 4.23 – Ajuste dos modelos de Page e Midilli *et al* aos dados dos Primavera/verão em Pombal, PB.

	Page			Midilli <i>et al.</i>		
	R^2 (%)	DQM	σ	R^2 (%)	DQM	σ
EPM1com	99,68	0,01634	0,00858	99,78	0,01337	0,00628
EPM1sem	99,82	0,01184	0,00669	99,86	0,01061	0,00625
EPM2com	99,81	0,01240	0,00653	99,84	0,01148	0,00618
EPM2sem	99,95	0,00615	0,00294	99,95	0,00621	0,00325

Fonte: Própria autora.

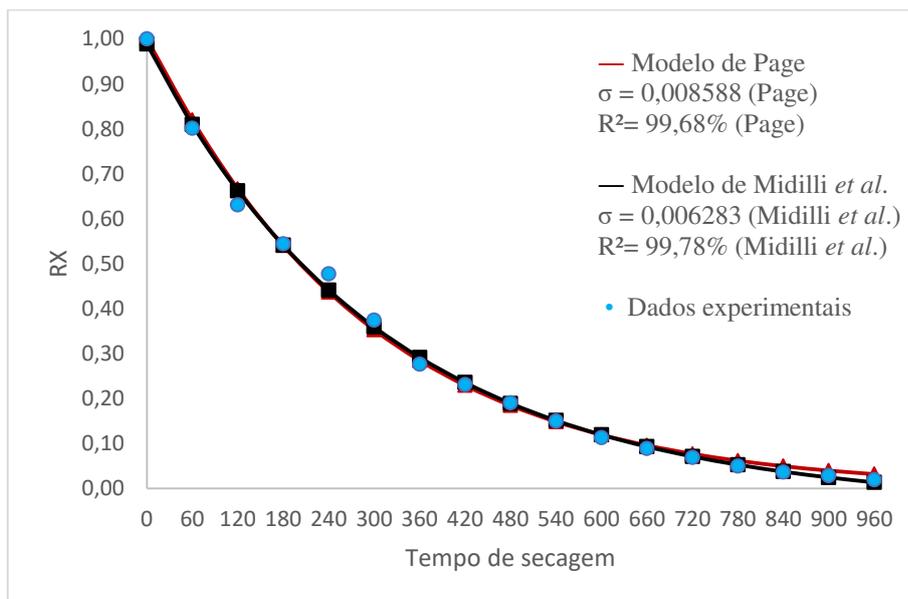
É possível observar, com base nos dados apresentados na Tabela 4.22, que os modelos matemáticos de Page e de Midilli *et al.* se ajustaram satisfatoriamente aos dados experimentais de ambos os sistemas de secagem para os testes realizados no período correspondente às características climáticas e meteorológicas típicas do semestre primavera/verão da cidade de Pombal, PB.

Para o sistema com unidade dessecante, obteve-se, em média, R^2 de 99,75% e 99,81%, DQM de 0,01437 e 0,01243 e desvio padrão de 0,00755 e 0,00623, para os modelos de Page e de Midilli *et al.*, respectivamente. Para o sistema sem unidade dessecante, obteve-se, em média,

R^2 de 99,89% e 99,91%, DQM de 0,00899 e 0,00841 e desvio padrão de 0,00475 e 0,00581, para os modelos de Page e de Midilli *et al.*, respectivamente.

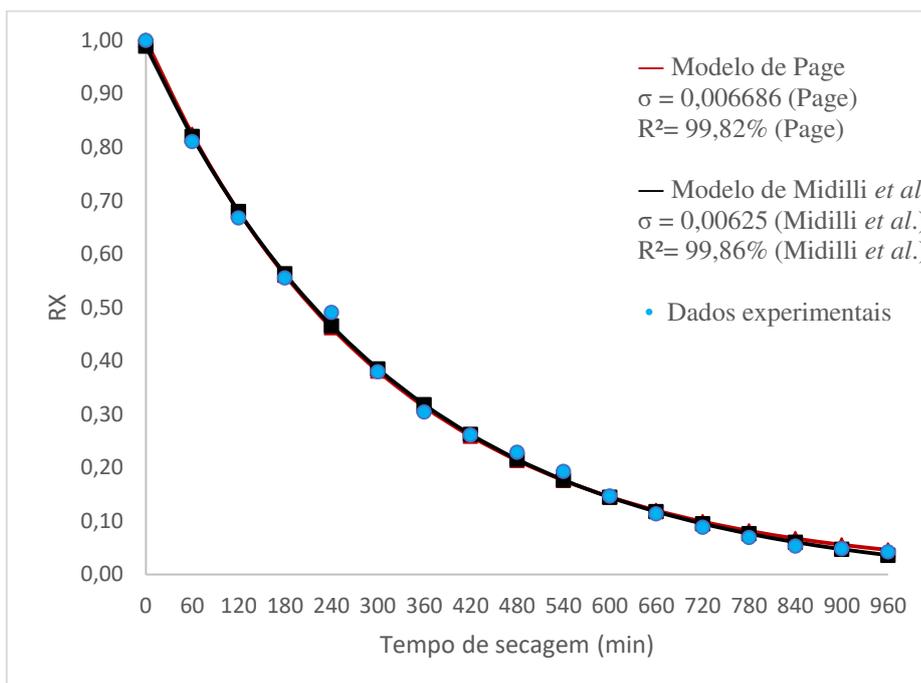
Nas Figuras 4.46 e 4.47, são apresentados os ajustes dos modelos de Page e Midilli *et al.* aos dados experimentais dos ensaios EPM1com e EPM1sem.

Figura 4.46 – Ajuste dos modelos de Page e Midilli *et al.* para EPM1com.



Fonte: Própria autora.

Figura 4.47 – Ajuste dos modelos de Page e Midilli *et al.* para EPM1sem.



Fonte: Própria autora.

Na Tabela 4.24, é apresentado um resumo das principais informações relacionadas aos dados médios de temperatura do ar, umidade relativa do ar e rendimentos dos coletores solares, das câmaras de secagem e dos sistemas de secagem nos experimentos realizados nas condições climáticas e meteorológicas típicas do período de primavera/verão em Pombal, PB.

Tabela 4.24 - Resumo dos dados dos experimentos EPM1com, EPM1sem, EPM2com e EPM2sem.

	EPM1com	EPM1sem	EPM2com	EPM2sem
tsec (min)	600	660	720	780
η_C (%)	37,83	27,68	36,06	31,86
η_K (%)	92,45	89,39	95,10	89,49
η_{sistema} (%)	34,97	24,74	34,29	28,51
Ta (°C)	43,47	43,47	39,83	39,83
URa (%)	30,72	30,72	35,58	35,58
TsUD (°C)	49,65	-	45,99	-
URsUD (%)	19,01	-	26,44	-
TsC (°C)	62,50	57,9	57,95	51,35
URsC (%)	14,40	17,01	18,78	24,26
TsK (°C)	47,79	44,44	48,19	43,79
URsK (%)	29,01	30,41	36,00	29,86

Fonte: Própria autora.

onde:

tsec é o tempo de secagem;

η_C é o rendimento térmico do coletor solar;

η_K é o rendimento térmico da câmara de secagem;

η_{sistema} é o rendimento térmico do sistema de secagem solar

Ta é a temperatura do ar ambiente;

TsUD é a temperatura do ar na saída da unidade dessecante;

T_{sC} é a temperatura do ar na saída do coletor solar;

T_{sK} é a temperatura do ar na saída da câmara de secagem;

UR_a é a unidade relativa do ar ambiente;

UR_{sUD} é a unidade relativa do ar na saída da unidade dessecante;

UR_{sC} é a unidade relativa do ar na saída do coletor solar;

UR_{sK} é a unidade relativa do ar na saída da câmara de secagem;

4.3.2 Testes experimentais realizados no período outono/inverno de 2021

Os testes experimentais realizados no período de outono/inverno (2021) foram realizados entre os dias 23 e 27 de março de 2021 em Pombal, PB e entre os dias 29 de abril e 09 de julho de 2021 em Campina Grande, PB.

4.3.2.1 Experimentos realizados em Pombal, PB

Em Pombal, foram realizados quatro (04) testes de secagem entre os dias 23 e 27 de março de 2021. Na Tabela 3.1 encontra-se a notação, a descrição e a data de cada experimento.

O terceiro experimento realizado em Pombal no sistema com unidade dessecante (EPM3_{com}) e o terceiro experimento realizado em Pombal no sistema sem unidade dessecante (EPM3_{sem}) foram realizados nos dias 23 e 25 de março de 2021, entre 08:00 h e 16:00 h, a temperatura do ar ambiente média foi de 35,1°C, a umidade relativa do ar ambiente média foi de 51,1% e incidência de radiação solar média de 671,63 W/m².

O quarto experimento realizado em Pombal no sistema com unidade dessecante (EPM4_{com}) e o quarto experimento realizado em Pombal no sistema sem unidade dessecante (EPM4_{sem}) foram realizados nos dias 26 e 27 de março de 2021, entre 08:00 h e 16:00 h, a temperatura do ar ambiente média foi de 34,1°C, a umidade relativa do ar ambiente média foi de 53,9 % e a irradiação solar média de 682,98 W/m².

É possível então observar que estas condições meteorológicas de secagem são mais parecidas com as condições das secagens realizadas em Campina Grande nos experimentos do

primavera/verão do que com as condições das secagens realizadas em Pombal no mesmo período. Isso ocorreu por ser uma semana onde ocorreram precipitação de chuva na cidade de Pombal.

As bananas utilizadas nestes experimentos possuíam teor de água inicial de 70,85%, massa seca de 10,96 g, e teor de água de equilíbrio de 4,91%.

Os dados de decaimento médio da massa da banana ao longo da realização dos experimentos estão registrados na Tabela 4.25, para os experimentos EPM3com e EPM3sem e no Apêndice F para os experimentos EPM4com e EPM4sem. A tabela completa com os dados de decaimento de massa nos experimentos EPM3com e EPM3sem encontra-se no Apêndice F.

Tabela 4.25 - Decaimento da massa da banana nos experimentos EPM3com e EPM3sem.

Data 23 e 25 /03/2021		EPM3com			EPM3sem		
Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)
0	08:00	37,60	26,64	70,85	37,60	26,64	70,85
60	09:00	32,88	21,92	66,66	33,09	22,12	66,87
...
540	09:00	15,34	4,38	28,53	16,25	5,29	32,55
600	10:00	14,45	3,49	24,13	15,50	4,54	29,27
660	11:00	13,99	3,03	21,67	14,65	3,68	25,16
720	12:00	13,63	2,67	19,58	14,17	3,21	22,64
...
960	16:00	12,70	1,74	13,69	13,13	2,17	16,54

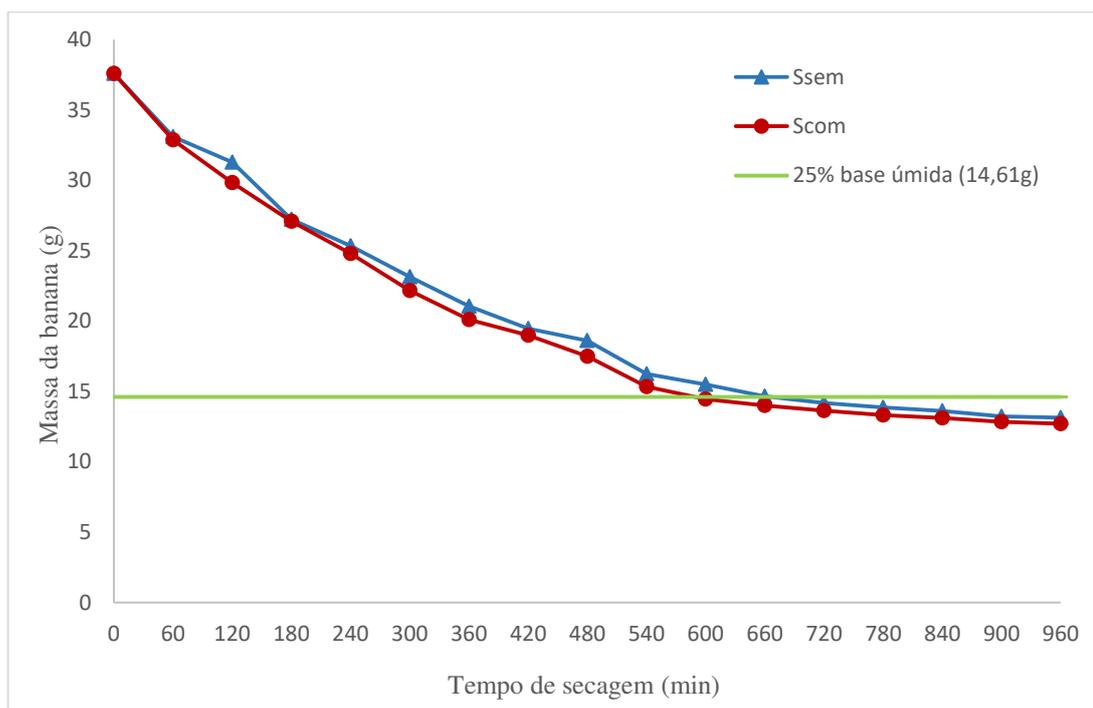
Fonte: Própria autora.

Na Tabela 4.25, pode-se observar que o teor de água máximo, em base úmida, de 25%, estabelecido pela ANVISA é obtido no Scom após 600 minutos (10 horas) de experimentos e no Ssem após 720 minutos (12 horas) de experimentos, obtendo-se então um ganho de duas

horas de secagem ao se utilizar o dessecante sílica gel na unidade dessecante no sistema de secagem solar desenvolvido.

Na Figura 4.48, pode-se observar o decaimento da massa da banana a partir dos dados da Tabela 4.22.

Figura 4.48 - Decaimento da massa da banana durante os experimentos EPM3com e EPM3sem.



Fonte: Própria autora.

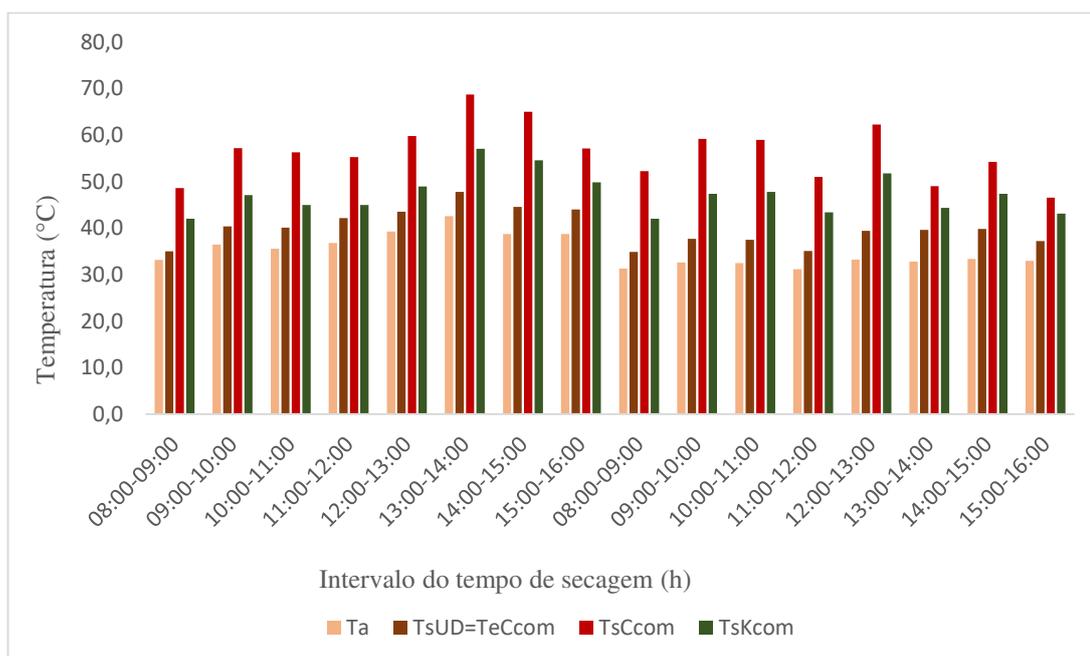
Neste experimento, a massa da banana correspondente ao teor de água de 25% em base úmida é de 14,61 g. Após 600 minutos a massa média das bananas no sistema com dessecante é de 14,45 g o que corresponde a um teor de água de 24,13% em base úmida. Após 660 minutos o teor de água, em base úmida, no sistema sem dessecante é de 25,16%, valor próximo ao máximo desejado, mas o produto ainda não pode ser considerado seco. Com 720 minutos de experimentos o teor de água é de 22,64% e o produto é então considerado seco.

A diferença entre os tempos de secagem dos dois sistemas é também de 120 minutos no segundo experimento do período outono/inverno. Onde pode-se inferir que temperaturas mais amenas e umidades relativas mais elevadas provocam maior diferença entre os tempos de secagem (Campina Grande no período primavera/verão e Pombal no período outono/inverno) indicando o protagonismo do uso da unidade dessecante no processo de secagem nestas condições meteorológicas.

Os dados de temperatura e umidade relativa do ar dos experimentos EPM3com e EPM3sem estão apresentados nas Figuras 4.49, 4.50, 4.51 e 4.52. Os dados de temperatura e umidade relativa dos experimentos EPM4com e EPM4sem encontram-se no Apêndice F.

Devido ao grande número de dados os gráficos dos sistemas com e sem unidade dessecante foram plotados separadamente.

Figura 4.49 - Temperaturas do ar no sistema de secagem solar no experimento EPM3com.



Fonte: Própria autora.

onde:

Ta é a temperatura do ar ambiente;

TeUD é a temperatura do ar na entrada na unidade dessecante;

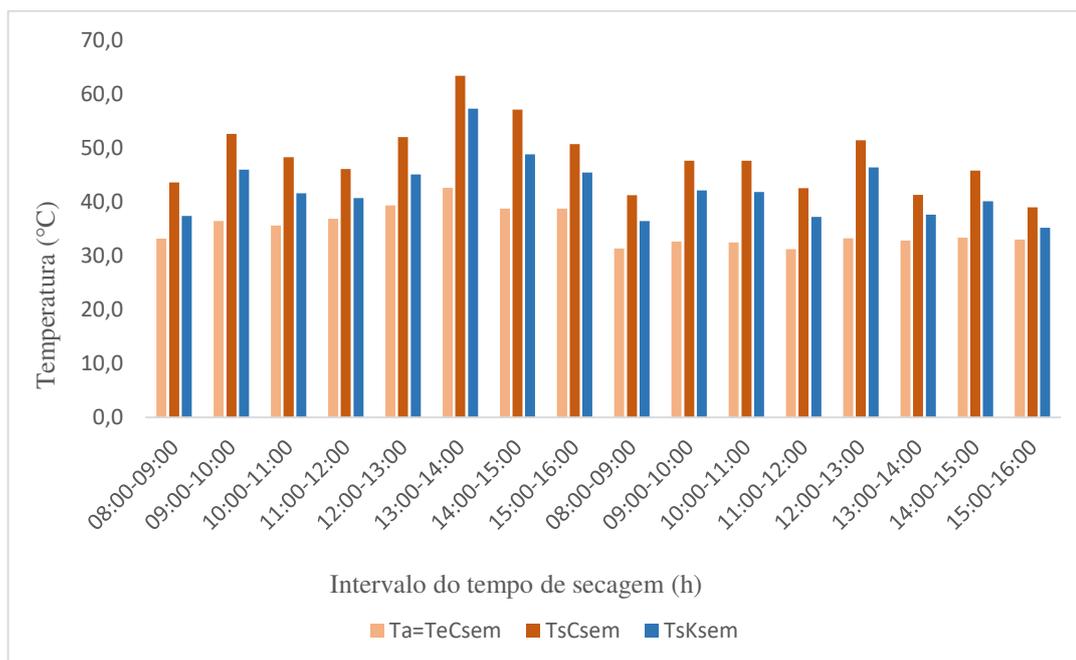
TsUD é a temperatura do ar na saída da unidade dessecante;

TeCcom é a temperatura do ar na entrada do coletor solar do sistema de secagem com unidade dessecante;

TsCcom é a temperatura do ar na saída do coletor solar do sistema de secagem com unidade dessecante;

TsKcom é a temperatura do ar na saída da câmara de secagem do sistema de secagem com unidade dessecante.

Figura 4.50 - Temperaturas do ar no sistema de secagem solar no experimento EPM3sem.



Fonte: Própria autora.

onde:

T_a é a temperatura do ar ambiente;

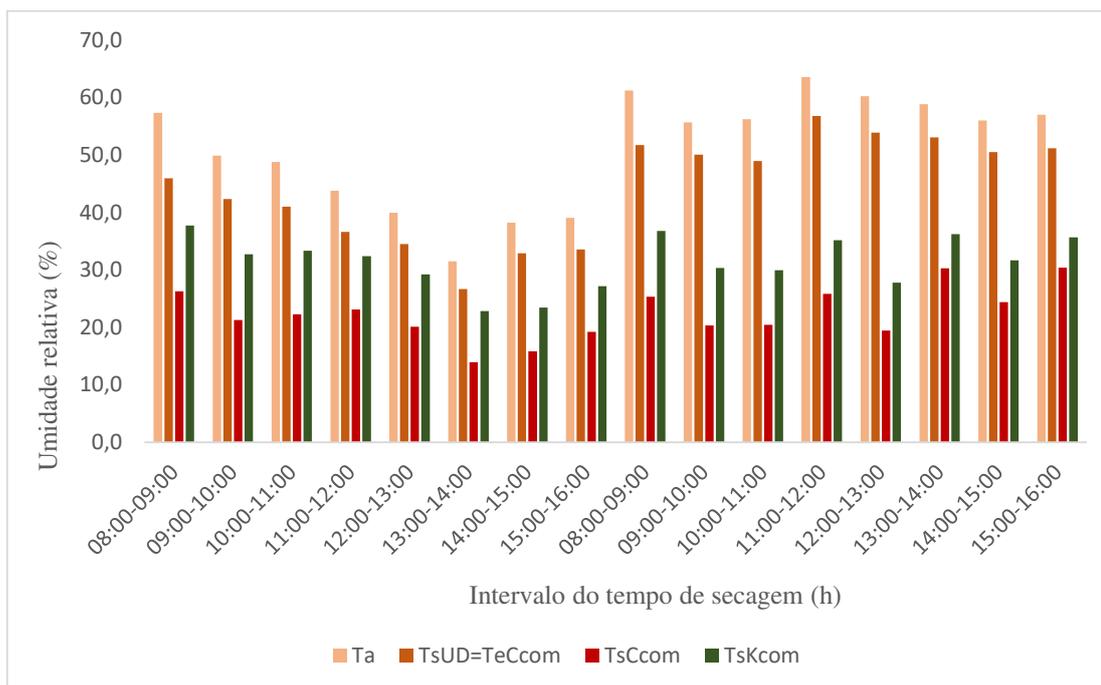
T_{eCsem} é a temperatura do ar na entrada do coletor solar do sistema de secagem sem unidade dessecante;

T_{sCsem} é a temperatura do ar na saída do coletor solar do sistema de secagem sem unidade dessecante;

T_{sKsem} é a temperatura do ar na saída da câmara de secagem do sistema de secagem sem unidade dessecante.

A partir dos gráficos de temperatura do ar obtidos nos experimentos EPM3com e EPM3sem foi possível inferir que para o sistema sem unidade dessecante a temperatura média passa dos 60°C apenas uma vez e isso acontece no dia 23 entre 13:00 h e 14:00 h. Já para o sistema com unidade dessecante a temperatura média ultrapassa os 60°C duas vezes no primeiro dia de experimentos e uma vez no segundo dia. Durante toda a realização dos experimentos, a temperatura de saída do coletor solar é maior no sistema de secagem com unidade dessecante.

Figura 4.51 - Umidades relativas do ar no sistema de secagem solar no experimento EPM3com.



Fonte: Própria autora.

onde:

UR_a é a unidade relativa do ar ambiente;

UR_{sUD} é a unidade relativa do ar na saída da unidade dessecante;

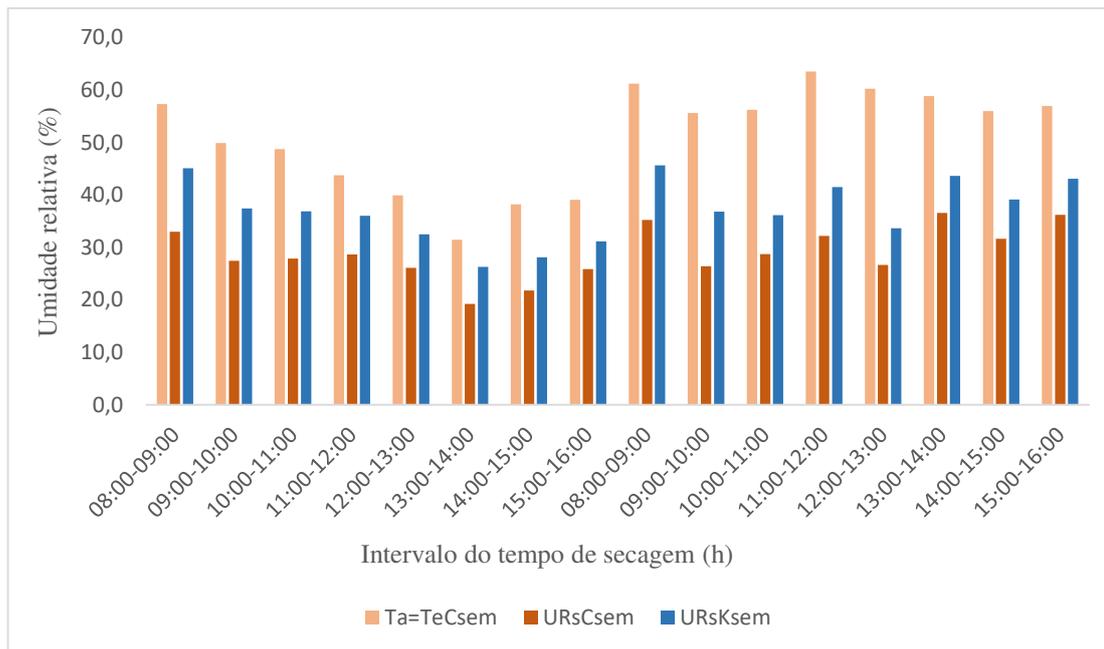
UR_{eCcom} é a unidade relativa do ar na entrada do coletor solar do sistema de secagem com unidade dessecante;

UR_{eCcom} é a unidade relativa do ar na saída do coletor solar do sistema de secagem com unidade dessecante;

UR_{sKcom} é a unidade relativa do ar na saída da câmara de secagem do sistema de secagem com unidade dessecante.

UR_{sKcom} é a unidade relativa do ar na saída da câmara de secagem do sistema de secagem com unidade dessecante.

Figura 4.52 - Umidades relativas do ar no sistema de secagem solar no experimento EPM3sem.



Fonte: Própria autora.

onde:

UR_a é a unidade relativa do ar ambiente;

UR_{eCsem} é a unidade relativa do ar na entrada do coletor solar do sistema de secagem sem unidade dessecante;

UR_{sCsem} é a unidade relativa do ar na saída do coletor solar do sistema de secagem sem unidade dessecante;

UR_{sKsem} é a unidade relativa do ar na saída da câmara de secagem do sistema de secagem sem unidade dessecante.

Observando as figuras de umidade relativa pode-se observar que a umidade relativa do ar ambiente foi maior (sempre acima dos 50%) e mais uniforme no segundo dia do experimento.

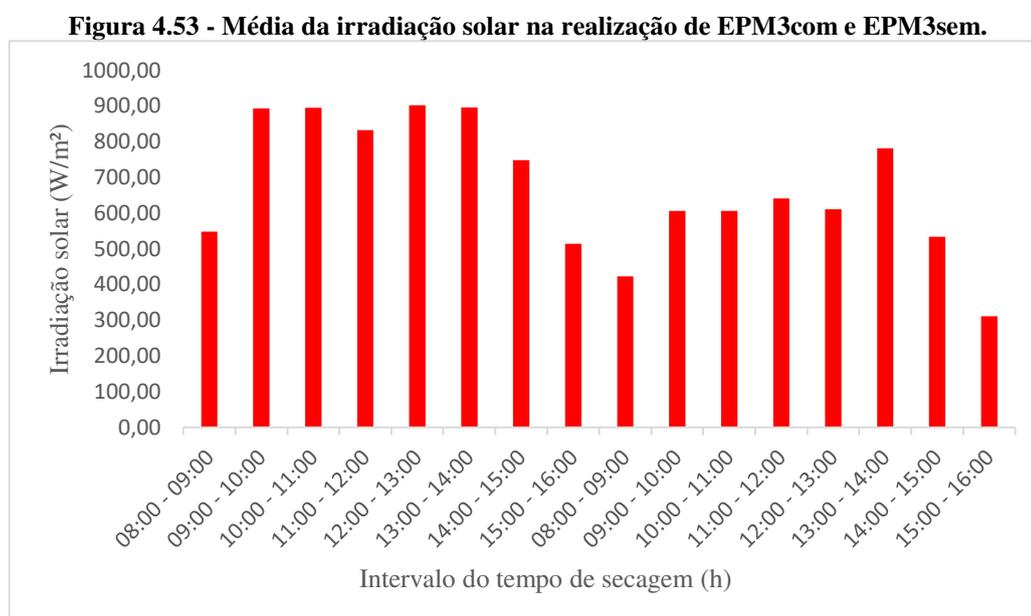
Nota-se que a umidade relativa do ar na entrada do coletor no sistema sem unidade dessecante foi maior que a umidade relativa do ar na entrada do coletor solar no sistema com unidade dessecante. A diminuição da umidade relativa do ar, provocada pela adsorção de parte do vapor de água presente no ar ambiente pela sílica gel e pelo aumento de temperatura derivado do processo de adsorção, possibilitou uma temperatura do ar de saída média do coletor solar no

sistema com unidade dessecante de $55,51^{\circ}\text{C}$ e no sistema sem unidade dessecante de $48,20^{\circ}\text{C}$, uma diferença de $7,31^{\circ}\text{C}$.

Estas diferenças de temperaturas (aumento de T) e umidades relativas (diminuição de UR) observadas são consequência da utilização de uma unidade dessecante no sistema de secagem e isto possibilitou uma diminuição de duas horas (120 minutos) no tempo de secagem.

As tabelas com os valores obtidos experimentalmente e que permitiram construir as figuras de 4.49 a 4.52, estão disponíveis no apêndice F.

Na Figura 4.53, são apresentados os dados médios horários da intensidade de radiação solar nos dias 23 e 25 de março de 2021.



Fonte: Adaptado <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>.

Observando a Figura 4.53, foi possível notar que a distribuição das irradiações no primeiro dia de experimentos foi maior que no segundo dia estando acima de 800 W/m^2 entre 09:00 h e 14:00 h.

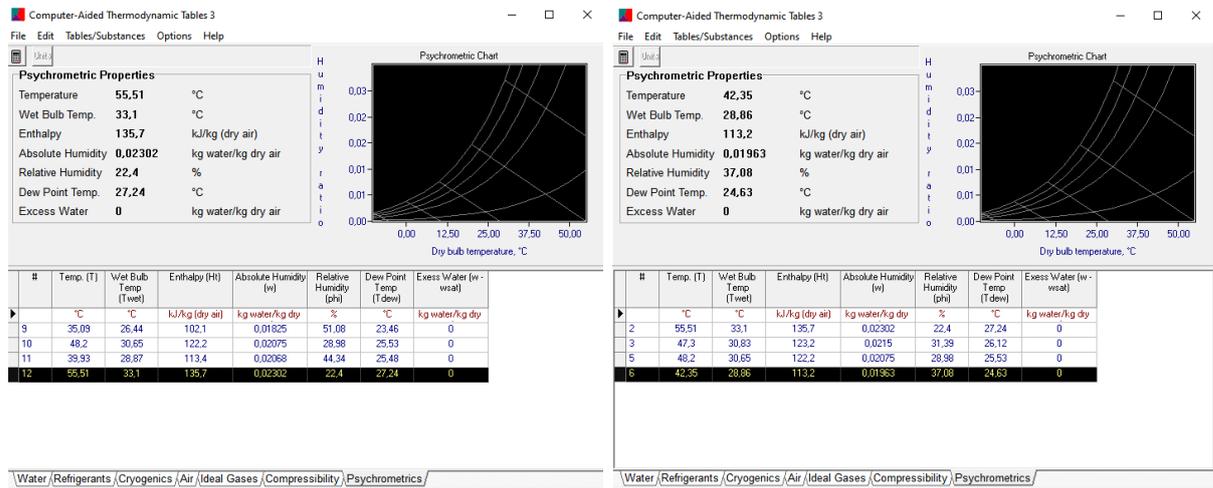
Rendimento térmico

Para calcular o rendimento térmico dos coletores solares dos experimentos EPM3com e EPM3sem, foi utilizado o método do balanço de energia. Para tanto, foram utilizados os dados de temperatura e umidade relativa do ar de secagem obtidos através do SMAD.

Para o cálculo do rendimento termodinâmico do coletor solar foram utilizados os parâmetros da Tabela 4.18. E para calcular o rendimento térmico da câmara de secagem utilizou-se os parâmetros apresentados na Tabela 4.19.

Na Figura 4.54, são apresentados os dados, obtidos pelo CATT, necessários aos cálculos dos rendimentos térmicos dos coletores solares e das câmaras de secagem nos experimentos EPM3com e EPM3sem.

Figura 4.54 - Dados termodinâmicos dos experimentos EPM3com e EPM3sem obtidos pelo CATT.



Fonte: Própria autora.

Coletor solar

Substituindo os valores obtidos para o sistema de secagem com unidade dessecante, tem-se:

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{\dot{Q}_{\text{solar}}} = \frac{0,010017 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left(135,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 113,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)}{1,00 \text{ m}^2 \cdot 0,65602 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} = 34,05\%$$

Substituindo os valores para o sistema de secagem sem unidade dessecante, tem-se:

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{\dot{Q}_{\text{solar}}} = \frac{0,010017 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (122,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 101,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})}{1,00 \text{ m}^2 \cdot 0,65602 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} = 30,69\%$$

Câmara de secagem

Substituindo os valores para o sistema de secagem com unidade dessecante, tem-se:

$$\eta_K = \frac{\dot{m}_s h_s + \dot{E}_b}{\dot{m}_e h_e} = \frac{(0,02448768 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 123,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) + (0,00064305 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 198 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})}{0,02448768 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 135,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 94,62\%$$

Substituindo os valores para o sistema de secagem sem unidade dessecante, tem-se:

$$\eta_K = \frac{\dot{m}_s h_s + \dot{E}_b}{\dot{m}_e h_e} = \frac{(0,02448768 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 113,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) + (0,00054236 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 177,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})}{0,02448768 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 122,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 95,85\%$$

Observa-se que o valor do rendimento do coletor solar do sistema de secagem com unidade dessecante é superior ao do coletor do sistema sem unidade dessecante, sendo que o rendimento do coletor no sistema sem unidade dessecante representa 90,13% do rendimento do coletor do sistema com unidade dessecante.

Observa-se ainda, que o valor do rendimento da câmara de secagem do sistema de secagem solar com unidade dessecante é levemente inferior ao rendimento da câmara de secagem do sistema sem unidade dessecante.

Como o rendimento do sistema de secagem é dado por:

$$\eta_{\text{sistema}} = \eta_c * \eta_K$$

Tem-se:

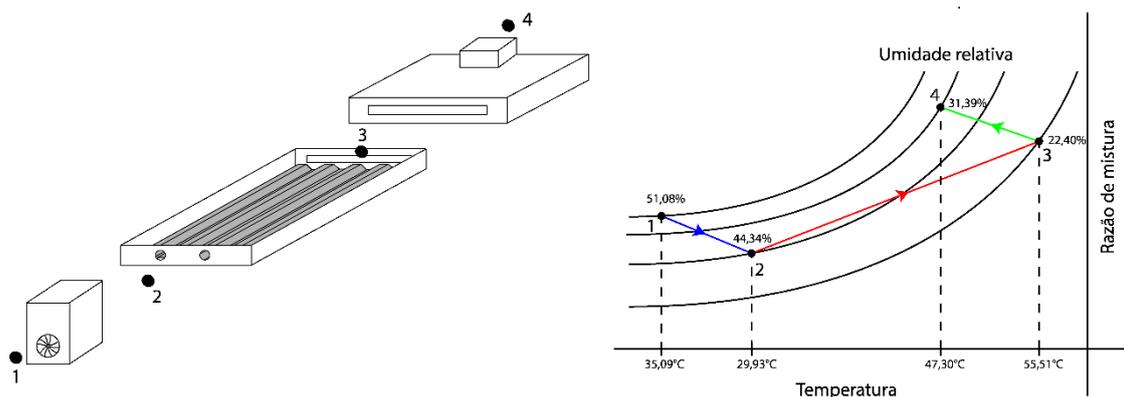
$$\eta_{\text{sistema com UD}} = 0,3405 * 0,9462 = 0,3222 = 32,22\%$$

E

$$\eta_{\text{sistema sem UD}} = 0,3069 * 0,9585 = 0,2627 = 29,42\%$$

Nas Figuras 4.55 e 4.56, são apresentadas desenhos esquemáticos dos processos de secagem solar, na carta Psicrométrica, dos experimentos de secagem solar EPM3com e EPM3sem.

Figura 4.55 - Ilustração do processo de secagem na carta psicrométrica para o experimento EPM3com.



Fonte: Própria autora.

1 representa o estado termodinâmico 1, antes da unidade dessecante;

2 representa o estado termodinâmico 2, antes do coletor solar, que é o mesmo que na saída da unidade dessecante;

3 representa o estado termodinâmico 3, na saída do coletor solar, que é o mesmo que na entrada da câmara de secagem;

4 representado o estado termodinâmico 4, na saída da câmara de secagem.

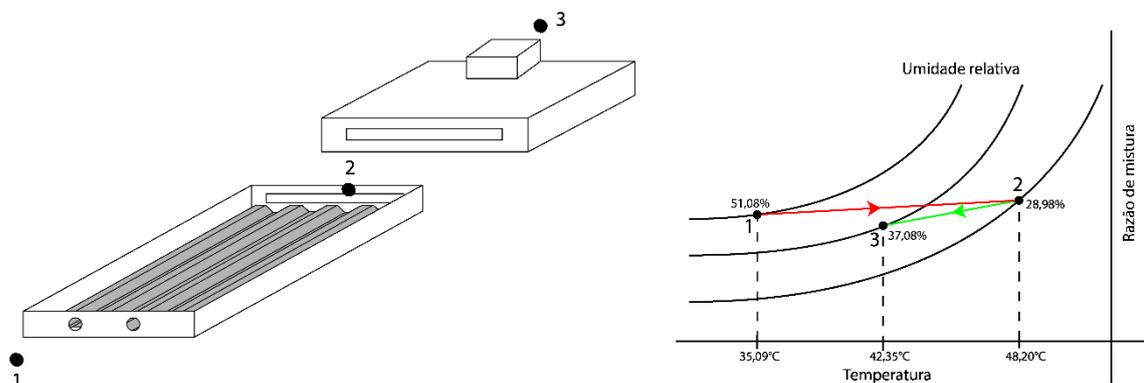
1 → 2 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar passa do estado 1 para o estado 2. Neste processo, ocorre, decorrente do processo de adsorção, redução da umidade relativa do ar (de 51,08% para 44,34%) e aumento da temperatura do ar (de 35,09°C para 39,93°C);

2 → 3 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar passa do estado 2 para o estado 3. Neste processo, ocorre, como consequência do aquecimento do ar no coletor solar, redução da umidade relativa do ar (de 44,34% para 22,40%) e aumento na temperatura do ar (de 39,93°C para 55,51°C);

3 → 4 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar passa do estado 3 para o estado 4. Neste processo, ocorrem, como consequência da transferência de massa de

vapor d'água da banana para o fluido de trabalho, aumento da umidade relativa do ar (de 22,40% para 31,39%), e como consequência da transferência de calor do fluido de trabalho para a banana, diminuição na temperatura do ar (de 55,51°C para 47,30°C).

Figura 4.56 - Ilustração do processo de secagem na carta psicrométrica para o experimento EPM3sem.



Fonte: Própria autora.

1 representa o estado termodinâmico 1, que é o do ar ambiente;

2 representa o estado termodinâmico 2, na saída do coletor solar, que é o mesmo que na entrada da câmara de secagem;

3 representa o estado termodinâmico 3, na saída da câmara de secagem;

1 → 2 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar passa do estado 1 para o estado 2. Neste processo, ocorre, como consequência do aquecimento do ar no coletor solar, redução da umidade relativa do ar (de 51,08% para 28,98%) e aumento na temperatura do ar (de 35,09°C para 48,20°C);

2 → 3 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar passa do estado 2 para o estado 3. Neste processo, ocorrem, como consequência da transferência de massa de vapor d'água da banana para o fluido de trabalho, aumento da umidade relativa do ar (de 28,98% para 37,08%), e como consequência da transferência de calor do fluido de trabalho para a banana, diminuição na temperatura do ar (de 48,20°C para 42,35°C).

Ajuste dos modelos de Page e Midilli *et al.* aos dados de cinética de secagem obtidos experimentalmente.

Na Tabela 4.26, são apresentados os dados de coeficiente de correlação (R^2), desvio quadrático médio (DQM) e desvio padrão (σ) obtidos no *Statistic* versão 10.0 quando se ajustou os modelos de Page e de Midilli *et al.* aos dados obtidos experimentalmente no período outono/inverno em Pombal, PB.

Tabela 4.26 – Ajuste dos modelos de Page e Midilli *et al.* aos dados do período outono/inverno em Pombal, PB.

	Page			Midilli <i>et al.</i>		
	R^2 (%)	DQM	σ	R^2 (%)	DQM	σ
EPM3com	99,67	0,01663	0,00937	99,63	0,01783	0,01033
EPM3sem	99,68	0,01644	0,00948	99,61	0,01807	0,01060
EPM4com	99,76	0,01435	0,00756	99,84	0,01183	0,00651
EPM4sem	99,84	0,01128	0,00678	99,88	0,00979	0,00552

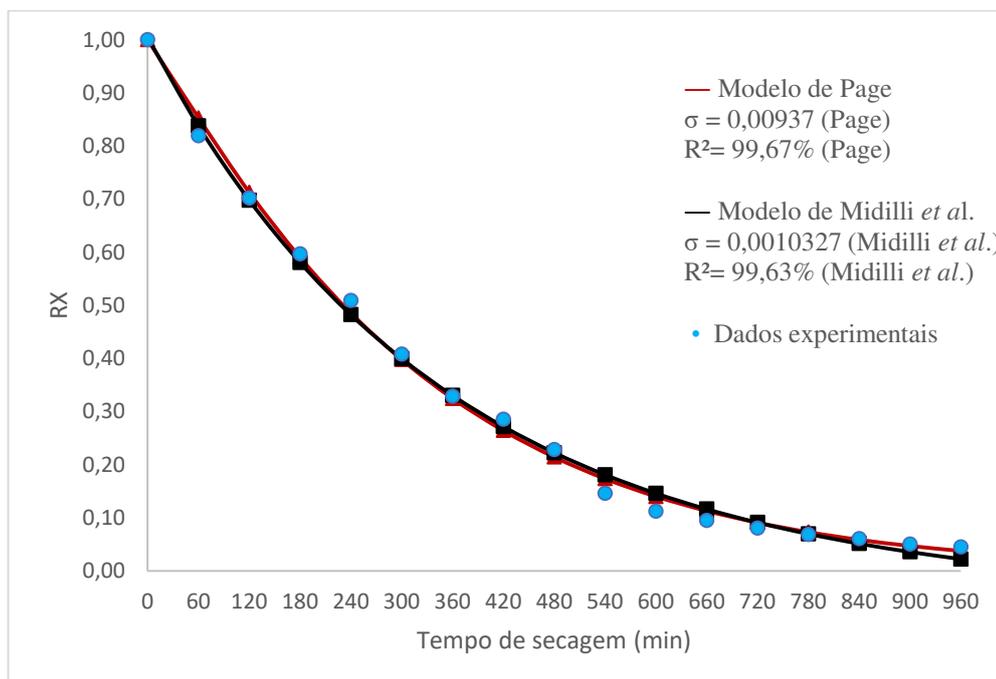
Fonte: Própria autora.

Foi possível observar, com base nos dados apresentados na Tabela 4.26, que os modelos matemáticos de Page e de Midilli *et al.* se ajustaram satisfatoriamente aos dados experimentais de ambos os sistemas de secagem para os testes realizados no período correspondente às características climáticas e meteorológicas típicas do semestre outono/inverno da cidade de Pombal, PB.

Para o sistema com unidade dessecante, obteve-se, em média, R^2 de 99,72% e 99,74%, DQM de 0,01549 e 0,01483 e desvio padrão de 0,00847 e 0,00842, para os modelos de Page e de Midilli *et al.*, respectivamente. Para o sistema sem unidade dessecante, obteve-se, em média, R^2 de 99,76% e 99,75%, DQM de 0,01386 e 0,01393 e desvio padrão de 0,00813 e 0,00806, para os modelos de Page e de Midilli *et al.*, respectivamente.

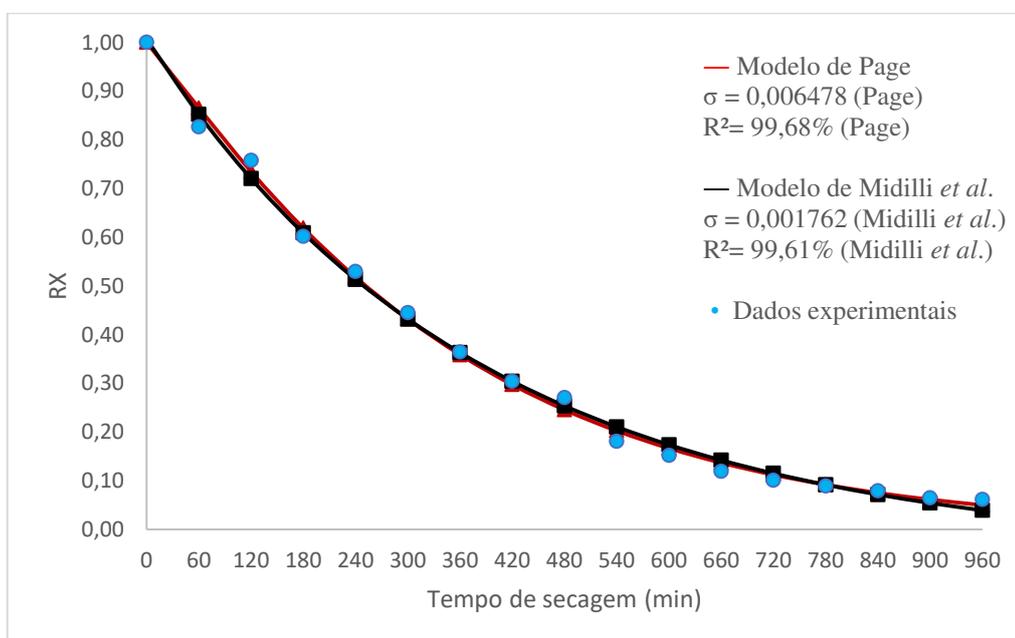
Nas Figuras 4.57 e 4.58, são apresentados os ajustes dos modelos de Page e Midilli *et al.* aos dados experimentais dos ensaios EPM3com e EPM3sem.

Figura 4.57 – Ajuste dos modelos de Page e Midilli *et al.* para EPM3com.



Fonte: Própria autora.

Figura 4.58 – Ajuste dos modelos de Page e Midilli *et al.* para EPM3sem.



Fonte: Própria autora.

Na Tabela 4.27, é apresentado um resumo das principais informações relacionadas aos dados médios de temperatura do ar, umidade relativa do ar e rendimentos dos coletores solares,

das câmaras de secagem e dos sistemas de secagem nos experimentos realizados nas condições climáticas e meteorológicas típicas do período de outono/inverno em Pombal, PB.

Tabela 4.27 - Resumo dos dados dos experimentos EPM3com, EPM3sem, EPM4com e EPM4sem.

	EPM3com	EPM3sem	EPM4com	EPM4sem
tsec (min)	600	720	660	780
η_C (%)	34,05	30,69	38,90	29,81
η_K (%)	94,62	95,85	93,05	95,26
η_{sistema} (%)	32,22	29,42	36,19	28,40
Ta (°C)	35,09	35,09	34,12	34,12
URa (%)	51,08	51,08	53,87	53,87
TsUD (°C)	39,93	-	40,28	-
URsUD (%)	44,34	-	45,62	-
TsC (°C)	55,51	48,20	59,05	49,55
URsC (%)	22,40	28,98	20,28	26,36
TsK (°C)	47,30	42,35	49,06	42,80
URsK (%)	31,39	37,08	30,60	35,53

Fonte: Própria autora.

onde:

tsec é o tempo de secagem;

η_C é o rendimento térmico do coletor solar;

η_K é o rendimento térmico da câmara de secagem;

η_{sistema} é o rendimento térmico do sistema de secagem solar

Ta é a temperatura do ar ambiente;

TsUD é a temperatura do ar na saída da unidade dessecante;

TsC é a temperatura do ar na saída do coletor solar;

TsK é a temperatura do ar na saída da câmara de secagem;

URa é a unidade relativa do ar ambiente;

URsUD é a unidade relativa do ar na saída da unidade dessecante;

URsC é a unidade relativa do ar na saída do coletor solar;

URsK é a unidade relativa do ar na saída da câmara de secagem.

4.3.2.2 Experimentos realizados em Campina Grande, PB

Em Campina Grande, PB foram realizados quatro (04) testes de secagem entre os dias 29 de abril e 09 de julho de 2021. Na Tabela 3.1 encontra-se a notação, a descrição e a data de cada experimento.

O terceiro experimento realizado em Campina Grande, no sistema com unidade dessecante (ECG3com), e o terceiro experimento realizado em Campina Grande, no sistema sem unidade dessecante (ECG3sem), foram realizados nos dias 29 e 30 de abril e 01 de maio de 2021, entre 08:00 h e 16:00 h, no primeiro dia, entre 08:00 h e 13:00 h, no segundo dia, e entre 08:00 h e 12:00 h, no terceiro dia. A temperatura do ar ambiente média foi de 31,9°C, a umidade relativa do ar ambiente média foi de 62,4% e a incidência de irradiação solar média foi de 439,60 W/m².

O quarto experimento realizado em Campina Grande, no sistema com unidade dessecante (ECG4com), e o quarto experimento realizado em Campina Grande, no sistema sem unidade dessecante (ECG4sem), foram realizados nos dias 08 e 09 de julho de 2021, entre 08:00 h e 16:00 h, a temperatura do ar ambiente média foi de 29,30°C, a umidade relativa do ar ambiente média foi de 54,93 % e a irradiação solar média de 597,01 W/m².

As bananas utilizadas nos experimentos ECG3com e ECG3sem possuíam teor de água inicial de 69,63%, massa seca de 11,42 g e teor de água de equilíbrio de 4,83%.

As bananas utilizadas nos experimentos ECG4com e ECG4sem possuíam teor de água inicial de 68,51%, massa seca de 11,84 g e teor de água de equilíbrio de 5,83%.

Os dados de decaimento médio da massa da banana ao longo da realização dos experimentos estão registrados na Tabela 4.28, para os experimentos ECG3com e ECG3sem e no Apêndice F para os experimentos ECG4com e ECG4sem. A tabela completa com os dados de decaimento de massa nos experimentos ECG3com e ECG3sem encontra-se no Apêndice F.

Tabela 4.28 - Decaimento da massa da banana nos experimentos ECG3com e ECG3sem.

Data	29 e 30 /04/2021		EPM3com			EPM3sem		
	01/05/2021							
Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)	
0	08:00	37,60	26,18	69,63	37,60	26,18	69,63	
60	09:00	34,25	22,83	66,65	34,37	22,95	66,77	
120	10:00	31,63	20,21	63,89	31,86	20,44	64,15	
180	11:00	28,43	17,01	59,84	29,17	17,75	60,85	
...	
840	09:00	14,94	3,52	23,58	16,05	4,63	28,86	
900	10:00	14,54	3,12	21,44	15,61	4,19	26,84	
960	11:00	14,37	2,95	20,55	15,30	3,88	25,38	
1020	12:00	13,80	2,38	17,23	14,77	3,35	22,68	

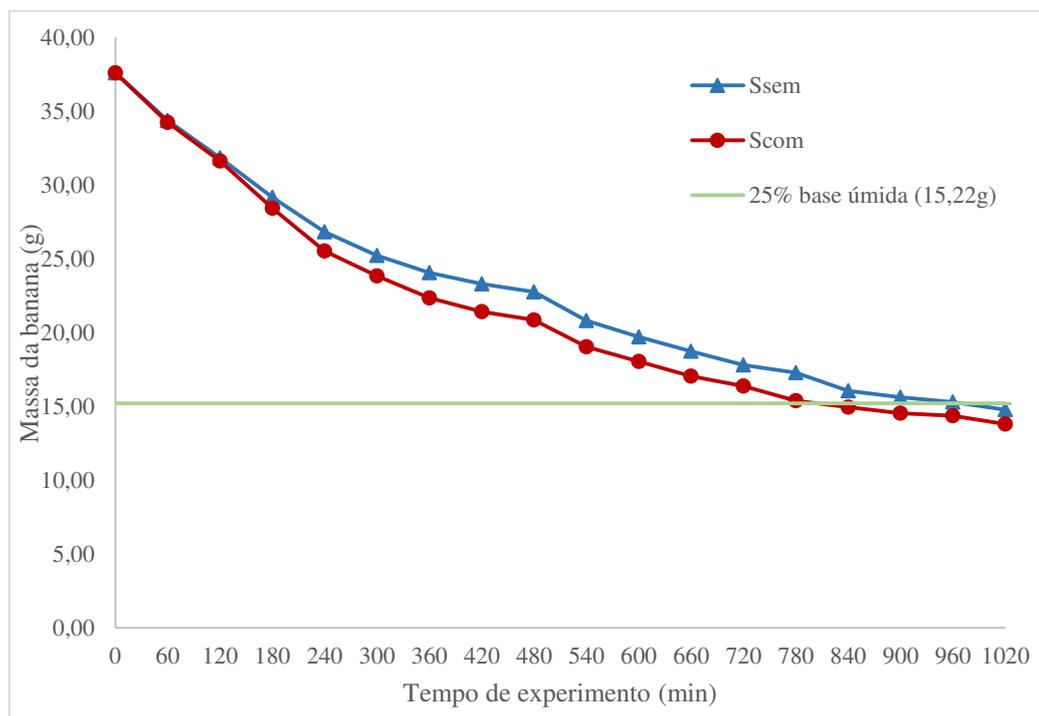
Fonte: Própria autora.

Na Tabela 4.28, pode-se observar que o teor de água máximo, em base úmida, de 25%, estabelecido pela ANVISA é obtido no Scom após 840 minutos (14 horas) de experimentos e no Ssem após 1020 minutos (17 horas) de experimentos, obtendo-se então um ganho de três horas de secagem ao se utilizar o dessecante sílica gel na unidade dessecante no sistema de secagem solar desenvolvido.

Neste experimento a massa da banana correspondente ao teor de água de 25% em base úmida é de 15,22 g. Após 840 minutos a massa média das bananas no sistema com dessecante é de 14,94 g e somente após 1020 minutos é que a massa média das bananas no sistema sem dessecante é menor que 15,22 g, à saber, 14,77 g.

Na Figura 4.59, pode-se observar o decaimento da massa da banana a partir dos dados da Tabela 4.24.

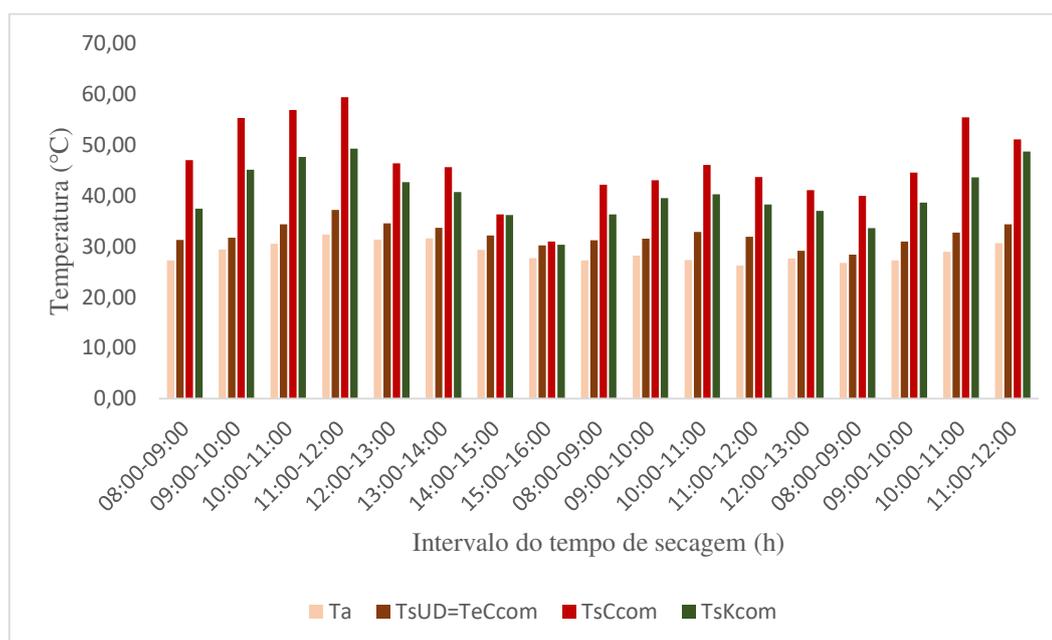
Figura 4.59 - Decaimento da massa da banana durante os experimentos ECG3com e ECG3sem.



Fonte: Própria autora.

Os dados de temperatura e umidade relativa do ar dos experimentos ECG3com e ECG3sem estão apresentados na Figuras 4.60, 4.61, 4.62 e 4.63. Os dados de temperatura e umidade relativa do ar dos experimentos ECG4com e ECG4sem encontram-se no Apêndice F.

Figura 4.60 - Temperaturas do ar no sistema de secagem solar no experimento ECG3com.



Fonte: Própria autora.

onde:

T_a é a temperatura do ar ambiente;

T_{eUD} é a temperatura do ar na entrada na unidade dessecante;

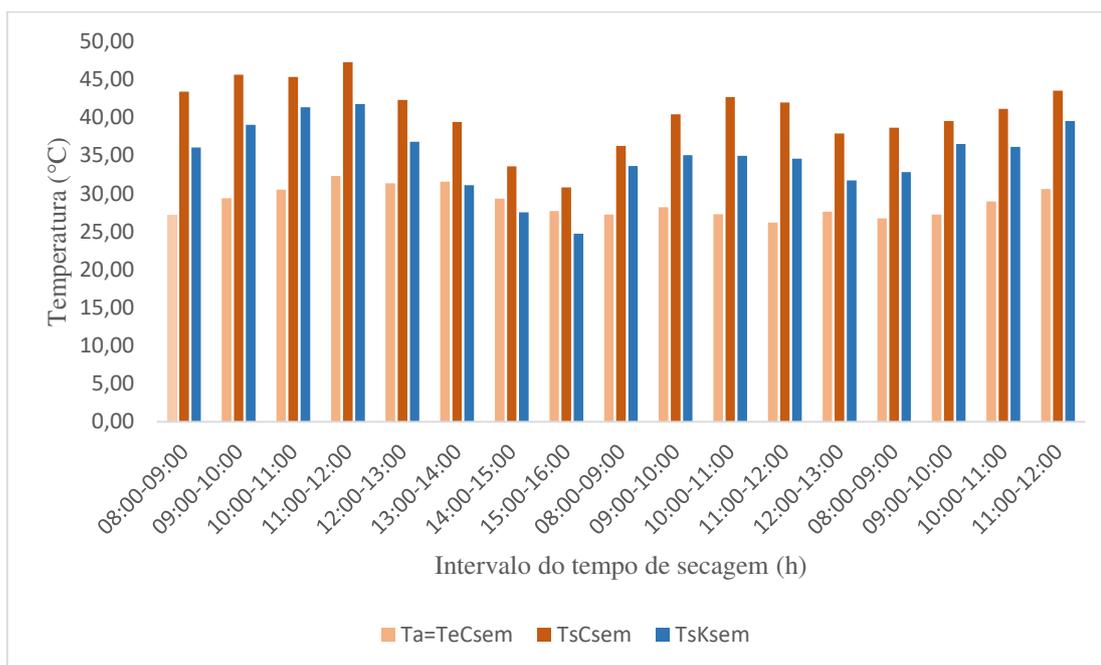
T_{sUD} é a temperatura do ar na saída da unidade dessecante;

T_{eCcom} é a temperatura do ar na entrada do coletor solar do sistema de secagem com unidade dessecante;

T_{sCcom} é a temperatura do ar na saída do coletor solar do sistema de secagem com unidade dessecante;

T_{sKcom} é a temperatura do ar na saída da câmara de secagem do sistema de secagem com unidade dessecante.

Figura 4.61 - Temperaturas do ar no sistema de secagem solar no experimento ECG3sem.



Fonte: Própria autora.

onde:

T_a é a temperatura do ar ambiente;

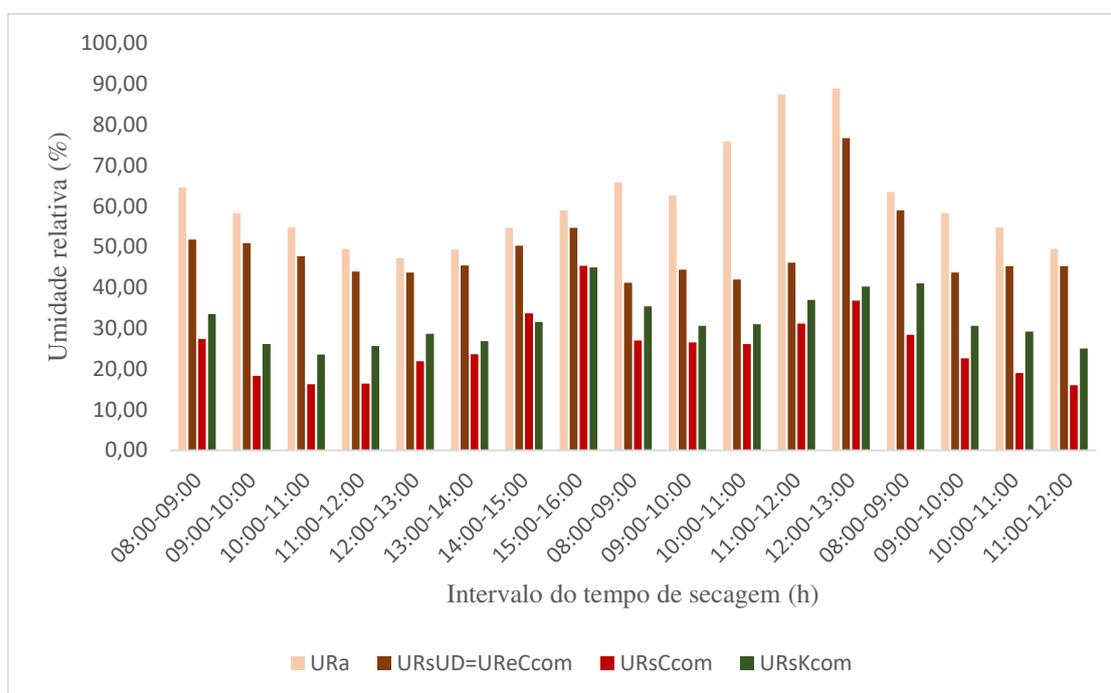
T_{eCsem} é a temperatura do ar na entrada do coletor solar do sistema de secagem sem unidade dessecante;

T_{sCsem} é a temperatura do ar na saída do coletor solar do sistema de secagem sem unidade dessecante;

T_{sKsem} é a temperatura do ar na saída da câmara de secagem do sistema de secagem sem unidade dessecante.

Em todo o processo de secagem a temperatura do ar de entrada do coletor solar é maior no sistema com dessecante e o mesmo ocorre com a temperatura do ar de saída levando a menor tempo de secagem.

Figura 4.62 - Umidades relativas do ar no sistema de secagem solar no experimento ECG3com.



Fonte: Própria autora.

onde:

UR_a é a unidade relativa do ar ambiente;

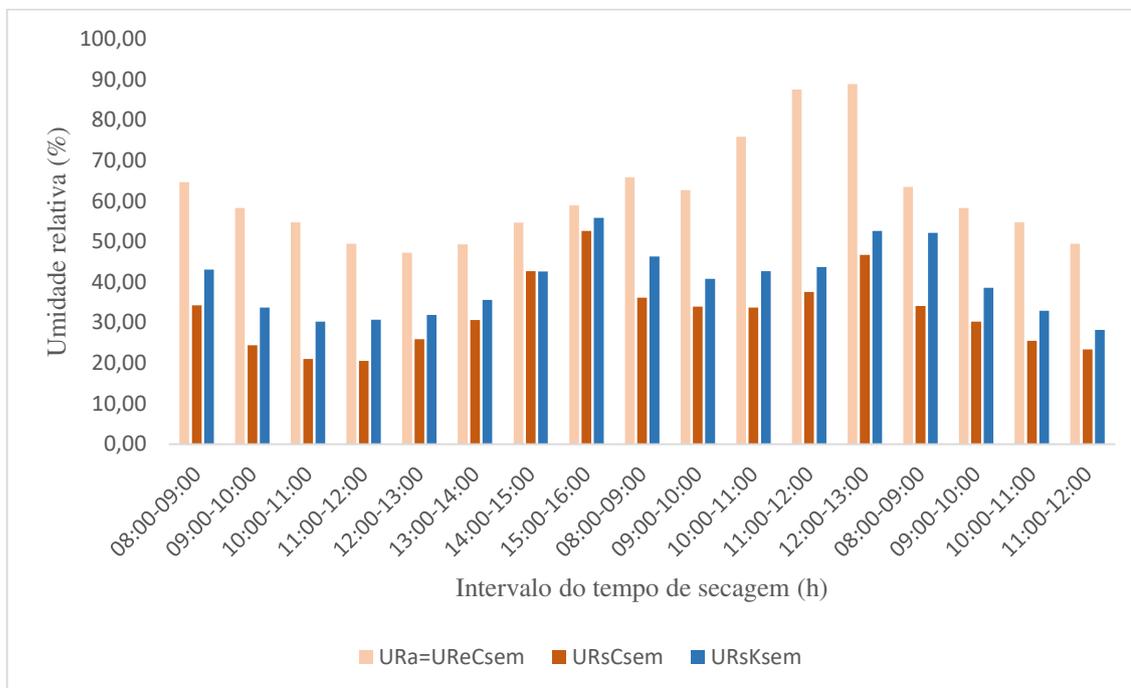
UR_{sUD} é a unidade relativa do ar na saída da unidade dessecante;

UR_{cCom} é a unidade relativa do ar na entrada do coletor solar do sistema de secagem com unidade dessecante;

UR_{sCom} é a unidade relativa do ar na saída do coletor solar do sistema de secagem com unidade dessecante;

URsKcom é a unidade relativa do ar na saída da câmara de secagem do sistema de secagem com unidade dessecante.

Figura 4.63 - Umidades relativas do ar no sistema de secagem solar no experimento ECG3sem.



Fonte: Própria autora.

onde:

URa é a unidade relativa do ar ambiente;

URcsem é a unidade relativa do ar de entrada do coletor solar do sistema de secagem sem unidade dessecante;

URsCsem é a unidade relativa do ar de saída do coletor solar do sistema de secagem sem unidade dessecante;

URsKsem é a unidade relativa do ar de saída da câmara de secagem do sistema de secagem sem unidade dessecante.

Durante o primeiro dia de experimento por três vezes chegou a chover por alguns minutos sendo preciso proteger os equipamentos como sensores e coolers, mas não foi necessário interromper a secagem. Até as 13:00 h do segundo dia de experimentos seguiu do mesmo modo do primeiro dia, mas às 13:10 h as condições meteorológicas ficaram desfavoráveis com precipitação de chuva, obrigando a interrupção dos testes. No terceiro dia a

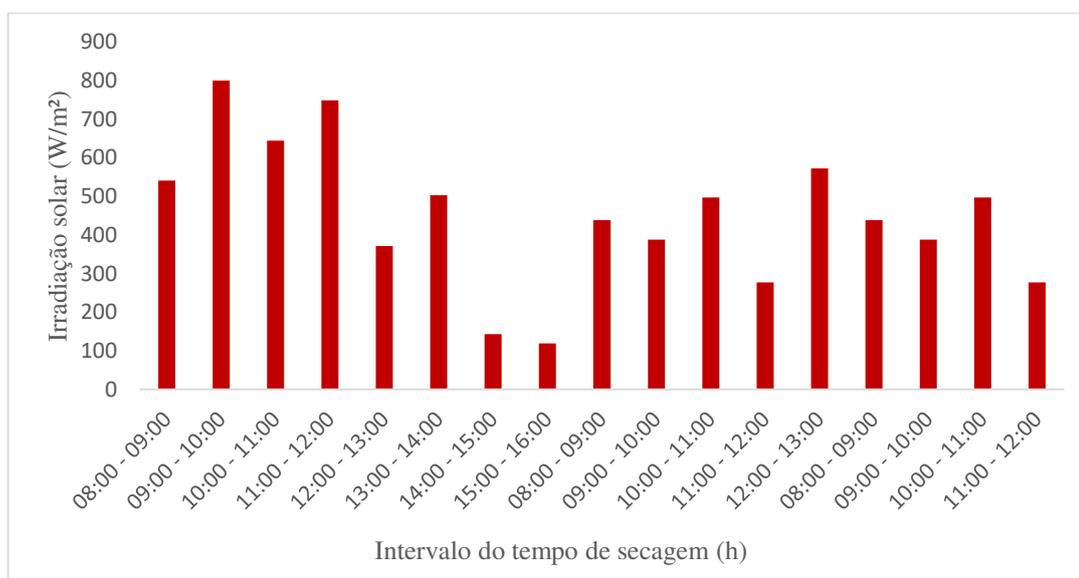
situação foi como a do primeiro dia, pequenas chuvas e muitas nuvens. Às 12:00 h estimou-se que a secagem no sistema sem dessecante havia ocorrido e encerrou-se o experimento.

Neste experimento a sílica gel foi trocada a cada 03 (três) horas, aproximadamente, devido a saturação observada.

As tabelas com os valores obtidos experimentalmente e que permitiram construir gráficos de temperatura e umidade relativa do ar no processo de secagem estão disponíveis no apêndice F.

Na Figura 4.64, são apresentados os dados médios horários da intensidade de irradiação solar nos dias 29 e 30 de abril e 01 de maio.

Figura 4.64 - Média da irradiação solar na realização de ECG3com e ECG3sem.



Fonte: Adaptado <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>.

Observando a Figura 4.64, foi possível observar que a distribuição das irradiações solares foram as mais baixas apresentadas em todos os experimentos, com valor médio de 439,60 W/m².

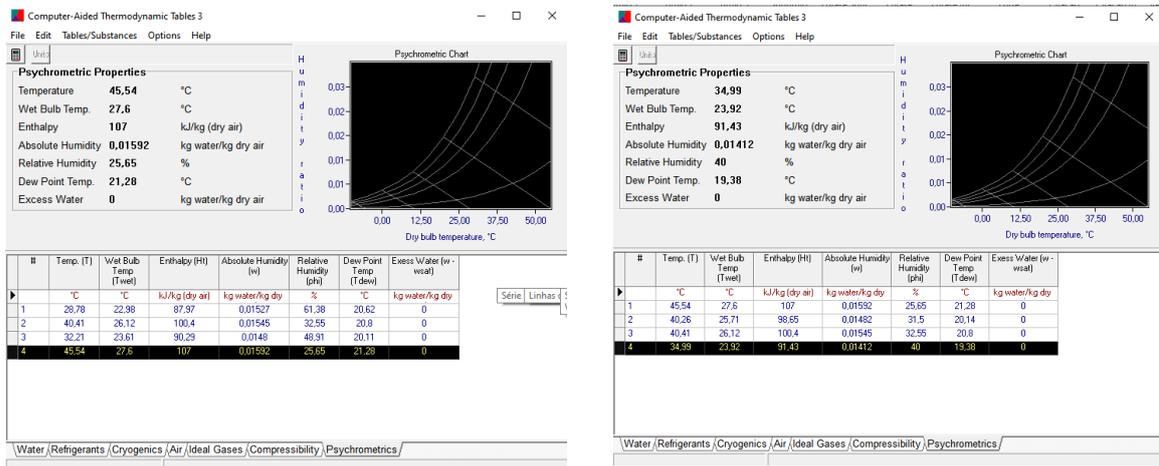
Rendimento térmico

Para calcular o rendimento térmico dos coletores solares dos experimentos ECG3com e ECG3sem, foi utilizado o método do balanço de energia. Para tanto, foram utilizados os dados de temperatura e umidade relativa do ar de secagem obtidos através do SMAD.

Para o cálculo do rendimento termodinâmico do coletor solar foram utilizados os parâmetros da Tabela 4.18. E para calcular o rendimento térmico da câmara de secagem utilizou-se os parâmetros apresentados na Tabela 4.19.

Na Figura 4.65, são apresentados os dados, obtidos pelo CATT, necessários aos cálculos dos rendimentos térmicos dos coletores solares e das câmaras de secagem nos experimentos ECG3com e ECG3sem.

Figura 4.65 - Dados termodinâmicos dos experimentos ECG3com e ECG3sem obtidos pelo CATT.



Fonte: Própria autora.

Coletor solar

Substituindo os valores obtidos para o sistema de secagem com unidade dessecante, tem-se:

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{\dot{Q}_{\text{solar}}} = \frac{0,010017 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left(107 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 90,29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)}{1,00 \text{ m}^2 \cdot 0,43960 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} = 38,07\%$$

Substituindo os valores obtidos para o sistema de secagem sem unidade dessecante, tem-se:

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{\dot{Q}_{\text{solar}}} = \frac{0,010017 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (100,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 87,97 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})}{1,00 \text{ m}^2 \cdot 0,43960 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} = 28,32\%$$

Câmara de secagem

Substituindo os valores para o sistema de secagem com unidade dessecante, tem-se:

$$\eta_K = \frac{\dot{m}_s h_s + \dot{E}_b}{\dot{m}_e h_e} = \frac{\left(0,02448768 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 98,65 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) + \left(0,0004496 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 168,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)}{0,02448768 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 107 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 95,09\%$$

Substituindo os valores para o sistema de secagem sem unidade dessecante, tem-se:

$$\eta_K = \frac{\dot{m}_s h_s + \dot{E}_b}{\dot{m}_e h_e} = \frac{\left(0,02448768 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 91,43 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) + \left(0,0003730 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 146,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)}{0,02448768 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 100,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 93,29\%$$

Observa-se que o valor do rendimento do coletor solar do sistema de secagem com unidade dessecante é superior ao do coletor do sistema sem unidade dessecante, sendo que o rendimento do coletor no sistema sem unidade dessecante representa 74,39% do rendimento do coletor do sistema com unidade dessecante.

Observa-se também que, o valor do rendimento da câmara de secagem do sistema de secagem solar com unidade dessecante é superior ao rendimento da câmara de secagem do sistema sem unidade dessecante.

Como o rendimento do sistema de secagem é dado por:

$$\eta_{\text{sistema}} = \eta_c * \eta_K$$

Tem-se:

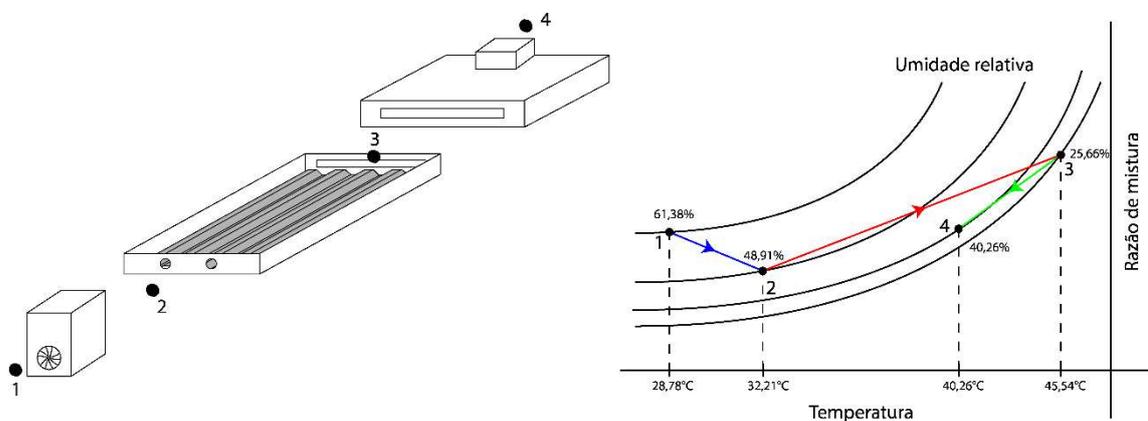
$$\eta_{\text{sistema com UD}} = 0,3807 * 0,9509 = 0,3621 = 36,21\%$$

E

$$\eta_{\text{sistema sem UD}} = 0,2832 * 0,9329 = 0,2642 = 26,42\%$$

Nas Figuras 4.66 e 4.67, são apresentadas desenhos esquemáticos dos processos de secagem solar, na carta Psicrométrica, dos experimentos de secagem solar ECG3com e ECG3sem.

Figura 4.66 - Ilustração do processo de secagem na carta psicrométrica para experimento ECG3com.



Fonte: Própria autora.

1 representa o estado termodinâmico 1, antes da unidade dessecante;

2 representa o estado termodinâmico 2, antes do coletor solar, que é o mesmo que na saída da unidade dessecante;

3 representa o estado termodinâmico 3, na saída do coletor solar, que é o mesmo que na entrada da câmara de secagem;

4 representado o estado termodinâmico 4, na saída da câmara de secagem.

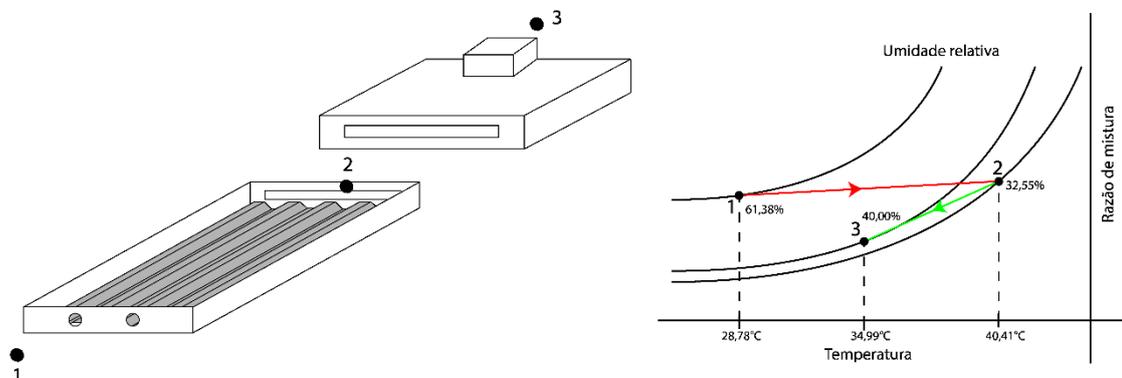
1 → 2 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar passa do estado 1 para o estado 2. Neste processo, ocorre, decorrente do processo de adsorção, redução da umidade relativa do ar (de 62,38% para 48,91%) e aumento da temperatura do ar (de 28,78°C para 32,21°C);

2 → 3 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar passa do estado 2 para o estado 3. Neste processo, ocorre, como consequência do aquecimento do ar no coletor solar, redução da umidade relativa do ar (de 48,91% para 25,66%) e aumento na temperatura do ar (de 32,21°C para 45,54°C);

3 → 4 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar passa do estado 3 para o estado 4. Neste processo, ocorrem, como consequência da transferência de massa de vapor d'água da banana para o fluido de trabalho, aumento da umidade relativa do ar

(de 25,66% para 31,50%), e como consequência da transferência de calor do fluido de trabalho para a banana, diminuição na temperatura do ar (de 45,54°C para 40,26°C).

Figura 4.67 - Ilustração do processo de secagem na carta psicrométrica para o experimento ECG3sem.



Fonte: Própria autora.

1 representa o estado termodinâmico 1, que é o do ar ambiente;

2 representa o estado termodinâmico 2, na saída do coletor solar, que é o mesmo que na entrada da câmara de secagem;

3 representa o estado termodinâmico 3, na saída da câmara de secagem;

1 → 2 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar passa do estado 1 para o estado 2. Neste processo, ocorre, como consequência do aquecimento do ar no coletor solar, redução da umidade relativa do ar (de 61,38% para 32,55%) e aumento na temperatura do ar (de 28,78°C para 40,41°C);

2 → 3 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar passa do estado 2 para o estado 3. Neste processo, ocorrem, como consequência da transferência de massa de vapor d'água da banana para o fluido de trabalho, aumento da umidade relativa do ar (de 32,55% para 40,00%), e como consequência da transferência de calor do fluido de trabalho para a banana, diminuição na temperatura do ar (de 40,41°C para 34,99°C).

Ajuste dos modelos de Page e Midilli *et al.* aos dados de cinética de secagem obtidos experimentalmente.

Na Tabela 4.29, são apresentados os dados de coeficiente de correlação (R^2), desvio quadrático médio (DQM) e desvio padrão (σ) obtidos no *Statistic* versão 10.0, quando se ajustou

os modelos de Page e de Midilli *et al.* aos dados obtidos experimentalmente no período outono/inverno em Campina Grande, PB.

Tabela 4.29 – Ajuste dos modelos de Page e Midilli *et al.* Aos dados do período outono/inverno em Campina grande, PB.

	Page			Midilli <i>et al.</i>		
	R ² (%)	DQM	σ	R ² (%)	DQM	σ
EPM3com	99,72	0,01462	0,00764	99,73	0,01424	0,00736
EPM3sem	99,53	0,01797	0,00961	99,57	0,01709	0,00911
EPM4com	99,62	0,01740	0,01052	99,78	0,01325	0,00783
EPM4sem	99,46	0,01881	0,01070	99,53	0,02076	0,01223

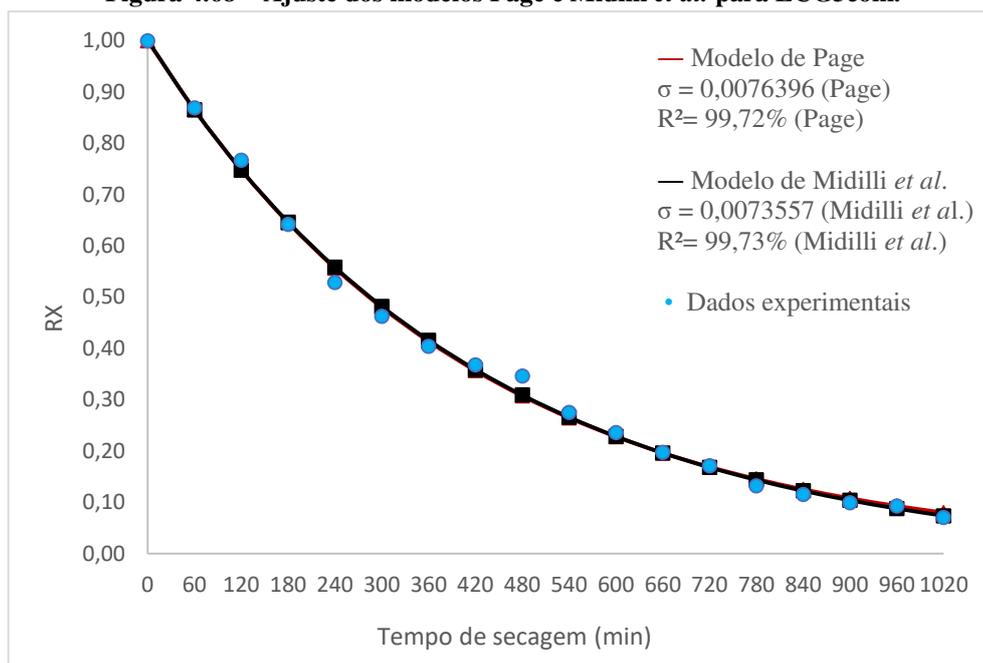
Fonte: Própria autora.

É possível observar, com base nos dados apresentados na Tabela 4.29, que os modelos matemáticos de Page e de Midilli *et al.* se ajustaram satisfatoriamente aos dados experimentais de ambos os sistemas de secagem para os testes realizados no período correspondente às características climáticas e meteorológicas típicas do semestre outono/inverno da cidade de Campina Grande.

Para o sistema com unidade dessecante, obteve-se, em média, R² de 99,67% e 99,76%, DQM de 0,01601 e 0,01375 e desvio padrão de 0,00908 e 0,00759 para os modelos de Page e de Midilli *et al.*, respectivamente. Para o sistema sem unidade dessecante, obteve-se, em média, R² de 99,50% e 99,55%, DQM de 0,01839 e 0,01893 e desvio padrão de 0,01015 e 0,01067 para os modelos de Page e de Midilli *et al.*, respectivamente.

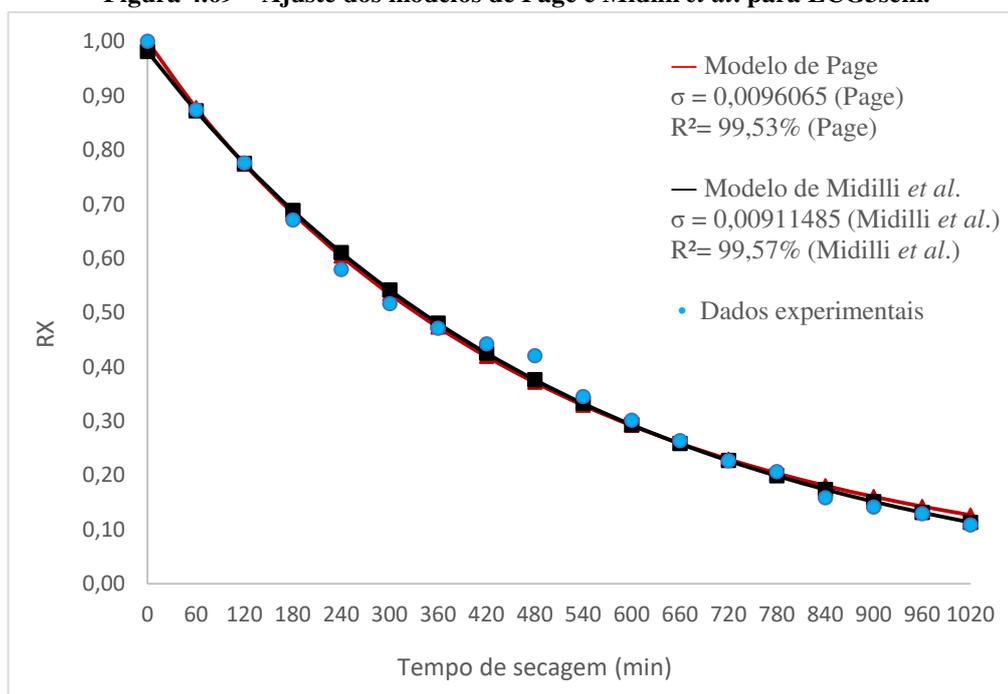
Nas Figura 4.68 e 4.69, são apresentados os ajustes dos modelos de Page e Midilli *et al.* aos dados experimentais dos ensaios ECG3com e ECG3sem.

Figura 4.68 – Ajuste dos modelos Page e Midilli *et al.* para ECG3com.



Fonte: Própria autora.

Figura 4.69 – Ajuste dos modelos de Page e Midilli *et al.* para ECG3sem.



Fonte: Própria autora.

Na Tabela 4.30, é apresentado um resumo das principais informações relacionadas aos dados médios de temperatura do ar, umidade relativa do ar e rendimentos dos coletores solares,

das câmaras de secagem e dos sistemas de secagem nos experimentos realizados nas condições climáticas e meteorológicas típicas do período de outono/inverno em Campina Grande.

Tabela 4.30 - Resumo dos dados dos experimentos ECG3com, ECG3sem, ECG4com e ECG4sem.

	ECG3com	ECG3sem	ECG4com	ECG4sem
tsec (min)	840	1020	780	960
η_C (%)	38,07	28,32	35,55	31,83
η_K (%)	95,09	93,29	96,36	92,30
η_{sistema} (%)	36,21	26,42	34,26	29,38
Ta (°C)	28,78	28,78	29,30	29,30
URa (%)	61,38	61,38	54,93	54,93
TsUD (°C)	32,21	-	33,87	-
URsUD (%)	48,91	-	41,33	-
TsC (°C)	45,54	40,41	50,49	46,13
URsC (%)	25,65	32,55	20,26	24,46
TsK (°C)	40,26	34,99	42,48	38,65
URsK (%)	31,50	40,00	31,41	35,86

Fonte: Própria autora.

onde:

tsec é o tempo de secagem;

η_C é o rendimento térmico do coletor solar;

η_K é o rendimento térmico da câmara de secagem;

η_{sistema} é o rendimento térmico do sistema de secagem solar;

Ta é a temperatura do ar ambiente;

TsUD é a temperatura do ar na saída da unidade dessecante;

TsC é a temperatura do ar na saída do coletor solar;

TsK é a temperatura do ar na saída da câmara de secagem;

URa é a umidade relativa do ar ambiente;

URsUD é a umidade relativa do ar na saída da unidade dessecante;

URsC é a umidade relativa do ar na saída do coletor solar;

URsK é a umidade relativa do ar na saída da câmara de secagem.

4.4 Comentários adicionais

A partir dos testes experimentais de secagem nos sistemas de secagem solar com e sem unidade dessecante foi possível inferir:

- A temperatura média do ar na saída do coletor solar no sistema de secagem com unidade dessecante é sempre maior que a temperatura do ar na saída do coletor solar no sistema sem unidade dessecante;
- Temperatura do ar ambiente mais amenas e umidades relativas do ar ambiente mais elevadas acarretam maiores diferenças entre os tempos de secagem dos sistemas com e sem unidade dessecante;
- A unidade dessecante foi capaz de reduzir a umidade relativa do ar ambiente através do processo de adsorção de parte do valor de água presente no ar pela sílica gel. A temperatura do ar ambiente sobre ligeiro aumento ao passar pelo dessecante, ganho de temperatura provocado pela turbulência do ar ao passar na unidade dessecante;
- A utilização da unidade dessecante permitiu redução no tempo de secagem entre 60 e 180 minutos. Sendo a maior diferença observada na cidade de Campina Grande, PB;
- O coletor solar desenvolvido foi capaz de realizar a regeneração da sílica gel saturada no processo de secagem do sistema com unidade dessecante, por meio da convecção natural;
- As bananas utilizadas nos experimentos apresentaram teor de água inicial de 70%;

CONCLUSÕES

CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos, foi possível observar que o sistema de secagem solar desenvolvido foi capaz de utilizar a energia solar térmica para aquecer o ar ambiente, baixar sua umidade relativa e realizar o processo de secagem das amostras de banana.

O sistema de secagem solar desenvolvido apresenta inovações em relação aos secadores já desenvolvidos na UFCG e atende à demanda necessária ao processo de secagem da banana para as condições meteorológicas do agreste e do sertão paraibano.

O sistema de medição e aquisição de dados (SMAD) desenvolvido foi capaz de medir e registrar os dados de temperatura e umidade relativa do fluido de trabalho durante os processos termodinâmicos.

A utilização da técnica do *Design of Experiments* foi capaz de determinar configurações ótimas para o coletor solar e para a unidade dessecante. O arranjo ótimo para a unidade dessecante foi: volume interno de 24 litros, duas bandejas e velocidade do ar de 2 m/s. O arranjo otimizado para o coletor solar foi: cobertura transparente de policarbonato alveolar e inserção de uma telha de zinco pintada de preto fosco atuando como capacitor térmico.

Em Campina Grande, no sistema de secagem com unidade dessecante, obteve-se tempo médio de secagem de 13 (treze) horas e rendimento térmico médio de 34%. No sistema sem unidade dessecante, obteve-se tempo médio de secagem de 16 (dezesesseis) horas e rendimento térmico médio de 28%. Em Pombal, no sistema de secagem com unidade dessecante, obteve-se tempo médio de secagem de 11 (onze) horas e rendimento térmico médio de 33%. No sistema sem unidade dessecante, obteve-se tempo médio de secagem de 12 (doze) horas e rendimento térmico médio de 28%.

A partir dos ajustes do modelo de Page aos dados experimentais de secagem nos sistemas de secagem com e sem unidade dessecante, obteve-se, respectivamente, em média, coeficiente de correlação de 99,73% e de 99,76%. Estes valores são similares aos relatados na literatura. A partir dos ajustes do modelo de Midilli *et al.* aos dados experimentais de secagem nos sistemas de secagem com e sem unidade dessecante, obteve-se, respectivamente, em média, coeficiente de correlação de 99,76% e de 99,77%. Estes valores são similares aos relatados na literatura.

O rendimento térmico médio do sistema de secagem solar com unidade dessecante foi de 34%, resultado similar aos reportados na literatura. O rendimento térmico médio do sistema

de secagem solar sem unidade dessecante foi de 28%, resultado superior aos reportados na literatura.

A partir dos dados obtidas nos experimentos de secagem, foi possível plotar na carta psicrométrica os principais estados e processos termodinâmicos do ar de secagem.

Diante do exposto, é possível concluir que o secador solar desenvolvido é tecnicamente viável, sendo recomendado seu emprego para redução de perdas de alimentos e para oferta de produtos com maior valor agregado.

Sugestões de trabalhos futuros

Como sugestões de trabalhos que podem ser desenvolvidos a partir das análises aqui apresentadas, propõe-se:

- Testar experimentalmente, outros materiais como dessecante do ar de secagem;
- Testar experimentalmente, a desidratação de outros produtos alimentícios como frutas e hortaliças;
- Realizar a modelagem matemática do sistema de secagem desenvolvido e fazer a simulação numérica e computacional do processo de secagem.

REFERÊNCIAS

ABRAFRUTA. **Associação Brasileira dos Produtores Exportadores de Frutas e Derivados**. Disponível em: <https://abrafrutas.org/2019/03/07/>. Acesso em 20 de outubro de 2019.

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.

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária – **Resolução da Diretoria Colegiada (RDC)**, nº 272, de 22 de setembro de 2005.

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.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold. 1992.

CARNEIRO, Bruno de Alencar. **Desenvolvimento de uma bancada experimental de secagem com roda dessecante e aquecimento por energia solar fotovoltaica**. 2019, 174 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza - CE, 2019.

CHRAMSA-ARD, W., JINDARUKSA, S., SIRISUMPUNWONG, C., SONSAREE, S. Performance evaluation of the desiccant bed solar dryer. **Energy Procedia**. V. 34, p. 189-197. 2013.

COSTA, N. L.; LEITE FILHA, M. de S.; CONCEIÇÃO, J. A. S. e S. da; GOMES, Ítalo de A.; SANTANA, V. L.; FERNANDES, J. F. de S.; LIMA JUNIOR, C. de; GRILO, M. B. Evaluation of a direct exposure solar drying system for pineapple under meteorological conditions in the northeastern semiarid region. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 8, p. e31910817399, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i8.17399. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/17399>. Acesso em 9 de agosto 2021.

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) – Programa de Pós-Graduação 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.

CRUZ, N. B.; JESUS, J. G.; BACHA, C. J. C.; COSTA, E. M. Acesso da agricultura familiar ao crédito e à assistência técnica no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 59, n. 3. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.226850>. 2021.

CUNICO, M. W. M., CUNICO, M. M., MIGUEL, O. G. ZAWADZKI, S. F., PERALTA-ZAMORA, P. & VOLPATO, N. Planejamento fatorial: Uma ferramenta estatística valiosa para a definição de parâmetros experimentais empregados na pesquisa científica. **Visão acadêmica**. Curitiba – PR, v. 09, n. 01, p. 23-32, 2008.

DINA, S. F.; AMBARITA, H.; NAPITULUPU, F. H.; KAWAI, H. Study on effectiveness of continuous solar dryer integrated with desiccant thermal storage for drying cocoa beans. Elsevier. **Case studies in thermal Engineering**, v. 5, p. 32-40. 2015.

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.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Countries / Production Quantily / Pineapples / 2018**. 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em 30 março 2020.

FARIAS, Raimundo Pereira de. Secagem de banana em estufa: efeitos térmicos e geométricos. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, PB, 135p, 2011.

FERNANDES, Jonas. Fernando. De Souza. **Desenvolvimento experimental de um secador solar especial com sílica gel como dessecante do ar de secagem**. 2021, 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande - PB, 2021.

FUDHOLI, A., SOPIAN, K., RUSLAN, M.H., ALGHOUL, M.A., SULAIMAN, M.Y. Review of solar dryers for agricultural and marine products. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.14, p.1 – 30, 2010.

FUDHOLI, A.; SOPIAN, K., YAZDI, M. H.; RUSLAN, M. H., GABBASA, M.; KAZEM, H. A. Performance analysis of solar drying system for red chili. **Solar Energy**. v.99, p.47-54, 2014.

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.

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

GOMES, L. S.; FURTADO, A. C. R.; SOUZA, M. C. A sílica e suas particularidades. **Revista Virtual de Química**. v. 10. n 4. 2018.

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.

HARARI, Yuval Noah: **Sapiens: Uma breve história da humanidade**. São Paulo: Companhia das Letras. 2014.

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.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal: culturas temporárias e permanentes**. Rio de Janeiro-RJ, Vol. 46, 2019.

INMET - Instituto nacional de meteorologia. Dados históricos anuais. 2021. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em 15 de julho de 2021.

LEITÃO, A. E. B. **Estudos de secagem de produtos agroalimentares**. Lisboa, Portugal: Instituto de Investigação Científica Tropical. 1998.

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.

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>

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

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

NUNES, Antônio 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.

OLIVEIRA, L. C. T. G., PAES, J. L., GUIMARÃES, C. L. (2018). Avaliação da eficiência do coletor solar plano acoplado em secador híbrido. *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*. Gramado-RS.

PAIVA, R. B. Carta Psicrométrica. Blogsot. 2014. Disponível em: <http://rogeriobpaiva.blogspot.com/2014/03/carta-psicrometricas-sofwarees-para.html>. Acesso em 15 de abril de 2021.

Paraíba. Wikipédia. 2021. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Paraiba_MesoMicroMunicip.svg. Acesso em 15 de maio de 2021.

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.

PERALTA-ZAMORA, P., MORAIS, J. L. & NAGATA, N. Por que otimização multivariada?. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 10, n. 02, p. 106-110, 2005.

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: Carita, 2014.

RUZHU, W., LIWEI, W., JINGYI, W. **Adsorption Refrigeration Technology Theory and Application**, 1 ed. Singapura: Wiley. 2014.

SILVA, Alfredo José Ferreira. **Adsorção dos íons de cobre usando pó da palha da carnaúba e bentonita: estudo cinético, termodinâmico e de equilíbrio**. 2019, 162 p. Tese (Doutorado

em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2019.

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.

Solstício. Brasil Escola. 2021. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/solsticio.htm>. Acesso em 27 de julho de 2021.

SOUSA, R. V. **Secagem em camada fina e espessa de grãos de arroz vermelho em casca: Avaliação experimental, modelagem e simulação**. 2017, 207 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. Campina Grande, PB, 2017.

TABORDA, D. M. **Uso de energia solar para o aquecimento do ar em secadores de grãos**. 2017, 73 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia - Universidade Federal São João Del Rei - UFSJ. São João Del Rei, MG, 2017.

TEDESCO, F.C.; BULHER, A. J.; WORTMANN, S. Design, construction, and analysis os a passive indirect solar dryer with chimney. **Journal Solar Energy Engineering**, v. 141, June 2019.

Umidade do ar e a densidade do ar. if.ufrgs.br. 2015. Disponível em: <https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=umidade-do-ar-e-a-densidade-do-ar>. Acesso em 10 de maio de 2021.

APÊNDICES

Apêndice A – Especificações do sensor DHT22

- Modelo: AM2302.
- Tensão de operação: 3-5 VDC (5,5 VDC máximo)
- Faixa de medição de umidade: 0 a 100% UR.
- Faixa de medição de temperatura: -40°C a +80°C.
- Corrente: 2,5 mA máximo durante uso, em *stand by* de 100 uA a 150 uA.
- Precisão de umidade de medição: $\pm 2,0\%$ UR.
- Precisão de medição de temperatura: $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Apêndice B – Tabelas de temperaturas e umidades relativa do ar nos experimentos com as unidades dessecantes 2, 3, 4, 5, 6 e 7

TABELA B.1: RESUMO DE DADOS DOS EXPERIMENTOS COM A UNIDADE DESSECANTE 2

	Experimento 1	Experimento 2
Umidade relativa do ar ambiente média (%)	59,70	56,54
Umidade relativa do ar de saída média (%)	43,26	44,10
Temperatura do ar ambiente média (°C)	24,11	24,35
Temperatura do ar de saída média (°C)	28,66	27,04
Média URa – URsUD (%)	16,44	12,44
Média TsUD – Ta (°C)	4,55	2,69

FONTE: PRÓPRIA AUTORA.

TABELA B.2: RESUMO DE DADOS DOS EXPERIMENTOS COM A UNIDADE DESSECANTE 3

	Experimento 1	Experimento 2
Umidade relativa do ar ambiente média (%)	61,30	60,88
Umidade relativa do ar de saída média (%)	42,80	45,90
Temperatura do ar ambiente média (°C)	23,91	22,99
Temperatura do ar de saída média (°C)	27,94	26,63
Média URa – URsUD (%)	18,50	14,97
Média TsUD – Ta (°C)	4,02	3,65

FONTE: PRÓPRIA AUTORA.

TABELA B.3: RESUMO DE DADOS DOS EXPERIMENTOS COM A UNIDADE DESSECANTE 4

	Experimento 1	Experimento 2
Umidade relativa do ar ambiente média (%)	59,70	61,08
Umidade relativa do ar de saída média (%)	46,50	42,93
Temperatura do ar ambiente média (°C)	24,11	23,12
Temperatura do ar de saída média (°C)	27,72	27,26
Média URa – URsUD (%)	13,21	18,15
Média TsUD – Ta (°C)	3,61	4,14

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA B.4: RESUMO DE DADOS DOS EXPERIMENTOS COM A UNIDADE DESSECANTE

	Experimento 1	Experimento 2
Umidade relativa do ar ambiente média (%)	61,73	58,69
Umidade relativa do ar de saída média (%)	50,61	44,95
Temperatura do ar ambiente média (°C)	24,87	25,77
Temperatura do ar de saída média (°C)	27,82	29,91
Média URa – URsUD (%)	11,12	13,75
Média TsUD – Ta (°C)	2,95	4,14

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA B.5: RESUMO DE DADOS DOS EXPERIMENTOS COM A UNIDADE DESSECANTE 6

	Experimento 1	Experimento 2
Umidade relativa do ar ambiente média (%)	63,11	61,77
Umidade relativa do ar de saída média (%)	46,47	44,44
Temperatura do ar ambiente média (°C)	23,38	23,39
Temperatura do ar de saída média (°C)	26,61	27,76
Média URa – URsUD (%)	16,64	17,33
Média TsUD – Ta (°C)	3,23	4,37

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

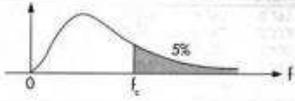
TABELA B.6: RESUMO DE DADOS DOS EXPERIMENTOS COM A UNIDADE DESSECANTE 7

	Experimento 1	Experimento 2
Umidade relativa do ar ambiente média (%)	60,88	60,96
Umidade relativa do ar de saída média (%)	43,22	46,03
Temperatura do ar ambiente média (°C)	22,99	24,69
Temperatura do ar de saída média (°C)	26,98	29,92
Média URa – URsUD (%)	17,66	14,93
Média TsUD – Ta (°C)	3,99	5,23

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

Apêndice C – Tabela teste F de Snedecor

Tabela VI – Distribuição F
Corpo da tabela dá os valores f_c tais que $P(F > f_c) = 0,05$.



Grau de liberdade do denominador de F: v_2	Grau de liberdade do numerador de F: v_1																				Grau de liberdade do denominador de F: v_2		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	15	16	18	20	24	30	40	60		120	∞
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,8	238,9	240,5	241,9	243,9	245,4	246,9	246,5	247,3	248,0	249,1	250,1	251,1	252,2	253,3	254,3	1
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,41	19,42	19,43	19,43	19,44	19,45	19,45	19,46	19,47	19,48	19,49	19,50	2
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,72	8,70	8,69	8,67	8,66	8,64	8,62	8,59	8,57	8,55	8,53	3
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,91	5,87	5,86	5,84	5,82	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,63	4
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,64	4,62	4,60	4,58	4,56	4,53	4,50	4,46	4,43	4,40	4,36	5
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,00	3,96	3,94	3,92	3,90	3,87	3,84	3,81	3,77	3,74	3,70	3,67	6
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,53	3,51	3,49	3,47	3,44	3,41	3,38	3,34	3,30	3,27	3,23	7
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,28	3,24	3,22	3,20	3,17	3,15	3,12	3,08	3,04	3,01	2,97	2,93	8
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,03	3,01	2,99	2,96	2,94	2,90	2,86	2,83	2,79	2,75	2,71	9
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,87	2,85	2,83	2,80	2,77	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54	10
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,79	2,74	2,72	2,70	2,67	2,65	2,61	2,57	2,53	2,49	2,45	2,40	11
12	4,73	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,69	2,64	2,62	2,60	2,57	2,54	2,51	2,47	2,43	2,38	2,34	2,30	12
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,60	2,55	2,53	2,52	2,48	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,25	2,21	13
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,53	2,48	2,46	2,44	2,41	2,39	2,35	2,31	2,27	2,22	2,18	2,13	14
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,42	2,40	2,39	2,35	2,33	2,29	2,25	2,20	2,16	2,11	2,07	15
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,37	2,35	2,33	2,30	2,28	2,24	2,19	2,15	2,11	2,06	2,01	16
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,34	2,31	2,29	2,26	2,23	2,19	2,15	2,10	2,06	2,01	1,96	17
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,29	2,27	2,25	2,22	2,19	2,15	2,11	2,06	2,02	1,97	1,92	18
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,26	2,23	2,22	2,18	2,16	2,11	2,07	2,03	1,98	1,93	1,88	19
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,28	2,22	2,20	2,18	2,15	2,12	2,08	2,04	1,99	1,95	1,90	1,84	20
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,25	2,20	2,18	2,16	2,12	2,10	2,05	2,01	1,96	1,92	1,87	1,81	21
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,23	2,17	2,15	2,13	2,10	2,07	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,78	22
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,20	2,15	2,13	2,11	2,08	2,05	2,01	1,96	1,91	1,86	1,81	1,76	23
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,18	2,13	2,11	2,09	2,05	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,79	1,73	24
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,16	2,11	2,09	2,07	2,04	2,01	1,96	1,92	1,87	1,82	1,77	1,71	25
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,15	2,09	2,07	2,05	2,02	1,99	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,69	26
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,13	2,08	2,06	2,04	2,00	1,97	1,93	1,88	1,84	1,79	1,73	1,67	27
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,12	2,06	2,04	2,02	1,99	1,96	1,91	1,87	1,82	1,77	1,71	1,65	28
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,10	2,05	2,03	2,01	1,97	1,94	1,90	1,85	1,81	1,75	1,70	1,64	29
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,09	2,04	2,01	1,99	1,96	1,93	1,89	1,84	1,79	1,74	1,68	1,62	30
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,00	1,95	1,92	1,90	1,87	1,84	1,79	1,74	1,69	1,64	1,58	1,51	40
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,92	1,86	1,84	1,81	1,78	1,75	1,70	1,65	1,59	1,53	1,47	1,39	60
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,17	2,09	2,02	1,96	1,91	1,83	1,77	1,75	1,72	1,69	1,66	1,61	1,55	1,50	1,43	1,35	1,25	120
∞	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	1,75	1,69	1,67	1,63	1,60	1,57	1,52	1,46	1,39	1,32	1,22	1,00	∞

Apêndice D – Informações dos experimentos realizados com os coletores solares 2 e 3

TABELA D.1: RESUMO DE DADOS DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS COM O COLETOR SOLAR 2

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
Umidade relativa do ar ambiente média (%)	32,94	32,75	34,70
Umidade relativa do ar de saída média (%)	16,81	18,95	20,32
Temperatura do ar ambiente média (°C)	44,44	44,44	39,76
Temperatura do ar de saída média (°C)	81,65	81,65	70,30
Média URa – URsC (%)	16,12	13,80	14,38
Média TsC – Ta (°C)	37,20	35,35	30,54

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA D.2: VALOR DA TEMPERATURA (°C) MÉDIA NO COLETOR SOLAR 2

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3	
		Data: 02/11/2020		Data: 15/11/2020		Data: 18/11/2020	
		Ta	TsC	Ta	TsC	Ta	TsC
0-60	10:00-11:00	43,29	81,37	38,21	72,09	37,44	68,66
60-120	11:00-12:00	44,59	82,79	40,24	77,07	38,82	70,26
120-180	12:00-13:00	45,49	85,32	42,35	79,97	40,96	73,11
180-240	13:00-14:00	44,40	77,18	44,07	77,16	41,78	69,18

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA D.3: VALOR DA UMIDADE RELATIVA (%) MÉDIA NO COLETOR SOLAR 2

Tempo do experimento (min)/	Hora do dia (h)	Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3	
		Data: 02/11/2020		Data: 15/11/2020		Data: 18/11/2020	
		URa	URsC	URa	URsC	URa	URsC
0-60	10:00-11:00	34,43	17,71	37,30	19,54	39,97	21,01
60-120	11:00-12:00	32,73	16,70	33,28	18,74	36,23	20,31
120-180	12:00-13:00	33,95	17,21	37,16	19,51	39,61	20,96
180-240	13:00-14:00	32,77	16,68	33,26	18,73	36,29	20,30

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA D.4: RESUMO DE DADOS DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS COM O COLETOR SOLAR 1.

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
Umidade relativa do ar ambiente média (%)	36,64	34,81	32,50
Umidade relativa do ar de saída média (%)	22,96	23,16	19,78
Temperatura do ar ambiente média (°C)	41,23	30,56	43,06
Temperatura do ar de saída média (°C)	63,24	67,55	67,54
Média URa – URsC (%)	13,67	11,65	12,72
Média TsC – Ta (°C)	22,01	23,00	24,48

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA D.5: VALOR DA TEMPRATURA (°C) MÉDIA NO COLETOR SOLAR 1.

Tempo do experimento (min)/	Hora do dia (h)	Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3	
		Data: 10/11/2020		Data: 14/11/2020		Data: 16/11/2020	
		Ta	TsC	Ta	TsC	Ta	TsC
0-60	10:00-11:00	39,35	59,82	41,76	62,05	39,29	58,54
60-120	11:00-12:00	40,32	62,29	43,29	67,24	43,23	68,87
120-180	12:00-13:00	42,66	67,60	46,38	73,09	45,34	73,70
180-240	13:00-14:00	42,56	63,22	46,71	67,82	44,35	69,03

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA D.6: VALOR DA UMIDADE RELATIVA (%) MÉDIA NO COLETOR SOLAR 1

Tempo do experimento (min)/	Hora do dia (h)	Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3	
		Data: 10/11/2020		Data: 4/11/2020		Data: 6/11/2020	
		URa	URsC	URa	URsC	URa	URsC
0-60	10:00-11:00	40,04	24,79	38,33	25,19	37,01	23,10
60-120	11:00-12:00	37,81	23,29	36,34	23,73	32,19	19,28
120-180	12:00-13:00	39,86	24,50	38,09	24,76	36,75	22,83
180-240	13:00-14:00	37,91	23,53	36,39	23,75	32,11	19,27

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

Apêndice E – Informações dos experimentos realizados no período primavera/verão em Campina Grande e em Pombal, PB

Campina Grande

TABELA E.1 - DADOS DE TEMPERATURA DO AR NO EXPERIMENTO ECG1sem (18 E 19/01/2021).

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Ta = TeCsem	TsCsem = TeKsem	TsKsem
0-60	08:00-09:00	27,5	34,2	30,6
60-120	09:00-10:00	28,9	39,8	35,2
120-180	10:00-11:00	33,7	45,8	41,8
180-240	11:00-12:00	34,1	46,7	42,6
240-300	12:00-13:00	36,0	49,3	42,3
300-360	13:00-14:00	35,7	49,6	42,6
360-420	14:00-15:00	34,5	51,0	42,1
420-480	15:00-16:00	34,0	45,3	36,4
480-540	08:00-09:00	26,4	35,8	30,4
540-600	09:00-10:00	29,2	44,7	35,7
600-660	10:00-11:00	31,1	48,6	43,6
660-720	11:00-12:00	34,8	50,2	43,2
720-780	12:00-13:00	36,8	51,4	42,1
780-840	13:00-14:00	34,6	44,8	36,1
840-900	14:00-15:00	35,0	52,3	44,6
900-960	15:00-16:00	32,6	41,3	33,4

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA E.2 - DADOS DE TEMPERATURA DO AR NO EXPERIMENTO NO ECG1com (18 E 19/01/2021)

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Ta = TeUD	TsUD = TeCcom	TsCcom = TeKcom	TsKcom
0-60	08:00-09:00	27,5	34,6	38,2	33,3
60-120	09:00-10:00	28,9	40,5	45,2	38,6
120-180	10:00-11:00	33,7	38,2	51,3	47,8
180-240	11:00-12:00	34,1	38,3	51,9	45,1
240-300	12:00-13:00	36,0	39,7	55,2	50,1
300-360	13:00-14:00	35,7	37,4	55,8	47,2
360-420	14:00-15:00	34,5	38,1	54,2	46,8
420-480	15:00-16:00	34,0	37,6	48,3	43,5
480-540	08:00-09:00	26,4	32,8	37,4	34,5
540-600	09:00-10:00	29,2	36,8	43,9	40,1
600-660	10:00-11:00	31,1	38,0	55,7	44,9
660-720	11:00-12:00	34,8	41,3	58,6	44,4
720-780	12:00-13:00	36,8	43,0	58,6	45,5
780-840	13:00-14:00	34,6	40,9	45,7	41,8
840-900	14:00-15:00	35,0	40,5	55,2	45,2
900-960	15:00-16:00	32,6	37,9	45,1	40,6

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA E.3 - DADOS DA UMIDADE RELATIVA DO AR NO EXPERIMENTO ECG1sem (18 E 19/01/2021).

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	URa = UReCsem	URsCsem = UReKsem	URsKsem
0-60	08:00-09:00	58,6	39,2	43,9
60-120	09:00-10:00	54,0	31,9	38,2
120-180	10:00-11:00	42,8	25,8	26,1
180-240	11:00-12:00	41,0	24,1	26,0
240-300	12:00-13:00	36,7	22,0	21,9
300-360	13:00-14:00	36,2	23,9	24,1
360-420	14:00-15:00	38,4	23,2	25,2
420-480	15:00-16:00	41,2	26,2	30,4
480-540	08:00-09:00	64,8	40,4	41,6
540-600	09:00-10:00	55,6	27,4	34,0
600-660	10:00-11:00	50,3	26,0	28,8
660-720	11:00-12:00	42,3	23,9	27,6
720-780	12:00-13:00	38,2	23,0	28,7
780-840	13:00-14:00	41,6	26,8	29,2
840-900	14:00-15:00	41,0	22,4	27,5
900-960	15:00-16:00	45,5	29,0	34,3

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA E.4 - DADOS DE UMIDADE RELATIVA DO AR NO EXPERIMENTO ECG1com (18 E 19/01/2021)

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	URa = UReUD	URsUD = UReCcom	URsCcom = UReKcom	URsKcom
0-60	08:00-09:00	58,6	39,6	33,4	46,1
60-120	09:00-10:00	54,0	31,1	26,7	38,5
120-180	10:00-11:00	42,8	32,7	21,2	28,2
180-240	11:00-12:00	41,0	31,8	19,4	29,7
240-300	12:00-13:00	36,7	29,3	17,9	25,7
300-360	13:00-14:00	36,2	31,8	19,8	27,0
360-420	14:00-15:00	38,4	31,2	19,2	27,4
420-480	15:00-16:00	41,2	32,1	20,2	31,2
480-540	08:00-09:00	64,8	46,8	33,1	45,6
540-600	09:00-10:00	55,6	38,3	24,8	37,1
600-660	10:00-11:00	50,3	33,2	23,4	31,5
660-720	11:00-12:00	42,3	25,9	22,6	31,3
720-780	12:00-13:00	38,2	24,0	22,1	30,1
780-840	13:00-14:00	41,6	27,2	24,9	33,6
840-900	14:00-15:00	41,0	24,2	21,7	30,5
900-960	15:00-16:00	45,5	30,9	23,9	35,0

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA E.5 - DECAIMENTO DA MASSA DA BANANA NOS EXPERIMENTOS ECG2com E ECG2sem

Data	20 e 21 /01/2021	ECG2com			ECG2sem		
a							
Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)
0	08:00	37,60	26,73	71,10	37,60	26,73	71,10
60	09:00	33,80	22,94	67,85	34,72	23,85	68,70
120	10:00	31,58	20,72	65,59	31,90	21,04	65,94
180	11:00	28,14	17,28	61,39	28,37	17,50	61,69
240	12:00	25,41	14,54	57,23	25,86	14,99	57,97
300	13:00	23,39	12,52	53,53	23,69	12,82	54,12
360	14:00	21,69	10,82	49,90	21,82	10,95	50,19
420	15:00	20,13	9,27	46,02	20,36	9,50	46,63
480	16:00	19,25	8,38	43,54	19,87	9,00	45,31
540	09:00	17,17	6,30	36,70	17,77	6,90	38,84
600	10:00	15,90	5,04	31,67	17,00	6,13	36,07
660	11:00	15,14	4,27	28,22	16,05	5,18	32,29
720	12:00	14,47	3,60	24,88	15,52	4,65	29,96
780	13:00	14,12	3,25	23,02	15,06	4,19	27,82
840	14:00	13,73	2,87	20,87	14,38	3,51	24,43
900	15:00	13,30	2,43	18,27	13,98	3,11	22,27
960	16:00	12,93	2,06	15,93	13,72	2,85	20,79

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA E.6 - DADOS DE TEMPERATURA DO AR NO EXPERIMENTO ECG2sem (20 E 21/01/2021)

Tempo do experimento (min)/	Hora do dia (h)	Ta = TeCsem	TsCsem = TeKsem	TsKsem
0-60	08:00-09:00	27,0	33,9	29,6
60-120	09:00-10:00	29,0	39,1	34,2
120-180	10:00-11:00	32,6	48,6	41,9
180-240	11:00-12:00	34,9	51,6	45,1
240-300	12:00-13:00	36,6	53,4	46,3
300-360	13:00-14:00	35,5	47,6	42,1
360-420	14:00-15:00	32,4	40,0	35,4
420-480	15:00-16:00	31,7	38,7	34,7
480-540	08:00-09:00	24,0	28,7	25,4
540-600	09:00-10:00	26,4	36,4	32,4
600-660	10:00-11:00	30,0	44,2	39,5
660-720	11:00-12:00	31,2	57,8	47,2
720-780	12:00-13:00	33,2	56,3	45,3
780-840	13:00-14:00	34,0	48,7	43,2
840-900	14:00-15:00	37,4	49,1	44,5
900-960	15:00-16:00	35,5	41,5	39,8

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA E.7 - DADOS DE TEMPERATURA DO AR NO EXPERIMENTO ECG2com (20 E 21/01/2021)

Tempo experimento (min)/	do	Hora do dia (h)	Ta = TeUD	TsUD = TeCcom	TsCcom = TeKcom	TsKcom
0-60		08:00-09:00	27,0	32,8	38,7	31,9
60-120		09:00-10:00	29,0	37,2	43,7	34,2
120-180		10:00-11:00	32,6	38,9	57,6	41,6
180-240		11:00-12:00	34,9	39,7	57,4	44,3
240-300		12:00-13:00	36,6	40,8	56,9	48,4
300-360		13:00-14:00	35,5	43,0	52,7	43,5
360-420		14:00-15:00	32,4	37,4	46,0	35,6
420-480		15:00-16:00	31,7	36,8	42,7	37,7
480-540		08:00-09:00	24,0	28,6	31,5	26,3
540-600		09:00-10:00	26,4	32,2	43,8	32,7
600-660		10:00-11:00	30,0	35,8	56,3	44,2
660-720		11:00-12:00	31,2	37,0	57,4	49,2
720-780		12:00-13:00	33,2	39,0	56,3	49,3
780-840		13:00-14:00	34,0	39,8	49,8	45,0
840-900		14:00-15:00	37,4	43,2	51,2	47,0
900-960		15:00-16:00	35,5	41,3	47,2	40,3

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA E.8 - DADOS DE UMIDADE RELATIVA DO AR NO EXPERIMENTO ECG2sem (20 E 21/01/2021)

Tempo do experimento (min)	do Hora do dia (h)	URa = UReCsem	URsCsem = UReKsem	URsKsem
0-60	08:00-09:00	64,4	44,3	54,5
60-120	09:00-10:00	56,7	34,0	44,3
120-180	10:00-11:00	47,6	25,4	31,3
180-240	11:00-12:00	41,0	23,1	27,2
240-300	12:00-13:00	37,7	22,5	24,9
300-360	13:00-14:00	38,0	24,5	27,1
360-420	14:00-15:00	44,4	30,1	35,9
420-480	15:00-16:00	45,8	31,0	36,2
480-540	08:00-09:00	79,3	64,2	66,2
540-600	09:00-10:00	68,3	34,6	46,0
600-660	10:00-11:00	54,3	24,1	29,4
660-720	11:00-12:00	48,7	21,5	27,4
720-780	12:00-13:00	43,6	22,1	26,7
780-840	13:00-14:00	43,6	24,1	29,4
840-900	14:00-15:00	37,2	22,9	21,7
900-960	15:00-16:00	39,9	28,2	29,9

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA E.9 - DADOS DE UMIDADE RELATIVA DO AR NO EXPERIMENTO ECG2com (20 E 21/01/2021)

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	URa = UReUD	URsUD = UReCcom	URsCcom = UReKcom	URsKcom
0-60	08:00-09:00	64,4	43,6	37,1	51,1
60-120	09:00-10:00	56,7	35,9	29,2	45,7
120-180	10:00-11:00	47,6	26,6	23,7	40,8
180-240	11:00-12:00	41,0	24,5	22,1	34,8
240-300	12:00-13:00	37,7	23,5	21,6	27,6
300-360	13:00-14:00	38,0	25,9	22,6	34,4
360-420	14:00-15:00	44,4	33,3	27,4	49,3
420-480	15:00-16:00	45,8	34,2	28,3	37,7
480-540	08:00-09:00	79,3	60,5	51,4	68,5
540-600	09:00-10:00	68,3	49,6	29,5	53,8
600-660	10:00-11:00	54,3	35,5	23,1	32,8
660-720	11:00-12:00	48,7	30,0	21,5	27,6
720-780	12:00-13:00	43,6	24,8	21,6	28,5
780-840	13:00-14:00	43,6	24,8	22,6	32,6
840-900	14:00-15:00	37,2	18,4	22,0	28,8
900-960	15:00-16:00	39,9	21,2	23,7	35,2

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

Pombal, PB

TABELA E.10 – DECAIMENTO DA MASSA DA BANANA NOS EXPERIMENTOS EPM1com E EPM1sem

Data 24 e 25 /01/2021		EPM1com			EPM1sem		
Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)
0	08:00	37,60	26,59	70,72	37,60	26,59	70,72
60	09:00	32,45	21,44	66,07	32,69	21,68	66,32
120	10:00	28,04	17,03	60,73	28,98	17,97	62,01
180	11:00	25,78	14,77	57,29	26,07	15,06	57,76
240	12:00	24,05	13,04	54,22	24,40	13,39	54,87
300	13:00	21,37	10,36	48,49	21,51	10,50	48,82
360	14:00	18,85	7,84	41,59	19,55	8,54	43,69
420	15:00	17,67	6,66	37,69	18,44	7,43	40,29
480	16:00	16,61	5,60	33,73	17,60	6,59	37,46
540	09:00	15,57	4,56	29,29	16,68	5,67	33,98
600	10:00	14,61	3,60	24,66	15,49	4,48	28,91
660	11:00	13,99	2,98	21,28	14,61	3,60	24,64
720	12:00	13,46	2,45	18,20	13,97	2,96	21,17
780	13:00	12,98	1,97	15,16	13,46	2,45	18,22
840	14:00	12,62	1,61	12,78	13,05	2,04	15,65
900	15:00	12,41	1,40	11,26	12,92	1,91	14,78
960	16:00	12,18	1,17	9,58	12,78	1,77	13,83

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA E.11 - DADOS DE TEMPERATURA DO AR NO EXPERIMENTO EPM1sem (24 E 25/01/2021).

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Ta = TeCsem	TsCsem = TeKsem	TsKsem
0-60	08:00-09:00	30,6	48,3	32,6
60-120	09:00-10:00	39,9	56,4	41,3
120-180	10:00-11:00	49,3	60,8	46,9
180-240	11:00-12:00	41,3	58,3	48,7
240-300	12:00-13:00	39,3	55,3	45,6
300-360	13:00-14:00	42,9	58,4	51,8
360-420	14:00-15:00	43,8	58,1	48,1
420-480	15:00-16:00	40,1	52,5	43,7
480-540	08:00-09:00	32,5	43,1	33,5
540-600	09:00-10:00	37,9	49,7	34,9
600-660	10:00-11:00	47,5	59,3	41,6
660-720	11:00-12:00	52,3	69,6	50,1
720-780	12:00-13:00	54,0	63,8	51,7
780-840	13:00-14:00	51,7	66,9	50,4
840-900	14:00-15:00	44,6	67,0	44,3
900-960	15:00-16:00	48,1	58,6	46,1

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA E.12 - DADOS DE TEMPERATURA DO AR NO EXPERIMENTO EPM1com (24 E 25/01/2021).

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Ta = TeUD	TsUD = TeCcom	TsCcom = TeKcom	TsKcom
0-60	08:00-09:00	30,6	35,6	43,6	33,7
60-120	09:00-10:00	39,9	45,3	58,4	43,3
120-180	10:00-11:00	49,3	55,1	66,8	49,7
180-240	11:00-12:00	41,3	46,9	63,5	52,3
240-300	12:00-13:00	39,3	45,4	59,2	48,3
300-360	13:00-14:00	42,9	49,7	67,3	55,8
360-420	14:00-15:00	43,8	50,9	62,3	50,5
420-480	15:00-16:00	40,1	47,5	59,3	45,7
480-540	08:00-09:00	32,5	37,6	48,4	36,2
540-600	09:00-10:00	37,9	43,3	53,3	39,5
600-660	10:00-11:00	47,5	53,3	63,4	48,3
660-720	11:00-12:00	52,3	57,9	75,7	53,9
720-780	12:00-13:00	54,0	60,1	78,3	55,5
780-840	13:00-14:00	51,7	58,6	74,3	55,2
840-900	14:00-15:00	44,6	51,7	68,2	49,2
900-960	15:00-16:00	48,1	55,5	58,6	47,7

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA E.13 - DADOS DE UMIDADE RELATIVA DO AR NO EXPERIMENTO EPM1sem (24 E 25/01/2021)

Tempo do experimento (min)	do Hora do dia (h)	URa = UReCsem	URsCsem = UReKsem	URsKsem
0-60	08:00-09:00	50,9	34,4	47,3
60-120	09:00-10:00	34,1	16,7	33,1
120-180	10:00-11:00	25,3	15,5	28,0
180-240	11:00-12:00	30,9	14,2	25,8
240-300	12:00-13:00	33,4	16,8	28,1
300-360	13:00-14:00	28,9	11,9	22,1
360-420	14:00-15:00	27,6	13,6	25,2
420-480	15:00-16:00	31,0	15,2	28,4
480-540	08:00-09:00	45,6	27,2	44,3
540-600	09:00-10:00	37,1	23,4	41,9
600-660	10:00-11:00	27,3	16,8	33,3
660-720	11:00-12:00	23,3	13,3	25,5
720-780	12:00-13:00	21,6	11,9	24,1
780-840	13:00-14:00	22,9	11,7	24,7
840-900	14:00-15:00	27,1	13,4	28,4
900-960	15:00-16:00	24,7	16,3	26,5

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA E.14 - DADOS DE UMIDADE RELATIVA DO AR NO EXPERIMENTO EPM1com (24 E 25/01/2021)

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	URa = UReUD	URsUD = UReCcom	URsCcom = UReKcom	URsKcom
0-60	08:00-09:00	50,9	36,4	29,7	46,2
60-120	09:00-10:00	34,1	18,7	14,8	32,0
120-180	10:00-11:00	25,3	18,1	12,7	27,3
180-240	11:00-12:00	30,9	17,0	13,4	25,0
240-300	12:00-13:00	33,4	20,1	15,2	27,5
300-360	13:00-14:00	28,9	14,7	11,5	23,1
360-420	14:00-15:00	27,6	15,3	12,4	25,3
420-480	15:00-16:00	31,0	18,1	14,1	28,2
480-540	08:00-09:00	45,6	33,5	23,8	40,5
540-600	09:00-10:00	37,1	26,1	20,2	36,1
600-660	10:00-11:00	27,3	17,8	13,9	28,7
660-720	11:00-12:00	23,3	14,7	12,7	24,6
720-780	12:00-13:00	21,6	11,5	9,3	23,5
780-840	13:00-14:00	22,9	12,9	8,0	23,5
840-900	14:00-15:00	27,1	16,1	9,5	26,1
900-960	15:00-16:00	24,7	13,0	9,2	26,6

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA E.15 - DECAIMENTO DA MASSA DA BANANA NOS EXPERIMENTOS EPM2com E EPM2sem

Data	27 e 28 /01/2021	EPM2com			EPM2sem		
a							
Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)
0	08:00	37,60	26,59	70,72	37,60	26,59	70,72
60	09:00	33,00	21,99	66,63	33,85	22,84	67,47
120	10:00	29,71	18,70	62,95	30,32	19,31	63,69
180	11:00	26,97	15,96	59,18	27,59	16,58	60,09
240	12:00	24,99	13,98	55,94	25,33	14,32	56,54
300	13:00	22,82	11,81	51,75	23,11	12,10	52,36
360	14:00	20,07	9,06	45,15	20,98	9,97	47,51
420	15:00	18,89	7,88	41,73	19,68	8,67	44,05
480	16:00	18,19	7,18	39,48	18,95	7,94	41,90
540	09:00	16,20	5,19	32,02	17,24	6,23	36,12
600	10:00	15,83	4,82	30,46	16,55	5,54	33,49
660	11:00	15,17	4,16	27,42	15,70	4,69	29,89
720	12:00	14,37	3,36	23,38	15,05	4,04	26,84
780	13:00	14,02	3,01	21,45	14,58	3,57	24,50
840	14:00	13,58	2,57	18,94	13,98	2,97	21,26
900	15:00	13,19	2,18	16,51	13,60	2,59	19,06
960	16:00	12,74	1,73	13,56	13,37	2,36	17,65

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA E.16 - DADOS DE TEMPERATURA DO AR NO EXPERIMENTO EPM2sem (27 E 28/01/2021)

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Ta = TeCsem	TsCsem = TeKsem	TsKsem
0-60	08:00-09:00	32,7	39,2	33,5
60-120	09:00-10:00	34,3	45,3	34,9
120-180	10:00-11:00	37,5	50,8	41,6
180-240	11:00-12:00	37,2	51,7	50,1
240-300	12:00-13:00	42,8	55,4	51,7
300-360	13:00-14:00	48,2	57,6	50,4
360-420	14:00-15:00	42,5	54,6	44,3
420-480	15:00-16:00	38,5	41,3	41,2
480-540	08:00-09:00	30,6	42,6	33,5
540-600	09:00-10:00	33,8	48,9	34,9
600-660	10:00-11:00	35,8	51,6	41,6
660-720	11:00-12:00	45,5	53,0	50,1
720-780	12:00-13:00	42,2	56,3	51,7
780-840	13:00-14:00	58,7	59,8	50,4
840-900	14:00-15:00	39,1	61,8	44,3
900-960	15:00-16:00	38,0	51,9	46,1

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA E.17 - DADOS DE TEMPERATURA DO AR NO EXPERIMENTO EPM2com (27 E 28/01/2021)

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Ta = TeUD	TsUD = TeCcom	TsCcom = TeKcom	TsKcom
0-60	08:00-09:00	32,7	37,5	40,6	36,2
60-120	09:00-10:00	34,3	39,7	56,6	39,5
120-180	10:00-11:00	37,5	43,3	58,6	48,3
180-240	11:00-12:00	37,2	42,9	59,7	53,9
240-300	12:00-13:00	42,8	48,9	61,4	55,5
300-360	13:00-14:00	48,2	55,0	64,3	55,2
360-420	14:00-15:00	42,5	49,6	61,0	49,2
420-480	15:00-16:00	38,5	45,9	47,9	47,7
480-540	08:00-09:00	30,6	35,7	45,9	36,2
540-600	09:00-10:00	33,8	39,2	56,3	39,5
600-660	10:00-11:00	35,8	41,6	59,7	48,3
660-720	11:00-12:00	45,5	51,2	61,4	53,9
720-780	12:00-13:00	42,2	48,3	65,2	55,5
780-840	13:00-14:00	58,7	65,5	67,8	55,2
840-900	14:00-15:00	39,1	46,3	68,3	49,2
900-960	15:00-16:00	38,0	45,4	52,3	47,7

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA E.18 - DADOS DE UMIDADE RELATIVA DO AR NO EXPERIMENTO EPM2sem (27 E 28/01/2021)

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	URa = UReCsem	URsCsem = UReKsem	URsKsem
0-60	08:00-09:00	46,3	34,7	44,3
60-120	09:00-10:00	43,1	31,0	41,9
120-180	10:00-11:00	36,8	22,9	33,3
180-240	11:00-12:00	36,7	22,4	25,5
240-300	12:00-13:00	31,1	21,8	24,1
300-360	13:00-14:00	25,7	20,8	24,7
360-420	14:00-15:00	28,4	21,2	28,4
420-480	15:00-16:00	32,5	25,4	26,5
480-540	08:00-09:00	52,5	31,9	36,1
540-600	09:00-10:00	45,3	24,7	30,5
600-660	10:00-11:00	41,2	22,7	31,2
660-720	11:00-12:00	30,0	22,2	27,6
720-780	12:00-13:00	32,9	21,6	24,1
780-840	13:00-14:00	20,6	21,0	24,7
840-900	14:00-15:00	32,9	20,5	28,4
900-960	15:00-16:00	33,3	23,2	26,5

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA E.19 - DADOS DE UMIDADE RELATIVA DO AR NO EXPERIMENTO EPM2sem (27 E 28/01/2021)

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	URa = UReUD	URsUD = UReCcom	URsCcom = UReKcom	URsKcom
0-60	08:00-09:00	46,3	36,8	30,6	48,3
60-120	09:00-10:00	43,1	32,5	26,4	47,1
120-180	10:00-11:00	36,8	27,0	18,4	36,8
180-240	11:00-12:00	36,7	28,1	17,7	31,4
240-300	12:00-13:00	31,1	21,0	16,4	29,6
300-360	13:00-14:00	25,7	19,2	14,2	30,7
360-420	14:00-15:00	28,4	21,8	15,2	31,4
420-480	15:00-16:00	32,5	25,4	22,6	35,4
480-540	08:00-09:00	52,5	40,3	25,6	39,2
540-600	09:00-10:00	45,3	34,4	20,2	36,9
600-660	10:00-11:00	41,2	31,7	17,6	35,4
660-720	11:00-12:00	30,0	21,4	16,4	33,2
720-780	12:00-13:00	32,9	23,3	14,3	30,0
780-840	13:00-14:00	20,6	15,1	13,1	34,1
840-900	14:00-15:00	32,9	23,3	15,3	38,2
900-960	15:00-16:00	33,3	21,6	16,4	36,4

FONTES: PRÓPRIA AUTORA

Apêndice F – Informações dos experimentos realizados no período outono/inverno em Campina Grande e em Pombal, PB

Campina Grande, PB

TABELA F.1 – DECAIMENTO DA MASSA DA BANANA NOS EXPERIMENTOS ECG3com E ECG3sem

Data	08 e 09 /03/2021	ECG3com			ECG3sem		
	01/05/2021						
Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)
0	08:00	37,60	26,18	69,63	37,60	26,18	69,63
60	09:00	34,25	22,83	66,65	34,37	22,95	66,77
120	10:00	31,63	20,21	63,89	31,86	20,44	64,15
180	11:00	28,43	17,01	59,84	29,17	17,75	60,85
240	12:00	25,53	14,11	55,27	26,83	15,41	57,44
300	13:00	23,84	12,42	52,10	25,22	13,80	54,72
360	14:00	22,34	10,92	48,89	24,05	12,63	52,52
420	15:00	21,41	9,99	46,66	23,31	11,89	51,01
480	16:00	20,86	9,44	45,26	22,75	11,33	49,81
540	09:00	19,05	7,63	40,04	20,82	9,40	45,16
600	10:00	18,04	6,62	36,68	19,72	8,30	42,09
660	11:00	17,04	5,62	32,99	18,75	7,33	39,08
720	12:00	16,38	4,96	30,28	17,80	6,38	35,85
780	13:00	15,38	3,96	25,76	17,28	5,86	33,92
840	09:00	14,94	3,52	23,58	16,05	4,63	28,86
900	10:00	14,54	3,12	21,44	15,61	4,19	26,84
960	11:00	14,37	2,95	20,55	15,30	3,88	25,38

1020	12:00	13,80	2,38	17,23	14,77	3,35	22,68
------	-------	-------	------	-------	-------	------	-------

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA F.2 - DADOS DE TEMPERATURA DO AR NO EXPERIMENTO ECG3sem (29 e 30/04/2021 E 01/05/2021)

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Ta = TeCsem	TsCsem = TeKsem	TsKsem
0-60	08:00-09:00	27,22	43,36	36,04
60-120	09:00-10:00	29,35	45,60	39,00
120-180	10:00-11:00	30,51	45,32	41,30
180-240	11:00-12:00	32,31	47,23	41,76
240-300	12:00-13:00	31,33	42,30	36,80
300-360	13:00-14:00	31,54	39,41	31,10
360-420	14:00-15:00	29,31	33,54	27,50
420-480	15:00-16:00	27,68	30,79	24,70
480-540	08:00-09:00	27,22	36,25	33,59
540-600	09:00-10:00	28,18	40,39	35,04
600-660	10:00-11:00	27,25	42,65	34,95
660-720	11:00-12:00	26,20	41,95	34,57
720-780	12:00-13:00	27,59	37,87	31,71
780-840	08:00-09:00	26,74	38,65	32,80
840-900	09:00-10:00	27,23	39,52	36,49
900-960	10:00-11:00	28,94	41,12	36,10
960-1020	11:00-12:00	30,60	43,50	39,50

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA F.3 - DADOS DE TEMPERATURA DO AR NO EXPERIMENTO ECG3com (29 E 30/04/2021 E 01/05/2021)

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Ta = TeUD	TsUD = TeCcom	TsCcom = TeKcom	TsKcom
0-60	08:00-09:00	27,22	31,27	46,98	37,39
60-120	09:00-10:00	29,35	31,69	55,23	45,08
120-180	10:00-11:00	30,51	34,34	56,80	47,56
180-240	11:00-12:00	32,31	37,13	59,32	49,20
240-300	12:00-13:00	31,33	34,49	46,32	42,59
300-360	13:00-14:00	31,54	33,62	45,58	40,69
360-420	14:00-15:00	29,31	32,14	36,25	36,11
420-480	15:00-16:00	27,68	30,19	30,92	30,32
480-540	08:00-09:00	27,22	31,19	42,09	36,25
540-600	09:00-10:00	28,18	31,47	42,99	39,48
600-660	10:00-11:00	27,25	32,82	46,02	40,20
660-720	11:00-12:00	26,20	31,88	43,65	38,24
720-780	12:00-13:00	27,59	29,08	41,02	36,93
780-840	08:00-09:00	26,74	28,34	39,92	33,58
840-900	09:00-10:00	27,23	30,94	44,52	38,59
900-960	10:00-11:00	28,94	32,68	55,38	43,58
960-1020	11:00-12:00	30,60	34,33	51,02	48,63

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA F.4 - DADOS DE UMIDADE RELATIVA DO AR NO EXPERIMENTO ECG3sem (29 E 30/04/2021 E 01/05/2021)

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	URa = UReCsem	URsCsem = UReKsem	URsKsem
0-60	08:00-09:00	64,62	34,24	43,10
60-120	09:00-10:00	58,26	24,44	33,70
120-180	10:00-11:00	54,71	21,04	30,20
180-240	11:00-12:00	49,48	20,56	30,70
240-300	12:00-13:00	47,23	25,90	31,90
300-360	13:00-14:00	49,28	30,66	35,60
360-420	14:00-15:00	54,66	42,68	42,60
420-480	15:00-16:00	58,88	52,63	55,80
480-540	08:00-09:00	65,81	36,11	46,30
540-600	09:00-10:00	62,65	33,97	40,80
600-660	10:00-11:00	75,81	33,72	42,70
660-720	11:00-12:00	87,45	37,56	43,70
720-780	12:00-13:00	88,80	46,67	52,60
780-840	08:00-09:00	63,43	34,10	52,10
840-900	09:00-10:00	58,26	30,20	38,60
900-960	10:00-11:00	54,71	25,51	32,90
960-1020	11:00-12:00	49,48	23,35	28,20

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA F.5 - DADOS DE UMIDADE RELATIVA DO AR NO EXPERIMENTO ECG3sem (29 E 30/04/2021 E 01/05/2021)

Tempo experimento (min)	do	Hora do dia (h)	URa = UReUD	URsUD = UReCcom	URsCcom = UReKcom	URsKcom
0-60		08:00-09:00	64,62	51,73	27,35	33,50
60-120		09:00-10:00	58,26	50,90	18,28	26,10
120-180		10:00-11:00	54,71	47,64	16,19	23,50
180-240		11:00-12:00	49,48	43,94	16,41	25,60
240-300		12:00-13:00	47,23	43,63	21,89	28,60
300-360		13:00-14:00	49,28	45,37	23,63	26,80
360-420		14:00-15:00	54,66	50,27	33,61	31,50
420-480		15:00-16:00	58,88	54,65	45,31	44,90
480-540		08:00-09:00	65,81	41,14	26,94	35,40
540-600		09:00-10:00	62,65	44,38	26,47	30,60
600-660		10:00-11:00	75,81	41,96	26,09	31,00
660-720		11:00-12:00	87,45	46,10	31,09	36,90
720-780		12:00-13:00	88,80	76,69	36,79	40,20
780-840		08:00-09:00	63,43	58,93	28,41	41,00
840-900		09:00-10:00	58,26	43,65	22,61	30,60
900-960		10:00-11:00	54,71	45,24	19,01	29,20
960-1020		11:00-12:00	49,48	45,21	16,02	25,00

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA F.6 - DECAIMENTO DA MASSA DA BANANA NOS EXPERIMENTOS ECG4com E ECG4sem

Data 08 e 09 /07/2021		ECG4com			ECG4sem		
Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)
0	08:00	37,60	25,76	68,51	37,60	25,76	68,51
60	09:00	34,36	22,52	65,54	34,92	23,08	66,09
120	10:00	30,89	19,05	61,67	31,25	19,41	62,12
180	11:00	27,97	16,13	57,67	28,35	16,51	58,24
240	12:00	25,57	13,73	53,69	26,66	14,82	55,59
300	13:00	24,03	12,19	50,73	25,20	13,36	53,02
360	14:00	22,63	10,79	47,67	23,89	12,05	50,43
420	15:00	21,68	9,84	45,38	23,06	11,22	48,65
480	16:00	20,28	8,44	41,62	22,23	10,39	46,74
540	09:00	19,14	7,30	38,15	21,52	9,68	44,99
600	10:00	18,03	6,19	34,32	20,02	8,18	40,86
660	11:00	17,39	5,55	31,93	18,83	6,99	37,13
720	12:00	16,22	4,38	27,02	18,24	6,40	35,10
780	13:00	15,50	3,66	23,63	17,23	5,39	31,30
840	14:00	15,02	3,18	21,15	16,85	5,01	29,73
900	15:00	14,32	2,48	17,30	16,35	4,51	27,60
960	16:00	13,81	1,97	14,29	15,76	3,92	24,87

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA F.7 - DADOS DE TEMPERATURA DO AR NO EXPERIMENTO ECG4sem (08 E 09/07/2021)

Tempo do experimento (min)/	Hora do dia (h)	Ta = TeCsem	TsCsem = TeKsem	TsKsem
0-60	08:00-09:00	25,60	46,06	35,49
60-120	09:00-10:00	28,75	54,88	42,41
120-180	10:00-11:00	28,75	53,46	44,84
180-240	11:00-12:00	29,84	53,71	44,98
240-300	12:00-13:00	30,51	52,45	43,14
300-360	13:00-14:00	30,43	47,41	40,86
360-420	14:00-15:00	29,09	39,81	35,76
420-480	15:00-16:00	27,34	31,94	30,37
480-540	08:00-09:00	24,25	35,22	31,25
540-600	09:00-10:00	27,75	39,68	33,63
600-660	10:00-11:00	29,04	43,63	35,39
660-720	11:00-12:00	30,89	47,31	40,13
720-780	12:00-13:00	31,68	48,94	39,87
780-840	13:00-14:00	31,52	47,34	38,61
840-900	14:00-15:00	32,71	46,38	40,12
900-960	15:00-16:00	30,69	49,93	41,52

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA F.8 - DADOS DE TEMPERATURA DO AR NO EXPERIMENTO ECG4com (08 E 08/07/2021)

Tempo experimento (min)/	do	Hora do dia (h)	Ta = TeUD	TsUD = TeCcom	TsCcom = TeKcom	TsKcom
0-60		08:00-09:00	25,60	29,08	49,61	38,82
60-120		09:00-10:00	28,75	31,80	57,01	47,78
120-180		10:00-11:00	28,75	31,30	59,12	50,54
180-240		11:00-12:00	29,84	33,21	56,69	49,96
240-300		12:00-13:00	30,51	30,92	54,89	47,45
300-360		13:00-14:00	30,43	30,71	49,03	44,89
360-420		14:00-15:00	29,09	34,74	43,17	39,63
420-480		15:00-16:00	27,34	33,31	35,51	32,84
480-540		08:00-09:00	24,25	30,59	42,19	35,61
540-600		09:00-10:00	27,75	31,23	45,32	33,69
600-660		10:00-11:00	29,04	33,69	48,63	40,29
660-720		11:00-12:00	30,89	36,87	53,61	43,27
720-780		12:00-13:00	31,68	39,34	54,20	46,31
780-840		13:00-14:00	31,52	38,72	50,32	39,67
840-900		14:00-15:00	32,71	38,69	54,63	42,78
900-960		15:00-16:00	30,69	37,64	53,91	46,21

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA F.9 - DADOS DE UMIDADE RELATIVA DO AR NO EXPERIMENTO ECG4sem (08 E 09/07/2021)

Tempo do experimento (min)	do Hora do dia (h)	URa = UReCsem	URsCsem = UReKsem	URsKsem
0-60	08:00-09:00	66,86	21,09	31,20
60-120	09:00-10:00	57,28	22,31	27,63
120-180	10:00-11:00	57,07	21,11	24,21
180-240	11:00-12:00	52,86	22,00	31,48
240-300	12:00-13:00	52,06	21,11	34,25
300-360	13:00-14:00	52,17	23,69	35,12
360-420	14:00-15:00	55,68	25,63	41,03
420-480	15:00-16:00	64,59	24,17	31,96
480-540	08:00-09:00	66,31	30,14	42,15
540-600	09:00-10:00	63,21	30,63	42,01
600-660	10:00-11:00	55,65	27,13	44,32
660-720	11:00-12:00	49,84	28,63	40,59
720-780	12:00-13:00	48,55	27,41	36,89
780-840	13:00-14:00	47,21	24,36	35,87
840-900	14:00-15:00	45,99	21,41	36,82
900-960	15:00-16:00	43,52	21,12	38,25

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA F.10 - DADOS DE UMIDADE RELATIVA DO AR NO EXPERIMENTO ECG4com (08 E 09/07/2021)

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	URa = UReUD	URsUD = UReCcom	URsCcom = UReKcom	URsKcom
0-60	08:00-09:00	66,86	50,01	19,89	26,31
60-120	09:00-10:00	57,28	39,77	19,12	25,87
120-180	10:00-11:00	57,07	41,82	17,11	29,63
180-240	11:00-12:00	52,86	42,25	16,93	31,25
240-300	12:00-13:00	52,06	44,31	20,07	33,47
300-360	13:00-14:00	52,17	45,25	17,33	34,87
360-420	14:00-15:00	55,68	32,49	18,20	32,96
420-480	15:00-16:00	64,59	38,05	16,23	33,12
480-540	08:00-09:00	66,31	49,52	29,34	35,47
540-600	09:00-10:00	63,21	45,15	27,03	30,29
600-660	10:00-11:00	55,65	43,89	20,87	29,87
660-720	11:00-12:00	49,84	38,62	19,70	31,26
720-780	12:00-13:00	48,55	36,98	19,87	32,69
780-840	13:00-14:00	47,21	36,58	20,32	32,40
840-900	14:00-15:00	45,99	39,68	21,19	33,12
900-960	15:00-16:00	43,52	36,98	21,63	29,96

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

Pombal, PB

TABELA F.11 – DECAIMENTO DA MASSA DA BANANA NOS EXPERIMENTOS EPM3com E EPM3sem

Data	23 e 25 /03/2021	EPM3com			EPM3sem		
a							
Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)
0	08:00	37,60	26,64	70,85	37,60	26,64	70,85
60	09:00	32,88	21,92	66,66	33,09	22,12	66,87
120	10:00	29,84	18,87	63,26	31,28	20,32	64,95
180	11:00	27,09	16,13	59,53	27,23	16,26	59,74
240	12:00	24,79	13,83	55,78	25,33	14,37	56,72
300	13:00	22,17	11,21	50,56	23,14	12,18	52,63
360	14:00	20,09	9,13	45,44	21,04	10,08	47,90
420	15:00	18,98	8,01	42,23	19,47	8,51	43,69
480	16:00	17,48	6,52	37,29	18,60	7,63	41,05
540	09:00	15,34	4,38	28,53	16,25	5,29	32,55
600	10:00	14,45	3,49	24,13	15,50	4,54	29,27
660	11:00	13,99	3,03	21,67	14,65	3,68	25,16
720	12:00	13,63	2,67	19,58	14,17	3,21	22,64
780	13:00	13,31	2,35	17,65	13,86	2,90	20,91
840	14:00	13,10	2,14	16,32	13,61	2,65	19,44
900	15:00	12,84	1,88	14,62	13,23	2,27	17,14
960	16:00	12,70	1,74	13,69	13,13	2,17	16,54

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA F.12 - DADOS DE TEMPERATURA DO AR NO EXPERIMENTO EPM3sem (23 E 25/03/2021).

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Ta = TeCsem	TsCsem = TeKsem	TsKsem
0-60	08:00-09:00	33,2	43,6	37,4
60-120	09:00-10:00	36,5	52,6	45,9
120-180	10:00-11:00	35,6	48,3	41,6
180-240	11:00-12:00	36,8	46,1	40,7
240-300	12:00-13:00	39,3	52,0	45,1
300-360	13:00-14:00	42,6	63,4	57,3
360-420	14:00-15:00	38,7	57,1	48,8
420-480	15:00-16:00	38,7	50,7	45,4
480-540	08:00-09:00	31,3	41,2	36,4
540-600	09:00-10:00	32,6	47,6	42,1
600-660	10:00-11:00	32,5	47,6	41,8
660-720	11:00-12:00	31,2	42,5	37,2
720-780	12:00-13:00	33,2	51,4	46,4
780-840	13:00-14:00	32,8	41,3	37,6
840-900	14:00-15:00	33,4	45,8	40,1
900-960	15:00-16:00	33,0	39,0	35,2

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA F.13 - DADOS DE TEMPERATURA DO AR NO EXPERIMENTO EPM3com (23 E 25/03/2021)

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Ta = TeUD	TsUD = TeCcom	TsCcom = TeKcom	TsKcom
0-60	08:00-09:00	33,2	35,0	48,6	42,1
60-120	09:00-10:00	36,5	40,4	57,2	47,1
120-180	10:00-11:00	35,6	40,1	56,3	45,0
180-240	11:00-12:00	36,8	42,1	55,3	45,0
240-300	12:00-13:00	39,3	43,6	59,8	49,0
300-360	13:00-14:00	42,6	47,8	68,7	57,1
360-420	14:00-15:00	38,7	44,6	65,0	54,6
420-480	15:00-16:00	38,7	44,0	57,1	49,9
480-540	08:00-09:00	31,3	34,9	52,2	42,0
540-600	09:00-10:00	32,6	37,7	59,2	47,4
600-660	10:00-11:00	32,5	37,5	57,6	47,8
660-720	11:00-12:00	31,2	35,1	51,0	43,4
720-780	12:00-13:00	33,2	39,5	57,1	51,7
780-840	13:00-14:00	32,8	39,6	49,0	44,4
840-900	14:00-15:00	33,4	39,8	50,1	47,4
900-960	15:00-16:00	33,0	37,2	44,7	43,1

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA F.14 - DADOS DE UMIDADE DO AR NO EXPERIMENTO EPM3sem (23 E25/03/2021)

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	URa = UReCsem	URsCsem = UReKsem	URsKsem
0-60	08:00-09:00	57,3	33,0	45,1
60-120	09:00-10:00	49,9	27,5	37,4
120-180	10:00-11:00	48,8	27,9	36,9
180-240	11:00-12:00	43,8	28,7	36,0
240-300	12:00-13:00	39,9	26,1	32,5
300-360	13:00-14:00	31,5	19,2	26,3
360-420	14:00-15:00	38,2	21,8	28,2
420-480	15:00-16:00	39,1	25,9	31,2
480-540	08:00-09:00	61,3	35,2	45,7
540-600	09:00-10:00	55,6	26,4	36,8
600-660	10:00-11:00	56,2	28,7	36,2
660-720	11:00-12:00	63,6	32,2	41,5
720-780	12:00-13:00	60,2	26,7	33,7
780-840	13:00-14:00	58,9	36,6	43,6
840-900	14:00-15:00	56,0	31,7	39,2
900-960	15:00-16:00	57,0	36,2	43,1

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

Tabela F.15 - DADOS DE UMIDADE RELATIVA DO AR NO EXPERIMENTO EPM3com (23 E 25/03/2021)

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	URa = UReUD	URsUD = UReCcom	URsCcom = UReKcom	URsKcom
0-60	08:00-09:00	57,3	45,9	26,3	37,7
60-120	09:00-10:00	49,9	42,3	21,3	32,7
120-180	10:00-11:00	48,8	41,0	22,3	33,3
180-240	11:00-12:00	43,8	36,6	23,1	32,4
240-300	12:00-13:00	39,9	34,5	20,1	29,2
300-360	13:00-14:00	31,5	26,7	13,9	22,8
360-420	14:00-15:00	38,2	32,9	15,8	23,5
420-480	15:00-16:00	39,1	33,5	19,2	27,1
480-540	08:00-09:00	61,3	51,7	25,3	36,8
540-600	09:00-10:00	55,6	50,1	20,3	30,3
600-660	10:00-11:00	56,2	48,9	20,5	29,9
660-720	11:00-12:00	63,6	56,8	25,8	35,2
720-780	12:00-13:00	60,2	53,9	19,4	27,8
780-840	13:00-14:00	58,9	53,0	30,3	36,2
840-900	14:00-15:00	56,0	50,5	24,4	31,7
900-960	15:00-16:00	57,0	51,2	30,4	35,7

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA F.16 - DECAIMENTO DA MASSA DA BANANA NOS EXPERIMENTOS EPM4com E EPM4sem

Dat	27 e 28 /03/2021	EPM4com			EPM4sem		
a							
Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)	Mt (g)	Ma (g)	Xt (%) (b.u)
0	08:00	37,60	26,64	70,85	37,60	26,64	70,85
60	09:00	33,25	22,28	67,03	33,91	22,95	67,67
120	10:00	29,20	18,24	62,46	31,37	20,41	65,06
180	11:00	26,74	15,78	59,00	28,07	17,10	60,94
240	12:00	23,91	12,95	54,16	25,33	14,36	56,72
300	13:00	22,01	11,05	50,20	23,81	12,85	53,97
360	14:00	20,79	9,83	47,28	21,73	10,77	49,56
420	15:00	18,08	7,12	39,37	20,69	9,73	47,02
480	16:00	17,21	6,25	36,31	19,44	8,48	43,61
540	09:00	15,76	4,79	30,42	17,88	6,91	38,68
600	10:00	14,83	3,87	26,08	16,45	5,49	33,37
660	11:00	13,98	3,02	21,60	15,68	4,72	30,08
720	12:00	13,51	2,55	18,88	14,96	4,00	26,74
780	13:00	13,31	2,35	17,66	14,47	3,51	24,27
840	14:00	12,91	1,95	15,12	13,97	3,01	21,53
900	15:00	12,47	1,51	12,07	13,35	2,38	17,86
960	16:00	12,09	1,13	09,32	13,13	2,17	16,53

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA F.17 - DADOS DE TEMPERATURA DO AR NO EXPERIMENTO EPM4sem (27 E 28/03/2021).

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	Ta = TeCsem	TsCsem = TeKsem	TsKsem
0-60	08:00-09:00	30,1	38,1	32,4
60-120	09:00-10:00	31,5	42,2	36,8
120-180	10:00-11:00	34,0	50,4	44,7
180-240	11:00-12:00	34,6	54,2	48,2
240-300	12:00-13:00	33,7	51,8	42,6
300-360	13:00-14:00	34,9	55,8	47,6
360-420	14:00-15:00	34,6	52,4	46,9
420-480	15:00-16:00	38,6	49,5	40,7
480-540	08:00-09:00	30,6	35,5	30,7
540-600	09:00-10:00	32,9	47,2	40,1
600-660	10:00-11:00	34,5	52,4	45,6
660-720	11:00-12:00	34,0	50,1	43,8
720-780	12:00-13:00	33,5	49,6	44,0
780-840	13:00-14:00	35,8	59,2	49,6
840-900	14:00-15:00	36,7	51,9	46,0
900-960	15:00-16:00	36,1	52,3	45,3

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA F.18 - DADOS DE TEMPERATURA DO AR NO EXPERIMENTO EPM4com (27 E 28/03/2021).

Tempo do experimento (min)	do	Hora do dia (h)	Ta = TeUD	TsUD = TeCcom	TsCcom = TeKcom	TsKcom
0-60		08:00-09:00	30,1	35,8	51,0	41,5
60-120		09:00-10:00	31,5	37,7	57,4	46,0
120-180		10:00-11:00	34,0	39,6	67,7	52,2
180-240		11:00-12:00	34,6	42,7	73,4	55,6
240-300		12:00-13:00	33,7	42,6	62,8	50,3
300-360		13:00-14:00	34,9	43,9	74,9	56,3
360-420		14:00-15:00	34,6	43,2	68,3	52,7
420-480		15:00-16:00	38,6	45,9	58,9	47,6
480-540		08:00-09:00	30,6	35,2	45,0	38,6
540-600		09:00-10:00	32,9	38,3	54,5	44,1
600-660		10:00-11:00	34,5	39,9	64,2	52,0
660-720		11:00-12:00	34,0	38,9	58,8	48,8
720-780		12:00-13:00	33,5	38,2	55,5	46,5
780-840		13:00-14:00	35,8	40,3	71,1	56,5
840-900		14:00-15:00	36,7	40,8	64,2	50,7
900-960		15:00-16:00	36,1	41,5	57,7	45,4

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA F.19 - DADOS DA UMIDADE RELATIVA DO AR NO EXPERIMENTO EPM4sem (27 E 28/03/2021)

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	URa = UReCsem	URsCsem = UReKsem	URsKsem
0-60	08:00-09:00	64,8	37,8	48,6
60-120	09:00-10:00	60,7	30,7	42,7
120-180	10:00-11:00	54,1	23,6	34,1
180-240	11:00-12:00	50,9	19,7	30,3
240-300	12:00-13:00	51,7	23,7	33,8
300-360	13:00-14:00	49,3	18,1	29,2
360-420	14:00-15:00	50,3	21,0	31,0
420-480	15:00-16:00	39,5	26,1	34,5
480-540	08:00-09:00	66,4	42,5	50,7
540-600	09:00-10:00	60,6	30,2	41,3
600-660	10:00-11:00	53,6	21,3	31,1
660-720	11:00-12:00	56,1	26,3	34,4
720-780	12:00-13:00	57,5	32,5	37,4
780-840	13:00-14:00	50,7	21,4	27,1
840-900	14:00-15:00	47,2	22,5	29,2
900-960	15:00-16:00	48,4	24,4	32,9

FONTE: PRÓPRIA AUTORA

TABELA F.20 - DADOS DE UMIDADE RELATIVA DO AR NO EXPERIMENTO EPM4com (27 E 28/03/2021)

Tempo do experimento (min)	Hora do dia (h)	URa = UReUD	URsUD = UReCcom	URsCcom = UReKcom	URsKcom
0-60	08:00-09:00	64,8	55,2	25,7	38,2
60-120	09:00-10:00	60,7	50,2	21,8	33,0
120-180	10:00-11:00	54,1	46,1	16,9	27,5
180-240	11:00-12:00	50,9	44,2	14,5	24,7
240-300	12:00-13:00	51,7	44,2	17,8	27,6
300-360	13:00-14:00	49,3	40,5	13,5	23,5
360-420	14:00-15:00	50,3	44,8	15,6	25,9
420-480	15:00-16:00	39,5	34,7	19,3	29,4
480-540	08:00-09:00	66,4	54,3	33,2	43,5
540-600	09:00-10:00	60,6	49,5	25,9	38,1
600-660	10:00-11:00	53,6	44,9	18,6	27,9
660-720	11:00-12:00	56,1	49,0	22,0	31,2
720-780	12:00-13:00	57,5	49,3	25,5	34,6
780-840	13:00-14:00	50,7	41,6	15,5	24,2
840-900	14:00-15:00	47,2	39,2	17,7	27,7
900-960	15:00-16:00	48,4	42,3	20,9	32,8

FONTE: PRÓPRIA AUTORA