



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE SECAGEM
PARA BENEFICIAMENTO DE CAULIM
USANDO ENERGIA SOLAR**

VITOR LEÃO SANTANA

CAMPINA GRANDE - PB

2022

VITOR LEÃO SANTANA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE SECAGEM
PARA BENEFICIAMENTO DE CAULIM
USANDO ENERGIA SOLAR**

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 Doutor em Engenharia de Processos.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo

CAMPINA GRANDE - PB

2022

S232d

Santana, Vitor Leão.

Desenvolvimento de um sistema de secagem para beneficiamento de caulim usando energia solar / Vitor Leão Santana. – Campina Grande, 2022.

168 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2022.

"Orientação: Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo".

Referências.

1. Desenvolvimento de Processos. 2. Energia Solar. 3. Secagem de Minérios. 4. Caulim. 5. Eficiência Energética. I. Grilo, Marcelo Bezerra. II. Título.

CDU 66.047:620.97(043)

VITOR LEÃO SANTANA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE SECAGEM
PARA BENEFICIAMENTO DE CAULIM
USANDO ENERGIA SOLAR**

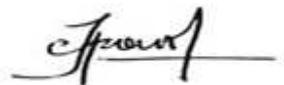
Tese de doutorado apresentada e avaliada em 24 de março de 2022, na Universidade Federal de Campina Grande, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos

Membros da Banca Avaliadora



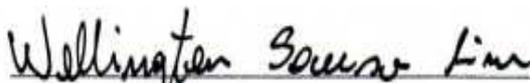
Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo

Orientador – UFCG/Campina Grande



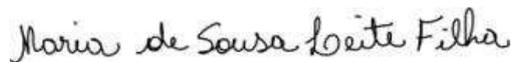
Prof. Dr. Júlio Cesar de Pontes

Examinador Externo - IFRN



Dr. Wellington Sousa Lima

Examinador Externo – UFCG/Campina Grande



Prof. Drª. Maria de Sousa Leite Filha

Examinadora Externa – UFCG/Pombal



Dr. Ítalo de Andrade Gomes

Examinador Externo - UEPB



Prof. Drª. Nancy Lima Costa

Examinadora Externa – UPE/Petrolina

AGRADECIMENTOS

Porque dEle, por Ele e para Ele são todas as coisas! Agradeço primeiramente a Deus pelo sustento, força e graça por ter conseguido chegar até aqui.

Aos meus pais, Rubem e Jamin pelo apoio incondicional nas minhas decisões e palavras de motivação. Por eles, eu nunca desisti!

Agradeço a minha irmã Camila, que sempre acreditou no meu sucesso.

Não posso esquecer de minha namorada, Rayanne, que sempre me apoiou, incentivou e me compreendeu em todos os momentos. O seu amor e cuidado foram importantes durante toda esta caminhada.

Gostaria de agradecer também de forma muito especial o meu orientador Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo, a quem tenho como um grande mestre e exemplo de professor, profissional, pessoa e vida. Ao longo dos últimos anos, foi a pessoa com quem compartilhei meus anseios, dúvidas, angústias e expectativas. Sempre encontrei uma palavra de conforto e abrigo.

Aos meus colegas do Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas. A união faz a força, e juntos conseguimos desenvolver ciência e tecnologia, contribuindo para o desenvolvimento da região. Vários alunos de graduação, mestrado e colegas de doutorado: todos determinados a produzir conhecimento e crescendo uns com os outros.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, em especial ao nosso coordenador Prof. Drº Antônio Gilson Barbosa Lima, pelas discussões e aprendizados. Suas aulas e ensinamentos abriram minha mente em conhecimento.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

A UFCG, por me abrigar ao longo dos últimos anos e investir em mim, sabendo que serei capaz de fazer a diferença na caminhada da vida.

“Com a força que Cristo me dá, posso enfrentar qualquer situação”

Carta do Apóstolo Paulo a igreja de Filipos, Cap. 4, vers. 13.

SANTANA, Vitor Leão. **Desenvolvimento de um sistema de secagem para beneficiamento de caulim usando energia solar**. 2022, 168p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos – Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande – PB, 2022.

RESUMO

A motivação desse trabalho foi o estudo da eficiência energética nas empresas que atuam na área de beneficiamento de caulim na região da Província Pegmatítica da Borborema (PPB), o diagnóstico apontou que a lenha era a fonte energética mais utilizada durante o processo de secagem do caulim. O objetivo dessa tese foi desenvolver um sistema de secagem, para o beneficiamento do caulim, usando energia solar como a fonte de energia predominante para minimizar o uso da lenha durante o processo de secagem. A metodologia utilizada consistiu em realizar o diagnóstico a partir de visitas às principais empresas beneficiadoras de caulim na região da PPB, na sequência, foram realizadas a caracterização dos dados do recurso solar e do ar ambiente disponível na região, no caso, a fonte de energia e o fluido de trabalho, usados no processo de secagem. Foi realizada a parceria com uma empresa da região, a INCOMGEL, localizada na cidade de Assunção - PB, onde foram realizados vários experimentos, e que acolheu as propostas de modificações, visando aumentar a eficiência do processo de secagem do caulim. Concomitantemente, foram realizados experimentos no Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas (LEMT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Neste trabalho foram apresentados os resultados de quatro experimentos, testando três sistemas de secagem solar diferentes: o primeiro, com cobertura de policarbonato; o segundo, com cobertura de polipropileno e o terceiro, um sistema de secagem solar natural, sem cobertura, que permitiram observar qual era o mais adequado para a secagem de caulim e também para obter a curva de cinética de secagem do caulim, bem como o rendimento térmico de cada sistema. Os resultados obtidos mostraram que o sistema com a cobertura de policarbonato foi o mais eficiente, com rendimento médio de 30,87%. Quanto à incidência da irradiação solar, a média registrada, no período de verão foi de 974,01 W/m², e no inverno de 604,51 W/m². Para o ar ambiente, a média de temperatura registrada no verão foi de 33°C, a umidade relativa média foi de 56%, a velocidade média do ar foi de 2,0 m/s. Essas informações foram utilizadas para propor mudanças na arquitetura, posicionamento e layout dos novos galpões, incluindo altura, posicionamento e tipo de cobertura. Foi proposto e dimensionado um sistema de geração de energia elétrica, utilizando painéis solares fotovoltaicos para serem utilizados no acionamento de ventiladores e sopradores industriais que contribuiu, através da convecção forçada do ar de secagem, para reduzir o tempo de secagem do caulim. As principais conclusões mostraram que a combinação da energia solar térmica e fotovoltaica, contribuíram para tornar mais eficiente o processo de secagem do caulim. A empresa objeto do estudo instalou 750 m² de painéis solares tornando-se auto suficiente na produção da energia elétrica utilizada em seu processo produtivo, tornando-se um modelo de gestão na área de eficiência energética na região.

Palavras-chave: Secagem de minérios. Energia solar. Caulim. Eficiência energética.

SANTANA, Vitor Leão. Development of a drying system for kaolin processing using solar energy. 2022, 168p. Thesis (Doctorate in Process Engineering) – Postgraduate Program in Process Engineering – Federal University of Campina Grande – UFCG, Campina Grande – PB, 2022.

ABSTRACT

The motivation of this work was the study of energy efficiency in companies that work in the area of kaolin processing in the region of the Pegmatitic Province of Borborema (PPB), the diagnosis pointed out that firewood was the most used energy source during the kaolin drying process. . The objective of this thesis was to develop a drying system for the processing of kaolin, using solar energy as the predominant energy source to minimize the use of firewood during the drying process. The methodology used consisted of carrying out the diagnosis from visits to the main kaolin processing companies in the PPB region, followed by the characterization of data on the solar resource and ambient air available in the region, in this case, the energy source and the working fluid, used in the drying process. A partnership was carried out with a company in the region, INCOMGEL, located in the city of Assunção - PB, where several experiments were carried out, and which welcomed the proposals for modifications, aiming to increase the efficiency of the kaolin drying process. At the same time, experiments were carried out at the Experimental Laboratory of Thermal Machines (LEMT) of the Federal University of Campina Grande (UFCG). In this work, the results of four experiments were presented, testing three different solar drying systems: the first, with a polycarbonate cover; the second, with a polypropylene covering and the third, a natural solar drying system, without covering, which allowed to observe which was the most suitable for drying kaolin and also to obtain the kaolin drying kinetics curve, as well as the thermal efficiency of each system. The results obtained showed that the system with the polycarbonate cover was the most efficient, with an average yield of 30.87%. As for the incidence of solar irradiation, the average recorded in the summer period was 974.01 W/m², and in winter it was 604.51 W/m². For ambient air, the average temperature recorded in the summer was 33°C, the average relative humidity was 56%, the average air speed was 2.0 m/s. This information was used to propose changes in the architecture, positioning and layout of the new sheds, including height, positioning and type of coverage. An electric power generation system was proposed and dimensioned, using photovoltaic solar panels to be used to drive industrial fans and blowers that contributed, through forced convection of drying air, to reduce the drying time of kaolin. The main conclusions showed that the combination of solar thermal and photovoltaic energy contributed to make the kaolin drying process more efficient. The company object of the study installed 750 m² of solar panels, making it self-sufficient in the production of electrical energy used in its production process, becoming a management model in the area of energy efficiency in the region.

Keywords: Ore drying; Solar energy; Kaolin; Energy efficiency.

LISTA DE FIGURAS

FIGURAS

Figura 1.1	Forno de secagem das tortas de caulim	27
Figura 1.2	Sistema de secagem utilizando lenha para secagem de caulim	30
Figura 1.3	Disposição do minério de caulim em galpão para futura secagem	30
Figura 1.4	Soprador convectivo utilizado para a secagem de tortas de caulim	31
Figura 2.1	Localização da Província Pegmatítica da Borborema (PPB)	36
Figura 2.2	Mapa da região do Seridó: em destaque, as cidades de Junco do Seridó/PB e Equador/RN	39
Figura 2.3	Principais aplicações industriais do caulim	40
Figura 2.4	Fluxograma típico do processo de beneficiamento do caulim adotado por pequenas empresas na PB e em RN	42
Figura 2.5	Fluxograma do processo de beneficiamento do caulim na empresa JPR Mineração	43
Figura 2.6	Tanques de decantação do caulim- Mineração A	44
Figura 2.7	Filtro prensa utilizado na confecção das tortas- Mineração B	45
Figura 2.8	Secagem de caulim em fornos à lenha- Mineração C	46
Figura 2.9	Curvas de Secagem	49
Figura 2.10	Fluxograma de classificação dos secadores	50
Figura 2.11	Protótipo de secadores solares de exposição direta - GEDS/ UFCG	54
Figura 2.12	Protótipo de secador solar de exposição indireta - GEDS/ UFCG	55

Figura 3.1	Parte da estrutura de secagem da empresa INCOMGEL	62
Figura 3.2	Projeto do secador solar proposto	64
Figura 3.3	Vista superior do secador solar	64
Figura 3.4	Posicionamento do sensor DHT22 no secador solar	67
Figura 3.5	Arduino mega utilizado no SMAD	68
Figura 3.6	Distribuição dos blocos na placa Arduino	69
Figura 3.7	Sistema de medição e aquisição de dados em sua caixa de proteção	70
Figura 3.8	Apresentação do <i>display</i> LCD	71
Figura 3.9	Apresentação do compartimento para inserção do cartão SD	71
Figura 3.10	Sensor DHT22 para leitura de temperatura e umidade relativa do ar	72
Figura 3.11	Intensidade média de irradiação solar medida em dois dias de experimento	74
Figura 3.12	Balança de precisão	75
Figura 3.13	Modelo de curva de secagem ajustada pelo modelo Page	77
Figura 3.14	Anemômetro digital utilizado no trabalho	81
Figura 3.15	Representação do volume de controle para o secador solar	82
Figura 4.1	Sistema de secagem utilizado na empresa A	89
Figura 4.2	Sistema de secagem utilizado na empresa B	89
Figura 4.3	Estrutura de secagem da empresa C	90
Figura 4.4	Estrutura recém-construída com cobertura de polipropileno	91
Figura 4.5	Corredor de maior circulação de ar na empresa JPR Mineração	92
Figura 4.6	Estrutura de secagem com utilização de prateleiras	93
Figura 4.7	Material seco em contato com material úmido	94
Figura 4.8	Distribuição de temperatura do ar ambiente na entrada e na saída dos secadores durante o Experimento1	99

Figura 4.9	Distribuição da umidade relativa do ar ambiente na entrada e na saída dos secadores durante o Experimento 1	100
Figura 4.10	Média das radiações durante o Experimento 1	101
Figura 4.11	Variação da massa de caulim em relação ao tempo no Experimento 1	103
Figura 4.12	Cinética de secagem do Experimento 1 para a secagem no secador com cobertura de policarbonato ajustada ao modelo de Page	104
Figura 4.13	Cinética de secagem do Experimento 1 para a secagem no secador com cobertura de polipropileno ajustada ao modelo de Page	104
Figura 4.14	Cinética de secagem do Experimento 1 para a secagem ao ar livre ajustada ao modelo de Page	105
Figura 4.15	Condições psicrométricas do ar no Experimento 1	106
Figura 4.16	Dados termodinâmicos do Experimento 1 obtidos pelo CATT	108
Figura 4.17	Distribuição de temperatura do ar ambiente na entrada e na saída dos secadores durante o Experimento 2	111
Figura 4.18	Distribuição da umidade relativa do ar ambiente na entrada e na saída dos secadores durante o Experimento 2	111
Figura 4.19	Média das irradiações durante o Experimento 2	112
Figura 4.20	Variação da massa de caulim em relação ao tempo no Experimento 2	114
Figura 4.21	Cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page, secador com cobertura de policarbonato (EXP2).	115
Figura 4.22	Cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page, secador com cobertura de polipropileno (EXP2)	116
Figura 4.23	Cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page, secagem ao ar livre (EXP2).	116
Figura 4.24	Condições psicrométricas do ar no Experimento 2	118
Figura 4.25	Dados termodinâmicos do Experimento 2 obtidos pelo CATT	120
Figura 4.26	Secador solar com diferentes coberturas no <i>solarium</i> LEMT	123

Figura 4.27	Distribuição de temperatura do ar ambiente na entrada e na saída dos secadores solares durante o Experimento 3	124
Figura 4.28	Distribuição de umidade relativa do ar ambiente na entrada e na saída dos secadores solares durante o Experimento 3	125
Figura 4.29	Média das irradiações durante o Experimento 3	126
Figura 4.30	Variação de massa de caulim em relação ao tempo no Experimento 3	128
Figura 4.31	Cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page, secador com cobertura de policarbonato (EXP3).	129
Figura 4.32	Cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page, secador com cobertura de polipropileno (EXP3)	129
Figura 4.33	Cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page, secagem ao ar livre (EXP3).	130
Figura 4.34	Condições psicrométricas do ar no Experimento 3	131
Figura 4.35	Dados termodinâmicos do Experimento 3 obtidos pelo CATT	133
Figura 4.36	Distribuição de temperatura do ar ambiente na entrada e na saída dos secadores durante o Experimento 4	136
Figura 4.37	Distribuição de umidade relativa do ar ambiente e na saída dos secadores solares durante o Experimento 4	137
Figura 4.38	Médias das irradiações durante o Experimento 4	138
Figura 4.39	Variação da massa de caulim em relação ao tempo no Experimento 4	140
Figura 4.40	Cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page, secador com cobertura de policarbonato (EXP4).	141
Figura 4.41	Cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page, secador com cobertura de polipropileno (EXP4)	141
Figura 4.42	Cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page, secagem ao ar livre (EXP4).	142
Figura 4.43	Condições psicrométricas do ar no Experimento 3	143
Figura 4.44	Dados termodinâmicos do Experimento 4 pelo CATT	145

Figura 4.45	Instalação do sistema fotovoltaico de energia	150
Figura 4.46	Pátio com recebimento de caulim com umidade	151
Figura 4.47	Novos sopradores de ar utilizados pela INCOMGEL	152
Figura 4.48	Área de secagem com cobertura de polipropileno após a inclusão das prateleiras	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Médias diárias de diferentes parâmetros medidos na INCOMGEL, em Assunção/PB	33
Tabela 3.1	Modelo de tabela de distribuição de temperatura e umidade do ar no secador	72
Tabela 3.2	Modelo de tabela utilizada para registrar os dados de massa	75
Tabela 3.3	Modelo matemático empregado para ajustes dos dados de secagem	77
Tabela 3.4	Resultados de rendimento térmico, quantidade de água retirada e CEE para o Experimento	85
Tabela 4.1	Dados para dimensionamento de painéis fotovoltaicos para o soprador	96
Tabela 4.2	Dados de massa obtidos no Experimento 1	102
Tabela 4.3	Valores de energia consumida, teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia no Experimento 1 para cada situação	110
Tabela 4.4	Resultados de rendimento térmico, taxa de evaporação e CEE para o Experimento 1	110
Tabela 4.5	Dados de massa obtidos no Experimento 2	113
Tabela 4.6	Valores de energia consumida, teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia no Experimento 2 para cada situação	122
Tabela 4.7	Resultados de rendimento térmico, quantidade de água retirada e CEE para o Experimento 2	122
Tabela 4.8	Dados de massa obtidos no Experimento 3	127
Tabela 4.9	Valores de energia consumida, teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto e consumo específico de energia no Experimento 3 para cada situação	135

Tabela 4.10	Resultados de rendimento térmico, quantidade de água retirada e CEE para o Experimento 3	135
Tabela 4.11	Dados de massa obtidos no Experimento 4	139
Tabela 4.12	Valores de energia consumida, teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia no Experimento 4 para cada situação	147
Tabela 4.13	Resultados de rendimento térmico, quantidade de água retirada e CEE para o Experimento 4	147
Tabela 4.14	Resumo dos principais resultados obtidos a partir dos experimentos	148

NOMENCLATURA

A_1	Área de cobertura transparente	[m ²]
A_2	Área da secção transversal da chaminé	[m ²]
c_p	Calor específico do fluido de trabalho	[J/kg°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; ($h = u + pv$)	[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]
L	Comprimento da placa	[m]
$m_{H_2O_i}$	Massa de água contida no produto antes do processo de secagem	[kg]
$m_{H_2O_f}$	Massa de água contida no produto depois do processo de secagem	[kg]
m_{H_2O}	Massa de água contida no produto	[kg]
m_{ms}	Massa de matéria seca	[kg]
m_{msi}	Massa inicial de matéria seca	[kg]
m_{msf}	Massa final de matéria seca	[kg]
m_{ti}	Massa inicial total do produto	[kg]
m_t	Massa total do produto	[kg]
$m_{inicial}$	Massa inicial do produto	[kg]
m_{final}	Massa final do produto	[kg]
$m_{total\ água}$	Massa total de água presente no produto a ser seco	[kg]
\dot{m}	Vazão mássica do fluido de trabalho	[kg/s]

\dot{m}_e	Vazão mássicas instantâneas na entrada do volume de controle	[kg/s]
\dot{m}_s	Vazão mássicas instantâneas na saída do volume de controle	[kg/s]
\dot{m}_{va}	Massa de água retirada do produto no período de tempo	[kg/s]
n	Número de verificações (medições)	
\dot{Q}_{vc}	Taxa de transferência de calor ao longo da fronteira (superfície de controle) do volume de controle	[J/s]
q	Fluxo de calor na placa (telha)	[W/m ²]
\overline{Rad}	Irradiação solar média	[W/m ²]
RU	Razão de umidade	[adim]
UR	Umidade relativa	[%]
$T_{t+\Delta t}$	Temperatura num instante $t + \Delta t$	[K]
ΔT	Diferença de temperatura	[K]
T	Temperatura	[°C]
\bar{T}	Temperatura média (parâmetros concentrados)	[°C]
T_t	Temperatura num instante t	[°C]
t	Tempo	[s]
t_i	Tempo inicial	[h]
t_f	Tempo final	[h]
X	Teor de água (base seca)	[decimal]
X_e	Teor de água de equilíbrio (base seca)	[decimal]
X_0	Teor de água inicial (base seca)	[decimal]
X_{bsi}	Teor de umidade inicial (base seca)	[decimal]
X_{bsf}	Teor de umidade final (base seca)	[decimal]
X_{bu}	Teor de umidade (base úmida)	[decimal]
X_{bs}	Teor de umidade (base seca)	[decimal]
V	Volume	[m ³]
x	Coordenada cartesiana	[m]
y	Coordenada cartesiana	[m]
\dot{W}_{vc}	Taxa de transferência de trabalho ao longo da fronteira (superfície de controle) do volume de controle	[J/s]

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIE	Agência Internacional de Energia
BM	Banco Mundial
CEE	Consumo Específico de Energia
CEEI	Centro de Engenharia Elétrica e Informática
COP	Conferência das Partes
GEDS	Grupo de Pesquisa em Energia e Desenvolvimento Sustentável
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel internacional sobre mudanças climáticas)
LEIAM	Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas
LEMT	Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i> (Painel de Fibra de Média Densidade)
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PB	Paraíba
PPB	Província Pegmatítica da Borborema
RU	Razão de Umidade
SMAD	Sistema de Medição e Aquisição de Dados
UAEE	Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
UFMG	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)

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	Objetivos	25
1.1.1	Objetivo geral	25
1.1.2	Objetivos específicos	26
1.2	Justificativa do tema	27
1.2.1	Diagnóstico do setor de secagem de torta de caulim na região PPB	28
1.2.2	Potencial energético da região e suas possíveis aplicações	32

CAPÍTULO II - REFERENCIAIS TEÓRICOS

2	REFERENCIAIS TEÓRICOS	35
2.1	Geologia Regional	35
2.2	O caulim	37
2.2.1	Caulim primário	37
2.2.2	Caulim secundário	38
2.2.3	Caulins na Província Pegmatítica da Borborema (PPB)	38
2.3	Principais propriedades da caulinita	39
2.4	Principais aplicações	40
2.5	Lavra e beneficiamento de caulins na PPB	41
2.6	Radiação solar	46
2.6.1	Utilização da energia solar	46
2.7	Princípios da secagem	48

2.7.1	Tipos de secadores	50
2.7.2	Secadores solares	51
2.8	Estado da arte sobre secador solar no Brasil	52
2.8.1	Secador solar de exposição direta	53
2.8.2	Secador solar de exposição indireta	54
2.9	O sol como fonte de energia	56
2.9.1	Energia solar fototérmica	58
2.9.2	Energia solar fotovoltaica	58

CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS

3	MATERIAIS E MÉTODOS	61
3.1	Localização dos experimentos	61
3.1.1	Posicionamento dos secadores	63
3.2	Descrição do secador solar utilizado nos testes	63
3.3	Materiais utilizados na construção do secador	64
3.4	Sistema de mediação e aquisição de dados (SMAD)	66
3.4.1	O Arduino e suas características	67
3.4.2	Medição da energia solar	73
3.5	O processo de secagem	74
3.5.1	Determinação das curvas de secagem	76
3.6	Análise energética de desempenho	78
3.6.1	Cálculo do rendimento térmico a partir do balanço energético	78
3.6.1.1	Conceitos termodinâmicos	78
3.6.1.2	Conservação da massa	79
3.6.1.3	Cálculo do rendimento térmico do secador pela primeira lei da termodinâmica	79

3.6.1.4	Cálculo da eficiência pela Primeira Lei da Termodinâmica	82
3.6.1.5	Cálculo da quantidade de massa de água retirada por experimento	84
3.6.1.6	Cálculo do consumo específico de energia (CEE) dos processos de secagem	85

CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	87
4.1	Propostas de modificações	87
4.1.1	Mudanças estruturais	87
4.1.2	Posicionamento das estruturas e futuras construções	92
4.1.3	Disposição do material	93
4.1.4	Utilização de coberturas mais eficientes	94
4.1.5	Utilização da energia solar para transformação em energia elétrica	95
4.1.6	Dimensionamento e posicionamento correto dos sopradores de ar	96
4.2	Análise experimental	97
4.2.1	Experimento 1 (E1), realizado nos dias 4 e 5 de novembro de 2020	98
4.2.2	Experimento 2 (E2), realizado nos dias 09 e 10 de dezembro de 2020	110
4.2.3	Experimento 3 (E3), realizado em 14 e 15 de julho de 2021	122
4.2.4	Experimento 4 (E4), realizado em 03 e 04 de agosto de 2021	136
4.3	Análise dos resultados experimentais	149
4.6	Propostas de modificações já implementadas	149
	CONCLUSÕES	155
	REFERÊNCIAS	157
	APÊNDICES	163

Capítulo I
INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da humanidade vem acompanhado da evolução e utilização das fontes naturais de energia. Elas se dão desde a descoberta do fogo, favorecendo a fixação de sua moradia em cavernas e a convivência em comunidades, passando pelo aproveitamento da energia dos ventos como força motora nas navegações e moinhos e, mais recentemente, da água na geração de energia elétrica, entre outros.

Com o passar dos anos, a energia começa a ser um dos principais vetores do desenvolvimento econômico mundial. Grilo *et al.* (2007) afirmam que a energia é um insumo fundamental do processo produtivo de bens e serviços, além de contribuir para aumentar o bem-estar da população na medida em que lhes proporciona conforto térmico, iluminação, mobilidade, comunicação, entre outros benefícios.

A evolução tecnológica levou o homem a um consumo cada vez maior de energia e recursos naturais em todas as formas disponíveis, cujo crescimento exponencial iniciou-se com a Revolução Industrial. Este crescimento de consumo energético não dá sinais de que possa diminuir, contribuindo para uma matriz energética amplamente baseada nos combustíveis fósseis, com uso intensivo de gás natural e derivados de petróleo.

Sabe-se que as reservas dessas fontes de energia são finitas e, quando consideradas as reservas conhecidas e o ritmo de crescimento de seu consumo, nota-se uma elevação considerável nos seus preços, o que acaba por incentivar o surgimento de políticas de substituição das fontes energéticas de origem fóssil por fontes renováveis.

O relatório apresentado pela Organização das Nações Unidas (ONU) durante a COP-26 (26ª Conferência das Nações Unidas sobre mudanças do clima, realizada em 2021 na cidade de Glasgow na Escócia) mostra que o caminho para o desenvolvimento sustentável passa pela utilização de vetores energéticos renováveis, que agridam menos o meio ambiente e tenham baixos índices de emissão de carbono. Dentre os destaques, temos a energia eólica e a energia solar com alto potencial de crescimento nos próximos anos.

No mundo pós-moderno, a utilização de energias renováveis, principalmente de origem solar e eólica, ganha cada vez mais prestígio e protagonismo na matriz energética de países e de setores produtivos importantes da humanidade.

Nos países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), já existe o incentivo para o uso de energias classificadas como “limpas”, ou renováveis e de baixo impacto ambiental como, por exemplo, energia eólica e energia solar; por isso, são cada vez mais concedidos incentivos públicos para realização de investimentos nessas fontes de energia (Tiepolo E Júnior, 2014).

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

Colocar o conhecimento científico a serviço do desenvolvimento sustentável da humanidade, respeitando os recursos naturais e privilegiando a eficiência energética, deve ser a meta do pesquisador moderno; principalmente, em países como o Brasil, com recursos energéticos renováveis disponíveis e necessidade de crescimento para propiciar seu desenvolvimento.

No anseio de possibilitar um maior desenvolvimento regional e em atenção a essa nova ordem mundial que privilegia ações de desenvolvimento sustentável, este trabalho tem como objetivo apresentar um conjunto de estudos para disseminar a utilização de novas tecnologias no processo de beneficiamento na indústria do caulim na Província Pegmatítica da Borborema (PPB), com foco especial no processo de secagem do caulim que, atualmente, utiliza tecnologias de baixa eficiência energética, com uso intensivo de lenha como sua principal fonte de energia.

Segundo Costa (2007), a secagem no âmbito industrial é definida como a operação pela qual é retirada a umidade contida em diversos materiais. Sua aplicação se dá tanto para o acabamento final ou para o equilíbrio da umidade própria de diversos materiais processados com o ar ambiente (madeira, celulose, couros, plásticos), como também para a melhor conservação, tendo como exemplo o caso de cereais e alimentos perecíveis.

A secagem é uma operação de transferência de calor e massa e, por meio dela, ocorre a redução do teor de água do produto, mediante o fornecimento de energia. Para tanto, o controle do processo de secagem e o conhecimento do mecanismo do movimento da água no produto são fundamentais uma vez que, com dados de simulação ou análise experimental, poderão se obter condições ótimas no processo, minimizando as perdas e reduzindo o consumo de energia.

Prakash *et al.* (2013) informam que, na mineração, a operação de secagem é um processo presente no beneficiamento de diversos minerais. A separação de partículas a úmido, em forma de polpa, é realizada por diversos equipamentos como peneiras, hidrociclones, células de flotação e tanques de decantação. A etapa de secagem da polpa do caulim está inserida dentro do processo de beneficiamento deste mineral.

O caulim, para obedecer à legislação atualmente vigente no Brasil, deve apresentar um teor de umidade inferior a 5%. Para atingir este índice e estar em conformidade com as normas, a etapa de secagem deve ser energeticamente executada de modo eficiente e ser economicamente viável para contribuir na promoção do desenvolvimento sustentável, além de garantir um produto final com elevado padrão de qualidade.

Atualmente, a secagem do caulim, em geral e na região da Província Pegmatítica Borborema (PPB) em particular, é realizada de duas formas: a) secagem solar ao ar livre, através da secagem resultante da exposição direta do caulim à irradiação solar; e b) secagem do caulim em fornos à lenha. Em alguns casos, na região da PPB, para complementar ou acelerar a operação de secagem, também é utilizado sopradores, acionados por eletricidade, que sopram o ar ambiente diretamente sobre a carga de caulim, já desidratada, realizando um processo de secagem a um teor mais baixo e adequado para as próximas etapas de beneficiamento mineral.

Nesse estudo a escolha do setor mineral — em particular, o beneficiamento de caulim — decorre da sua importância no cenário econômico do Nordeste brasileiro, principalmente na região da PPB, entre os estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.

Assim, este trabalho pretende estimular a utilização de novas tecnologias nos processos de secagem de minérios que viabilizem a comercialização de um produto de boa qualidade, com elevado poder econômico agregado, reduzindo os custos e o tempo de produção.

A utilização do sistema de secagem solar terá como finalidade reduzir o uso da lenha como energético primário, contribuindo para uma maior eficiência energética na etapa produtiva, acarretando uma melhor qualidade do produto e um menor custo de produção, além de contribuir para o desenvolvimento regional sustentável.

1.1 OBJETIVOS

1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema de secagem solar para beneficiamento do caulim, na região da Província Pegmatítica da Borborema (PPB), em substituição ao atual sistema de secagem em fornos com queima de lenha, visando melhorar a eficiência energética do processo e contribuir para uma produção de caulim mais sustentável.

1.1.1 Objetivos específicos

- Realizar um diagnóstico por meio de visitas técnicas do setor de secagem de caulim, na região da PPB, para identificar os principais problemas associados à baixa eficiência do processo de secagem, resultante do uso intensivo de lenha como fonte de energia térmica;
- Medir as condições predominantes do ar ambiente, na região da PPB (temperatura ambiente média, umidade relativa do ar média, direção e velocidade do ar média) em estações distintas (verão x inverno) e propor novas estratégias de posicionamento, layout, tipo de cobertura e

demais características construtivas das edificações onde ocorrem o processo de armazenamento e secagem do caulim;

- Realizar testes, na INCOMGEL e na UFCG (campus Campina Grande), em modelos de secadores solares, para analisar a influência dos principais elementos envolvidos no processo de secagem do caulim e para obter a cinética de secagem do caulim;

- Realizar experimentos com secagem de caulim, na INCOMGEL e na UFCG, para três sistemas de secagem solar (a céu aberto e em dois secadores idênticos, sendo um com cobertura de policarbonato e outro com cobertura de polipropileno) e comparar os resultados obtidos para: rendimento térmico (η_{secador}); taxa de retirada de água no caulim ($\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$); e consumo específico de energia (CEE);

- Projetar um sistema, à base da energia solar fotovoltaica, que atenda à demanda de energia elétrica necessária para acionar o soprador de ar que injeta ar de secagem diretamente sobre o caulim a ser seco.

1.2 JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DO TEMA

Um dos maiores problemas observados no setor de mineração do caulim, na região da PPB, na Paraíba e no Rio Grande do Norte, é a utilização intensiva da queima de lenha como principal recurso energético para a secagem nos fornos. Essa escolha resulta no desmatamento ambiental e poluição atmosférica, além de baixa eficiência do processo de beneficiamento.

Como a região possui um ambiente meteorológico apropriado para aproveitamento do recurso solar e eólico, incluindo elevada incidência de radiação solar com grande número de horas de sol diário, reduzida pluviosidade, ar ambiente com baixa umidade relativa do ar praticamente durante todas as estações do ano, observou-se o potencial de exploração desse tema. O desafio é colocar o conhecimento técnico e científico disponível no desenvolvimento de técnicas capazes de empregar fontes de energias sustentáveis em substituição ao uso da lenha como fonte principal de energia.

Uma amostragem do modelo atual de secagem do caulim, na região da PPB, é apresentada na Figura 1.1, onde é possível identificar poluição atmosférica, queima de lenha e ambiente de trabalho carente de padrões de eficiência laboral.

Figura 1.1 - Forno de secagem das tortas de caulim.



Fonte: Próprio Autor.

Foi observado a necessidade de atuar no diagnóstico da situação atual e a partir dele propor mudanças, tanto estruturais como processuais, que pudessem ser efetivamente implementadas, gerando melhorias na eficiência do processo.

Sabe-se que a PPB é uma região de dificuldade de investimentos e necessidade de melhorias mais profundas, por questões tanto econômicas como culturais. Daí a preocupação em entender o contexto social da região, propor soluções de viabilidade técnica e econômica para que se agreguem valor ao processo de beneficiamento de caulim da região.

1.2.1 DIAGNÓSTICO DO SETOR DE SECAGEM DE TORTA DE CAULIM NA REGIÃO DA PPB

A partir das visitas realizadas nas etapas iniciais desse trabalho, observou-se que a situação atual da etapa de secagem do caulim, na região da PPB, é fruto de uma herança cultural local e diretamente relacionada à sequência da administração das empresas da região. A maioria das pequenas unidades de beneficiamento são microempreendimentos familiares, agem sem a devida instrução e acompanhamento técnico qualificado, e terminam por manter as mesmas técnicas rudimentares de beneficiamento mineral.

Como pôde ser observado a partir dessas visitas e com conversas de trabalhadores locais, o senso de preocupação ambiental também não se faz presente, sendo poucos os empresários da região que estão atentos em minimizar os impactos ambientais. Somado a isso, observam-se falhas na fiscalização ambiental e mineral, tornando a exploração e beneficiamento do caulim uma atividade sem muita eficiência e produtividade.

Outro ponto relevante é a falta de investimentos para otimização e melhoria dos processos de beneficiamento de caulim. Não há incentivos governamentais e os produtores convivem com a variação constante pela demanda do produto, gerando grande flutuação nos preços da *commodity*.

Vale destacar também que a região possui um alto índice de intensidade de radiação solar. Isto é um ponto extremamente positivo; porém gera, nos empreendedores locais, a sensação de que a etapa de secagem realizada apenas com exposição direta ao sol, ou em estruturas já existentes na região, é a mais vantajosa visto o custo relacionado à adição de novas estruturas. Outro ponto é que esta irradiação solar é a principal fonte de energia para o processo de secagem, porém só é utilizada na forma térmica.

O tempo gasto na etapa de secagem do caulim, atualmente, na região, dura entre 3 e 4 dias, sem a utilização de lenha. Durante a noite, o caulim começa a sofrer um processo de reumidificação e absorve parte da umidade do ar, pois está exposto ao ar livre e sujeito a essa condição.

Para suprir a demanda alta em alguns momentos, os empreendimentos da região utilizam a lenha como combustível nos seus sistemas de secagem. Tal ação resulta num tempo menor de secagem (1 a 2 dias), porém impacta de maneira muito negativa o meio ambiente. A exploração e manejo dessa lenha, na maioria das vezes, é de forma ilegal, sendo retirada da vegetação nativa sem um manejo adequado. Tal trabalho tem também o intuito de resolver essa problemática.

Os sistemas de secagem usados da região da PPB são constituídos, basicamente, de duas estruturas:

- Tablados e pisos construídos para a exposição direta ao sol e ao vento, sendo que, à noite, são cobertos com lonas para evitar a reumidificação do produto devido a possíveis intempéries, como chuva;
- Fornos à lenha, construídos de alvenaria e cobertos com telha, como nas casas de farinha, onde o produto é colocado e o principal meio de secagem se dá pela ação da lenha queimada que transmite calor para o tablado e ao caulim sobreposto a ele, além do vento. Essa estrutura, por ser coberta, está relativamente protegida da chuva.

As Figuras 1.2 e 1.3 mostram alguns exemplos das estruturas dos sistemas de secagem usados na região. Alguns pontos de possível atuação para melhoria podem ser identificados e serão explicitados a seguir.

Figura 1.2 - Sistema de secagem utilizando lenha para a secagem de caulim.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 1.3 - Disposição do minério de caulim em galpão para futura secagem.



Fonte: Próprio Autor.

É notório uma série de problemas estruturais do ponto de vista tecnológico e da eficiência energética. As estruturas não seguem padrões de tamanho, forma, material utilizado, posicionamento, capacidade de operação, alimentação de combustível à lenha, procedimentos operacionais e de qualidade. Tudo isso resulta em um processo pouco eficiente do ponto de vista da utilização adequada do potencial térmico da região.

Existe também empresas maiores, e com mais estrutura econômica, que usam sistemas de secagem complementar e sopradores elétricos. Esses equipamentos realizam a secagem por convecção forçada do ar ambiente sobre o produto; retirando, assim, a umidade dele de forma mais rápida. Esse fluxo é gerado por sopradores de ar que puxam o ar ambiente e o lançam com uma velocidade muito maior sobre as tortas, geralmente dispostas em prateleiras. Essa tecnologia começou a ser implementada de maneira experimental e sem um controle preciso dos parâmetros que tornem o sistema mais eficiente, uma vez que o consumo de energia elétrica é muito grande.

A Figura 1.4 mostra um desses equipamentos em operação, sendo o soprador ligado diretamente na rede elétrica da empresa.

Figura 1.4 - Soprador convectivo utilizado para a secagem de tortas de Caulim.



Fonte: Próprio Autor.

A utilização desses equipamentos apresenta-se como uma alternativa para acelerar o processo de secagem do caulim. Aqui está uma situação em que é possível implementar algumas estratégias para melhoria da eficiência desse processo de secagem, por exemplo, usando energia solar fotovoltaica para gerar a energia elétrica que acionará o soprador, ou substituir o soprador por ventiladores mais eficientes.

Uma das contribuições deste trabalho foi o cálculo do número de painéis solares necessários para acionar cada soprador desse porte.

1.2.2 POTENCIAL ENERGÉTICO DA REGIÃO E SUAS POSSÍVEIS APLICAÇÕES

A exploração e beneficiamento de caulim, na região da PPB, ocorre numa área de clima com o ar ambiente, em geral, com temperaturas médias altas e seco, típico do sertão paraibano. Analisando os dados meteorológicos locais, percebe-se que vários fatores contribuem para uma utilização mais eficaz do potencial solar.

Segundo dados observados do INMET, os índices pluviométricos, ao longo do ano, são baixos, tendo apenas 4 meses de chuva (fevereiro a maio) e os outros meses com baixíssima pluviosidade. Essa característica favorece a formação de poucas nuvens na região e uma umidade relativa do ar baixa. Essas características favorecem a secagem do caulim, pois o ar quente e seco, em contato com o material úmido, faz com que o processo de secagem seja mais eficiente, ou seja, aconteça em menor tempo. Durante o período de fevereiro a maio, o processo de secagem de caulim sofre grandes atrasos e adversidades, mas é realizado da mesma forma, dependendo então constantemente de dias mais estiados e com menos chuvas para que o caulim seja seco.

A incidência de radiação solar na região é alta em virtude do seu posicionamento geográfico, o que garante um elevado número de horas de sol durante todo o ano. Com isso, a energia solar pode ser aplicada tanto na forma térmica (calor) como também na forma de energia elétrica, através da conversão em painéis fotovoltaicos.

Outra característica da região está relacionada à potência eólica. Os dados regionais de perfis de vento observados na literatura mostram um alto potencial de utilização para energia eólica. A presença de parques eólicos na mesorregião do sertão paraibano começa a se fazer

presente, a exemplo do grande complexo eólico da cidade de Santa Luzia – PB, localizado a menos de 50 km de Assunção. Sabe-se que o vento é um importante aliado na secagem solar, pois, estando o ar em condições propícias de velocidade, temperatura e umidade relativa, a etapa de secagem é otimizada, sendo a interação com o produto um ponto chave para a secagem.

Durante este trabalho, foram realizadas medidas de temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do ar na região da PPB em diferentes épocas do ano, com o objetivo de registrar tais índices e comprovar o alto potencial da utilização da energia solar. Somado a isso, as características arquitetônicas e estruturais, quando aplicadas de maneira a obter mais eficiência de tal potencial, podem gerar um ganho energético relevante.

A Tabela 4.1 mostra os registros das médias diárias de diferentes parâmetros, entre as 08:00 h e as 17:00 h, medidos na Empresa INCOMGEL localizada na cidade de Assunção-PB durante o ano de 2020, abrangendo as diversas estações do ano (aqui divididas apenas como Verão e Inverno).

Tabela 1.1 - Médias diárias de diferentes parâmetros medidos na INCOMGEL, em Assunção/PB.

Dia	Estação do Ano	Temp. média (°C)	UR média (%)	Velocidade Média do ar (m/s)	Irradiação Solar (W/m²)
23/03/2020	Inverno	29,66	66,13	1,91	770,45
24/03/2020	Inverno	27,50	69,43	1,93	715,89
12/08/2020	Inverno	30,88	61,77	1,87	800,58
13/08/2020	Inverno	29,78	62,91	1,84	790,76
04/11/2020	Verão	35,09	53,51	1,89	967,60
05/11/2020	Verão	33,42	56,39	1,86	998,53
09/12/2020	Verão	36,09	51,54	1,76	948,78
10/12/2020	Verão	35,16	54,00	1,80	981,10

Fonte: Próprio Autor.

Essas características meteorológicas do ar ambiente e da radiação solar na região servem como indicativo que a energia solar pode contribuir para que ocorra uma secagem de caulim de modo mais eficiente.

Capítulo II
REFERENCIAIS TEÓRICOS

2 REFERENCIAIS TEÓRICOS

2.1 GEOLOGIA REGIONAL

Os pegmatitos mineralizados com caulim e outros minerais encontram-se localizados regionalmente na Província Pegmatítica da Borborema (PPB). Essa província foi definida por Almeida *et al.* (1981) como uma faixa móvel brasileira, limitada ao norte pelo Cráton de São Luís, ao sul pelo Cráton do São Francisco, a oeste pela Bacia do Parnaíba e a leste pelas bacias costeiras. O arcabouço tectônico da Paraíba foi descrito, inicialmente, por Brito (2000) como um sistema de dobramentos estruturado no final do Neoproterozóico e formado por uma alternância de faixas metassedimentares, zonas geoanticlinais, maciços medianos, com extensos lineamentos e grande quantidade de intrusões graníticas.

De acordo com o conhecimento atual dessa província, ela encontra-se dividida em três grandes domínios principais denominados de Setentrional, Transversal e Meridional, separados pelos lineamentos Patos e Pernambuco (BRITO e NEVES *et al.* 2000).

Esses três grandes domínios regionais são agrupados em cinco subprovíncias ou geotectônicas: Médio Coreaú, Ceará Central, Rio Grande do Norte, Transversal e Meridional, consolidadas pelas revisões de Santos e Medeiros (1999); Brito Neves *et al.* (2000); e Santos *et al.* (2015). Segundo esses autores, esses domínios seriam ainda subdivididos em terrenos tectono-estratigráficos, semelhantes à cordilheira oeste dos Estados Unidos.

Os pegmatitos da província estão concentrados em uma área de aproximadamente 11.250 km², no sudeste da faixa de dobramento do Seridó, localizada nos estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, conforme ilustra a Figura 2.1. Aproximadamente 80%, dentre os 750 corpos até então conhecidos, são pegmatitos graníticos e estão encaixados em granada-cordierita e/ou silimanita-biotita-xistos da formação Seridó. Menos de 10% são intrudidas nos quartzitos subjacentes. Os corpos remanescentes estão hospedados por gnaisses e skarns da formação Jucurutú. (MIRANDA *et al.* 2012).

Figura 2.1 - Localização da Província Pegmatítica da Borborema (PPB).



Fonte: Miranda et al. (2012)

Os pegmatitos são corpos tabulares, com comprimento variando de dezenas a centenas de metros de comprimento e larguras de metros a dezenas de metros. Os pegmatitos da PPB possuem alta resistência à erosão, enquanto que as rochas encaixantes se desgastam mais rapidamente sob ação do intemperismo. Essa maior resistência resulta na erosão dos pegmatitos de forma lenta, enquanto que, nas rochas circunvizinhas, se dá de forma mais acelerada, permitindo que muitos desses pegmatitos se encontrem destacados tipograficamente e possam ser lavrados a céu aberto (LUZ e DAMASCENO, 1993).

Normalmente, os pegmatitos estão inseridos em rochas metamórficas e podem conter importantes minerais, como: columbita-tantalita, berilo, turmalina, feldspatos, entre outros. A maioria dos pegmatitos da região é bastante homogênea, mas, ocasionalmente, ocorre zoneamento.

2.2 O CAULIM

2.2.1 Caulim primário

O caulim primário é resultante da alteração de rochas *in situ* devido, principalmente, à circulação de fluidos quentes provenientes do interior da crosta, da ação de emanções vulcânicas ácidas ou da hidratação de um silicato anidro de alumínio. Os caulins primários são classificados por Bristow (1987) em: intemperizados, hidrotermais e solfataras.

O caulim do tipo intemperizado ocorre em regiões de clima tropical (quente e úmido), com condições físico-químicas propícias para a alteração dos feldspatos e de outros aluminossilicatos, presentes em granitos e rochas metamórficas. O processo de caulinização de uma rocha ocorre devido à hidratação de um silicato anidro de alumínio, seguida de remoção de álcalis. A caulinita forma-se pela alteração de feldspato-potássico nos pegmatitos (LUZ, 1993).

Ainda segundo Luz (1993), os principais depósitos desse tipo de caulim encontram-se na Criméia (Ucrânia), Galícia (Espanha) e no Brasil, nos municípios de Mogi das Cruzes (SP) e Equador (RN).

O caulim do tipo hidrotermal é formado pela alteração da rocha a partir da circulação de fluidos quentes, provenientes do interior da crosta (ou água juvenil). Neste caso, é necessário que a rocha apresente porosidade e permeabilidade adequadas. As principais ocorrências desse tipo de depósito estão localizadas em Saint Austell e Cornwall (Inglaterra), Maungaparerua (Nova Zelândia), Suzhou e Shangai (China), entre outros citados por Murray e Keller (1993).

O caulim do tipo solfatara é formado pela alteração de rochas a partir da ação de emanções vulcânicas ácidas, constituídas de vapores d'água ricos em enxofre. Esse tipo de depósito ocorre em áreas periféricas de Roma na Itália, como relatado por Murray e Keller (1993).

2.2.2 Caulim secundário

Esses caulins são formados pela deposição de sedimentos em ambientes lacustres, lagunares ou deltaicos. As diferentes origens geológicas do caulim resultam em diferenças notáveis na composição mineralógica. Normalmente, os caulins secundários apresentam menores proporções de quartzo e mica, mas apresentam uma maior presença de minerais contaminantes de óxidos de ferro e titânio, responsáveis pela alteração de sua cor branca original (BRISTOW, 1987).

2.2.3 Caulins na Província Pegmatítica da Borborema (PPB)

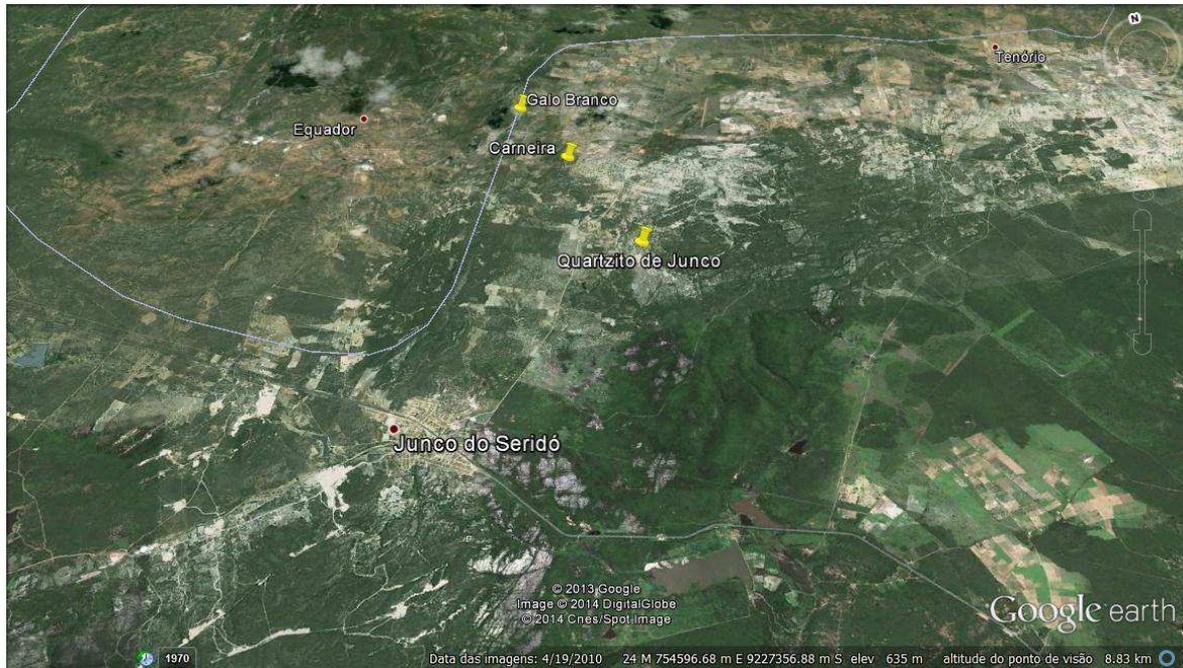
Na região compreendida entre os municípios do Junco do Seridó (PB) e Equador (RN), ocorrem diversos depósitos de caulins associados à alteração de pegmatitos (SILVA e DANTAS, 1997).

Os depósitos de caulins da Província Borborema, no Seridó, são lavrados, na maioria das vezes, sem um estudo prévio da pesquisa mineral das ocorrências nem das condições geológicas de formação dos depósitos. A ausência de conhecimento sobre a geologia dos depósitos da região e de tecnologias de lavra e beneficiamento acarretam, entre outros problemas, perdas significativas da caulinita.

O caulim da PPB é de origem primária, encontrando-se associado aos minerais como quartzo, feldspato e moscovita. A fração menor que 0,037 mm corresponde, aproximadamente, a 47%, em massa, da alimentação que vai para o beneficiamento. Segundo Da Silva (2008), as suas principais impurezas são os óxidos de ferro que são, principalmente, a hematita e a magnetita.

A Figura 2.2 mostra a localização geográfica de depósitos de caulins nos municípios de Junco do Seridó (PB) e Equador (RN). Entre elas, a ocorrência denominada “Galo Branco” – esta sendo a principal região de lavra e extração de caulim da região, e também de algumas unidades de beneficiamento desse recurso mineral.

Figura 2.2 - Mapa da região do Seridó: em destaque, as cidades de Junco do Seridó/PB e Equador/RN.



Fonte: Google Earth (2020).

2.3 PRINCIPAIS PROPRIEDADES DA CAULINITA

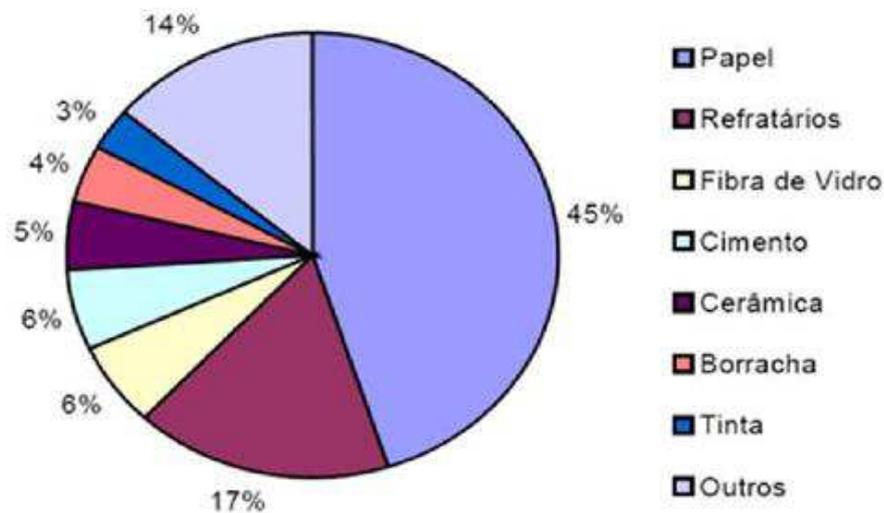
Segundo da Silva (2008), as principais características da caulinita encontrada na região da PPB são:

- ▶ Inerte quimicamente, em uma ampla faixa de pH (3 a 9);
- ▶ Coloração branca ou quase branca, já que possui alvura elevada;
- ▶ Macio e pouco abrasivo;
- ▶ Capacidade de cobertura, se usado como pigmento e reforçador para aplicações de carga;
- ▶ Fácil dispersão;
- ▶ Baixa condutividade térmica e elétrica;
- ▶ Compatibilidade com praticamente todos os adesivos (proteína, caseína), devido à dispersão e inércia química;

2.4 PRINCIPAIS APLICAÇÕES

A Figura 2.3 mostra, em valores percentuais, as principais aplicações industriais do caulim. Vale destacar que o uso como carga na fabricação do papel é, atualmente, a sua principal destinação (da Silva, 2008).

Figura 2.3 - Principais aplicações industriais do caulim



Fonte: da Silva (2008).

Santana (2017), em seus estudos sobre beneficiamento de caulim, analisou a granulometria, composição química e mineralógica, com o objetivo de caracterizar o caulim da região da PPB. Os resultados de granulometria do produto foram com d_{10} de 30 μm , d_{50} com tamanho de 7 μm e d_{90} de 2,5 μm . A análise mineralógica por Difração de Raios-X mostrou uma pureza superior a 95% de caulinita, e os outros minerais presentes são a moscovita e o quartzo. A análise química no caulim da região da província apresentou 41,1% de Al_2O_3 , 43,8% de SiO_2 e 13,6% de perda por calcinação, proveniente da água interna estrutural desse Alumino-Silicato Hidratado.

2.5 LAVRA E BENEFICIAMENTO DE CAULINS NA PPB

Os depósitos de caulins da PPB-Seridó são lavrados, há várias décadas, de maneira artesanal, com características usualmente predatórias. No município de Junco do Seridó, o caulim é lavado, nos veios pegmatíticos, por pequenos mineradores locais designados de “visgos”. O caulim é retirado manualmente, com equipamentos simples e colocado em áreas a céu aberto; depois transportado, em caminhões basculantes, para a unidade de beneficiamento. A lavra é realizada com pouco ou sem acompanhamento técnico adequado, acarretando, dessa forma, em riscos à segurança laboral dos próprios mineradores, em função da abertura de poços e galerias para alcançar os veios de caulim.

Em alguns casos, o caulim é lavado por meio de máquinas tipo escavadeiras, abrindo cavidades no solo, o que modifica consideravelmente a paisagem natural. Essa lavra semimecanizada é realizada, geralmente, por pequenas empresas de mineração localizadas na região.

Em relação à composição mineralógica, os caulins estão associados a várias impurezas minerais, não se enquadrando às especificações do mercado. As principais impurezas, como óxidos de ferro e titânio, mica e feldspato, influenciam diretamente na cor e alvura do caulim, comprometendo sua qualidade (LUZ E DAMASCENO, 1993). Para garantir um pouco mais de qualidade, é necessário realizar operações de beneficiamento que vão depender do uso a que se destina. São utilizados dois processos de beneficiamento, a saber: via seca e via úmida.

O beneficiamento a seco é simples e consiste, principalmente, de britagem, pulverização e classificação. É aplicado para caulins que, de certa forma, já possuem qualidade e alvura, distribuição granulométrica e pequena proporção de quartzo. Como a maioria dos caulins no estado natural não possuem esses pré-requisitos, o seu beneficiamento é realizado na via úmida (LUZ E DAMASCENO, 1993).

O processo de beneficiamento do caulim usualmente realizado na região do Junco do Seridó e Equador (PB e RN) é mostrado na Figura 2.4. Na primeira fase do processo, o minério é passado no “batedor”, onde o caulim bruto misturado com água é desagregado. Em seguida, a polpa passa pelas peneiras de nº350 ou de nº200, conforme a granulometria do produto final desejado. As frações retidas nas peneiras são retiradas e separadas como rejeito e, a seguir, o caulim com alta umidade segue para os tanques de decantação. Na sequência, o material

decantado é conduzido aos filtros prensa e a água separada nos tanques retorna ao processo produtivo, sendo direcionada ao batedor onde será reutilizada na desagregação do caulim.

Dos filtros prensa, o concentrado de caulim (tortas) segue para a secagem que, em geral, ocorre de duas formas: secagem natural (diretamente exposto ao sol) ou em forno à lenha, dependendo das condições meteorológicas. O material, já seco, segue para a pulverização e, posteriormente, para o ensacamento e transporte. Os rejeitos gerados em cada fase do processo são colocados a céu aberto, em área próxima ao local onde foram gerados.

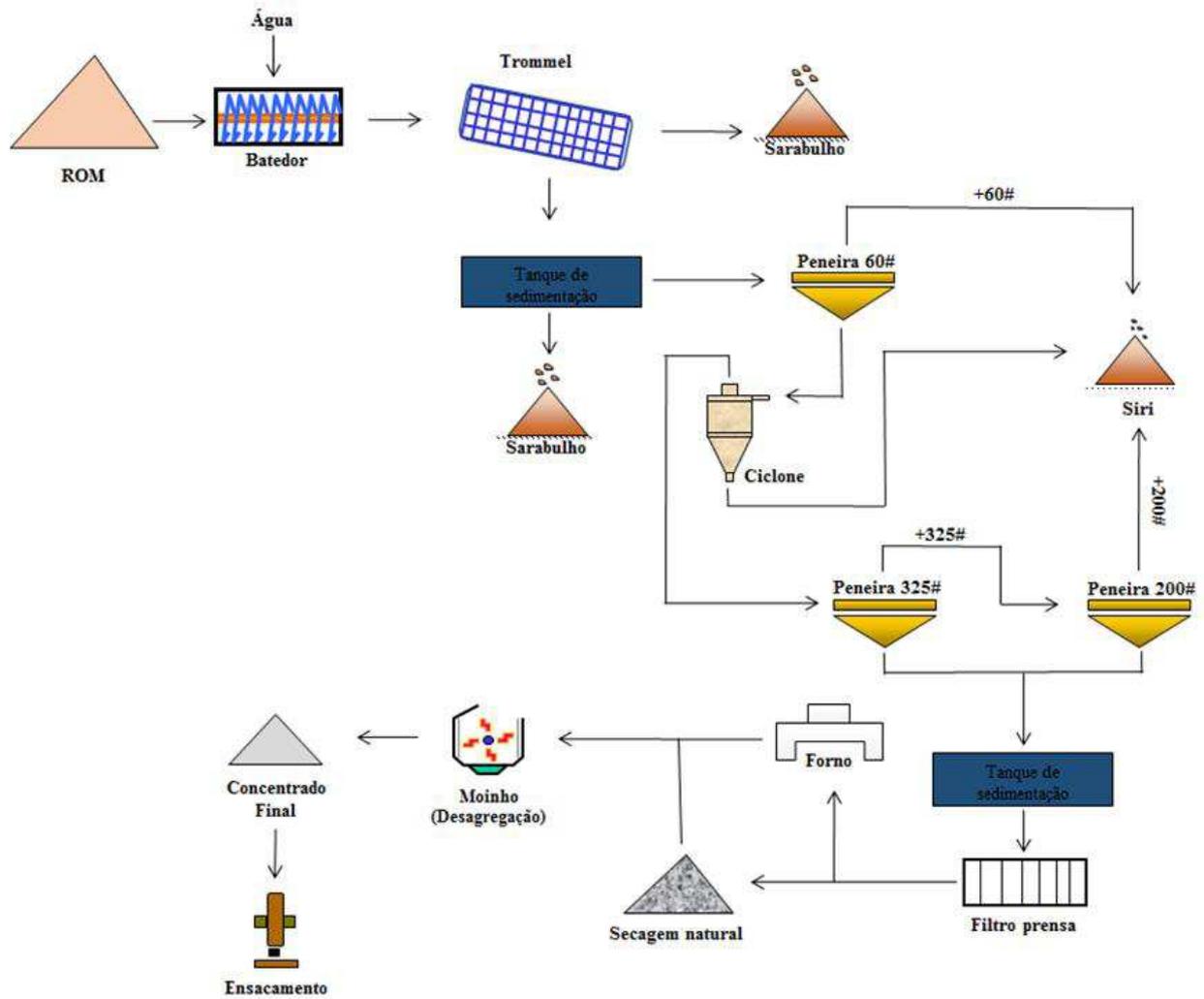
Figura 2.4 - Fluxograma típico do processo de beneficiamento do caulim adotado por pequenas empresas na PB e RN.



Fonte: Lima (2010).

Santana (2017) observou algumas mudanças e desenvolvimentos tecnológicos em seus estudos sobre o beneficiamento de caulim nos últimos anos. A introdução de novos processos e tecnologias ainda é lenta; porém, algumas unidades já possuem alguns equipamentos com o intuito de gerar um produto de maior qualidade. A Figura 2.5 apresenta um novo fluxograma, mais detalhado, com todas as etapas de beneficiamento do caulim. Observa-se a presença de hidrociclone e diversas peneiras.

Figura 2.5 - Fluxograma do processo de beneficiamento do caulim na empresa JPR Mineração.



Fonte: Santana (2017).

Nesta seção, é apresentada várias imagens/fotos do processo de beneficiamento do caulim em algumas unidades localizadas na região da PPB. Na Figura 2.6, pode-se observar os tanques de decantação por onde o caulim, já classificado, passa pela etapa de decantação com o objetivo de reduzir a porcentagem de água e sua posterior secagem.

Figura 2.6 - Tanques de decantação do caulim - Mineração A.



Fonte: Santana (2017)

Após a decantação, a polpa passa por um filtro prensa (Figura 2.7), com o objetivo de reduzir ainda mais a porcentagem de água; formando, assim, “tortas” com o minério concentrado.

Figura 2.7 - Filtro prensa utilizado na confecção das tortas - Mineração B.



Fonte: Santana (2017).

Essa secagem é realizada de duas maneiras diferentes: ao ar livre, com as tortas secando pela ação do vento e do sol; ou em fornos à lenha (Figura 2.8) com um processo mais rápido, porém, com um alto consumo energético (utilização de lenha). O processo de secagem por fornos à lenha também resulta na geração de uma fumaça capaz de contaminar o caulim; prejudicando, assim, a sua qualidade e alvura. Vale ressaltar que a queima da lenha por parte dos fornos de secagem gera grandes impactos ao meio ambiente, devido a grande quantidade de gases poluentes produzidos.

Figura 2.8 - Secagem do caulim em fornos à lenha - Mineração C.



Fonte: Santana (2017).

2.6 RADIAÇÃO SOLAR

A energia solar é a fonte de energia primordial do planeta Terra, uma vez que quase todas as outras formas de energia são originadas da ação da radiação solar sobre a Terra. Esta radiação que incide sobre a superfície do planeta é cerca de 10.000 vezes superior à demanda bruta de energia atual pela humanidade.

O Brasil possui um elevado índice de radiação solar incidente, principalmente na região Nordeste. No semiárido nordestino, estão os melhores índices, com valores típicos de 1.752 a 2.190 kWh/m² /ano de radiação incidente. Isso torna essa região como uma das com maior potencial de energia solar (GRILO, 2007).

2.6.1 Utilização da energia solar

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol é hoje uma das alternativas mais promissoras para se enfrentar os novos desafios relacionados a demanda energética. O Sol é responsável pela origem de quase todas as outras fontes de energia.

Segundo Grilo (2007), a principal fonte de energia no nosso planeta é o sol: diretamente, pela luz e pelo calor; e indiretamente, porque é a energia solar que alimenta parte da vida na Terra, além de ser responsável pela chuva, pelo vento e até pela formação dos combustíveis fósseis.

Lima *et al.* (2006) citam alguns exemplos de fontes de energia que derivam da energia solar, como as hidrelétricas, que a utiliza na evaporação da água que causa as chuvas e enche as represas, fazendo mover os geradores elétricos.

Logo, a utilização combinada de vários tipos e fontes de energia, com ênfase nas energias renováveis, é o caminho para construir uma sociedade equilibrada e que utiliza de forma eficiente os recursos energéticos, proporcionando qualidade de vida elevada e promovendo o desenvolvimento sustentável.

A energia solar, em si, está disponível gratuitamente e é imune às flutuações de preços, como acontece nas outras formas de energia. Com o avanço da tecnologia, ela pode ser convertida e usada de várias formas diferentes: fornecimento de eletricidade, calefação, resfriamento, transporte, iluminação e potência mecânica. Outra vantagem é que a maioria dos métodos usados para conversão geram poucos problemas ambientais. A desvantagem da energia solar está no fato de não ser de fluxo contínuo, embora seja possível coletar e armazenar. Trata-se de uma energia intermitente, com fluxo interrompido pelas noites e pelos dias com nuvens (PENEIRO *et al.* 2010).

O emprego de fontes não renováveis, como as baseadas em combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural), intensifica os riscos ambientais, enquanto que a utilização de fontes renováveis (solar, eólica) ameniza esses danos. No contexto atual, faz-se necessário a busca incansável por mecanismos de geração de energia à base de fontes alternativas que amenizem os impactos ambientais. Por isso, em muitas partes do mundo, há uma consciência crescente de que as energias renováveis têm um papel importante a desempenhar na extensão da tecnologia em países em desenvolvimento, aumentando sua produtividade (WAEWSAK *et al.* 2006).

2.7 PRINCÍPIOS DA SECAGEM

A secagem industrial é a operação que retira a umidade contida nos diversos materiais. É uma das operações industriais mais usadas na prática, tanto para o acabamento final quanto para o equilíbrio da umidade própria dos diversos materiais processados com o ar ambiente (Grilo, 2013).

Segundo Grilo (2007), como o fluido de trabalho utilizado nos processos de secagem solar é o ar aquecido, a avaliação das suas propriedades termodinâmicas (temperatura, umidade relativa, velocidade dentre outras) é de extrema importância de modo que, sob determinadas condições operacionais, seja possível proporcionar uma secagem uniforme do produto e a redução do tempo de secagem.

As especificações dos sistemas de secagem podem mudar quanto a sua capacidade, processo de operação, combustível utilizado, versatilidade e limites de vazão de fluxo de ar e temperatura do secador. O secador é o equipamento usado na redução da umidade dos produtos pela ação do calor (LIMA *et al.* 2000).

A secagem natural é entendida como aquela em que o ar que promove a secagem do produto provém da ação dos ventos e a energia utilizada, nesta secagem, emana da incidência direta da energia solar.

Durante a secagem, é necessário o fornecimento de calor para evaporar o teor de água do material e um sorvedor de teor de água para remover o vapor de água formado na superfície do material a ser seco. Uma vez que o produto é posto em contato com o ar quente, ocorre transferência de calor do ar para produto, em função da diferença de temperatura; simultaneamente, ocorre uma diferença de pressão parcial de vapor de água existente entre o ar e a superfície do produto, determinando a transferência de massa de água para o ar (Park *et al.* 2007).

Lima (1999) ressalta que, quando um sólido é submetido à secagem, dois fenômenos que ocorrem simultaneamente podem ser observados. O primeiro é a transferência de calor do ambiente para evaporar a umidade superficial, que depende da área exposta do sólido, da

pressão, da umidade e direção do ar, do fluxo e da temperatura; o segundo é a transferência de massa do interior para a superfície do material e, em seguida, sua evaporação.

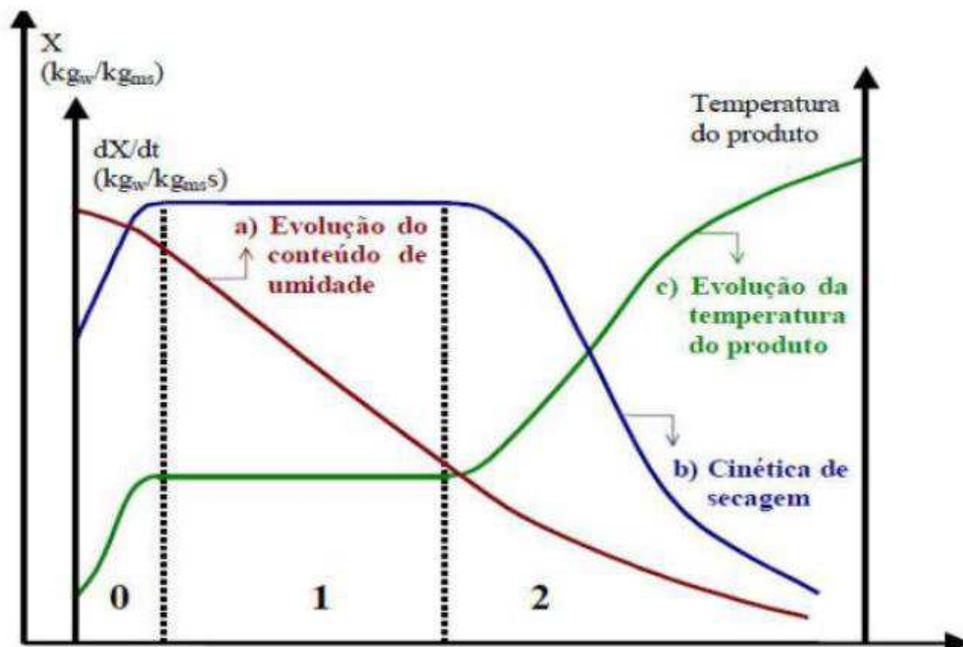
Na Figura 2.9, são apresentadas, ao longo do tempo e para um experimento utilizando ar de propriedades constantes, as curvas de evolução do teor de água do produto (X), de sua temperatura (T) e da velocidade de secagem (dX/dt), também chamada de cinética de secagem.

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 2.9 – Curvas de secagem.



Fonte: Brod et al. (1999).

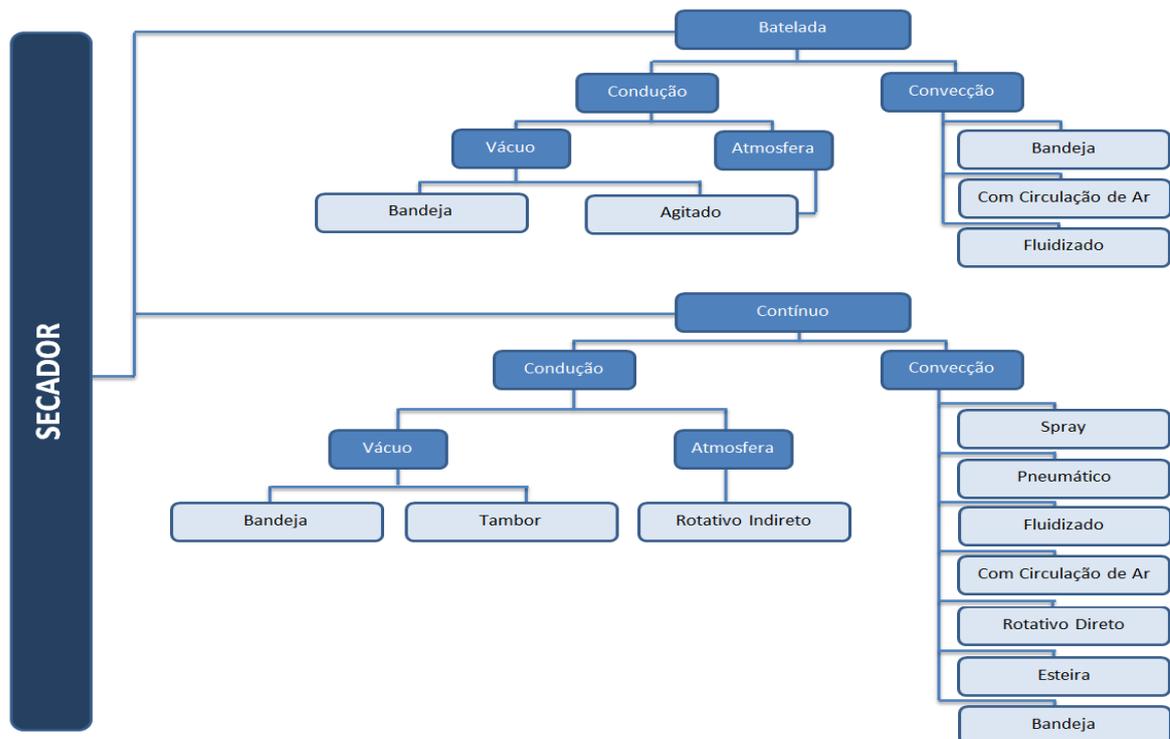
O processo de fornecimento de calor para o material úmido será responsável pela evaporação da água do material, seguido da transferência de massa que arrastará o vapor formado.

Por ser um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto a ser secado e o ar de secagem, a secagem influencia nas características do produto final e tem efeito direto na sua qualidade. Se for mal conduzida, pode causar a deterioração do produto ou reduzir a sua qualidade, diminuindo seu rendimento nas etapas de processamento (Lima, 1999).

2.7.1 Tipos de secadores

Segundo Gomes (2017), existe uma grande variedade de produtos a serem secos e diferentes métodos de secagem, como também existem diversos modelos de secadores projetados para atender a uma demanda específica. A classificação dos secadores pode ser definida com base no método de operação, cujas peculiaridades apresentam-se conforme ilustrado na Figura 2.10.

Figura 2.10 - Fluxograma de classificação dos secadores.



Fonte: Gomes (2017).

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

Para Grilo (2007), entre os secadores que operam de forma descontínua, os secadores de cabine ou bandejas são mais comumente utilizados, sendo mais eficientes, mais econômicos, com custos de construção e de manutenção baixos.

Os secadores de cabine ou bandejas operam sob duas circunstâncias: a câmara do aquecedor é cheia e só será iniciado o movimento do ar após a temperatura atingir o grau desejado; ou, o secador é posto em funcionamento só depois que a temperatura e a circulação de ar estiverem nas condições ideais, quando, então, é possível a introdução dos produtos no equipamento.

2.7.2 Secadores solares

O desenvolvimento de secadores de baixo custo e que utilizam como fonte energética a irradiação solar apresenta uma importância cada vez maior nos dias atuais, porque é uma alternativa para os produtores que não têm acesso aos secadores convencionais que operam com energia elétrica e têm elevado custo de aquisição e operação (BARBOSA, 2011).

De acordo com Ferreira *et al.* (2008), secadores solares usam fontes de energia livres e renováveis, reduzem as perdas de secagem (em comparação à secagem direta ao sol) e apresentam custos operacionais mais baixos que a secagem elétrica.

O desenvolvimento, pela Universidade Federal de Campina Grande, de secadores que utilizam a energia solar começou no ano de 2008, e diversos protótipos foram construídos e testados em diferentes situações. O estágio atual das pesquisas demonstra que o caminho está sendo positivo e, a cada novo passo, são incorporadas inovações que contribuem para aumentar a eficiência do secador solar. Os grandes avanços objetivam viabilizar um sistema de secagem que tenha, além de elevada eficiência energética, um *design* moderno e compatível com suas funções.

No secador solar, o ar ambiente é aquecido pela irradiação solar e percorre seu caminho de forma natural ou forçada, retirando a água do produto que se quer secar. O material pode ser colocado diretamente no coletor, sendo chamado de secagem direta; ou em uma câmara de secagem – o que é denominado de secagem indireta. (SOUZA *et al.* 2012).

Os secadores solares, a exemplo de outros tipos de secadores, também podem ser classificados quanto à passagem do fluido aquecido, a saber: secadores de câmara estacionária, secadores de fluxo cruzado e secadores de fluxo corrente. Nos secadores de camadas estacionárias, não existe movimentação do produto durante a secagem, enquanto os de fluxos cruzados caracterizam-se por fazerem com que o ar passe perpendicularmente à camada do produto entre as duas chapas perfuradas. Já os de fluxos correntes caracterizam-se pelo escoamento do produto por quatro pirâmides invertidas, sendo direcionadas por um duto central (CAVALCANTI-MATA *et al.* 2006; FIOREZE, 2004)

O posicionamento adequado do secador solar é responsável direto pela maximização da eficiência do equipamento e, conseqüentemente, do processo de secagem. Conforme Grilo (2007), com o objetivo de se obter um melhor aproveitamento da irradiação incidente, os coletores solares devem ser posicionados de forma que a incidência da radiação ocorra o mais perpendicularmente possível ao plano da superfície coletora.

2.8 ESTADO DA ARTE SOBRE SECADOR SOLAR NO BRASIL

O estado da arte, em trabalhos acadêmicos, destina-se a documentar as pesquisas atuais no campo de estudo específico. Este item é fundamental para apresentar as inovações em

desenvolvimento, permitindo observar e comparar as inovações propostas com as de outras pesquisas.

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

A partir de pesquisas realizadas sobre secadores solares nos endereços mais recomendados e no portal periódico CAPES, foram selecionados diversos artigos, apresentando um resumo com as principais características e conclusões que guardam maior identificação com os secadores solares em desenvolvimento no Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas (LEMT) da UFCG.

2.8.1 Secador solar de exposição direta

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

Lima *et al.* (2006) desenvolveram um secador solar para frutas, ervas e hortaliças. Esse secador foi construído com cobertura de vidro, blocos de madeira, grampo para madeira, parafusos, dobradiças, tela plástica, tinta branca, tinta preta e solvente.

Outro exemplo de secador solar de exposição direta foi desenvolvido por Anunciação (2007), na cidade de Natal (RN), na Universidade Federal do Rio Grande do Norte. O protótipo construído e testado foi utilizado para desintoxicar torta de mamona. O secador de exposição direta se mostrou eficiente para tal processo.

Dantas (2007) relatou a construção de um secador solar elaborado em chapa zincada, revestido internamente com isopor pintado na cor preta, tendo por cobertura um vidro plano e utilizado para secar amêndoas de jaca. A secagem utilizando o secador solar apresentou desempenho semelhante ao da secagem artificial em temperaturas variáveis de 40° a 70°C.

Machado (2009) desenvolveu, no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, um secador solar de radiação direta para secar pedúnculo de caju. Foi fixado sobre um suporte do tipo cavalete, com ângulo de inclinação em relação ao Norte de cerca de 15°, para favorecer a incidência solar.

Na Figura 2.11, apresenta-se um protótipo de secador solar de exposição direta, produzido pelo GEDS/UFCG, no qual é possível perceber cada detalhe destes elementos construtivos.

Figura 2.11 - Protótipo de secadores solares de exposição direta - GEDS/UFCG.



Fonte: Nunes (2016).

2.8.2 Secador solar de exposição indireta

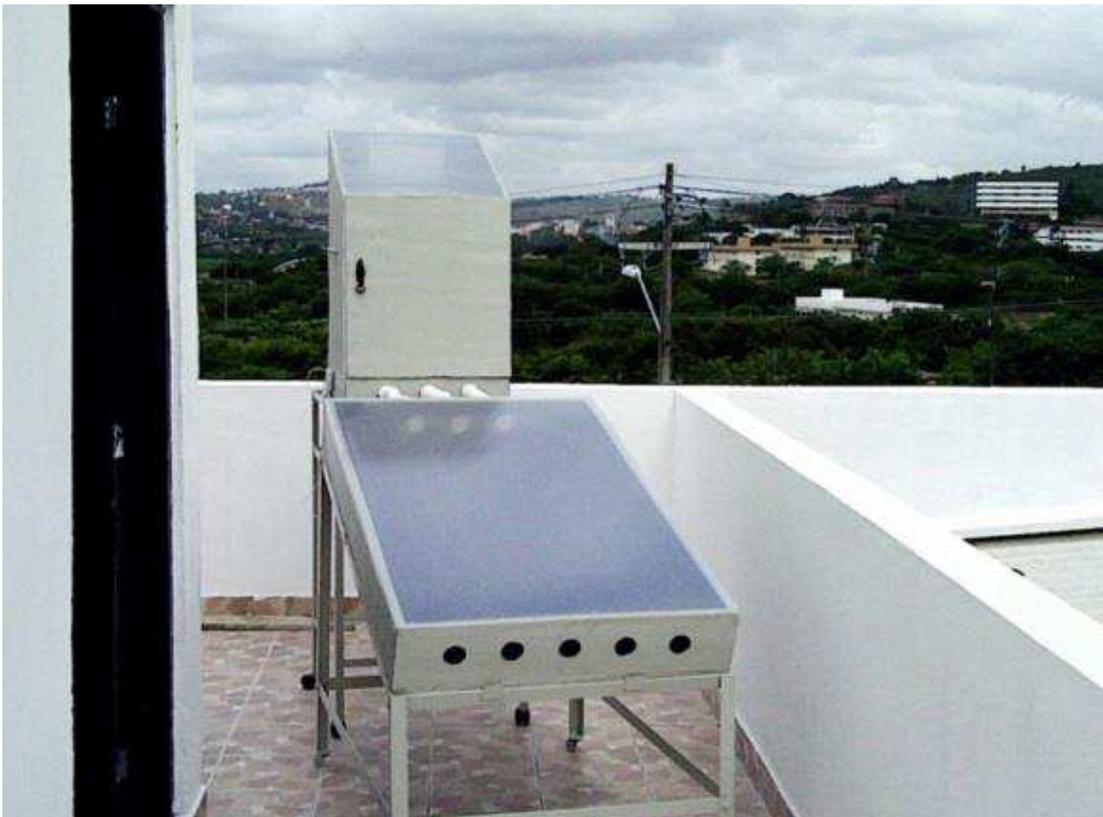
Neste tipo de secador, o produto não está diretamente exposto à radiação solar. A câmara de secagem é utilizada para manter o produto na bandeja. O ar é aquecido em um coletor solar e, em seguida, conduzido para uma câmara de secagem onde se encontra o produto a ser secado (GRILO, 2007).

Costa (2008) construiu um secador solar com câmara de secagem. O coletor solar e a câmara de secagem são construídos separadamente e, depois, os dois são acoplados. Na câmara

de secagem construída, o material a ser processado fica submetido a uma corrente de ar aquecida pelo coletor e à radiação solar direta, até atingir o teor de umidade desejado.

Machado (2009) desenvolveu um secador solar de radiação indireta, onde o fluxo de ar que passa pelo sistema é auxiliado por um exaustor eólico. Esse secador solar se mostrou mais eficiente do que os demais sistemas que foram desenvolvidos. Neste tipo de secador solar, o produto a ser desidratado não está diretamente exposto à radiação solar, isso minimiza a descoloração e rachaduras na sua superfície; melhorando, assim, a qualidade do produto. A câmara de secagem é utilizada para manter o produto na bandeja. O ar é aquecido em um coletor solar e, em seguida, conduzido para uma câmara de secagem onde se encontra o produto a ser desidratado. Um protótipo de secador solar de exposição indireta é mostrado na Figura 2.12.

Figura 2.12 - Protótipo de secador solar de exposição indireta - GEDS/UFCG.



Fonte: Nunes *et al.* (2013).

2.9 O SOL COMO FONTE DE ENERGIA

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

Segundo Grilo (2007), é a partir do Sol que as plantas e os animais se desenvolvem e são seus resíduos que geram as fontes não renováveis, como petróleo, carvão e gás natural. Assim também é a radiação solar, que induz a movimentação do ar ambiente, gerando os ventos que são usados na produção de energia eólica, além de também provocar a evaporação das águas e possibilitar a geração da energia hidrelétrica; caracterizando-se, também, como origem das energias renováveis. Dessa forma, a energia solar é a origem de quase todas as outras fontes de energia.

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 e em países em desenvolvimento, aumentando sua produtividade (GOMES, 2017).

Como exemplo de restrição ao uso de energia de origem fóssil no processamento de alimentos, por determinação do Conselho Nacional de Petróleo, em 1980, foi proibida a utilização de qualquer derivado do petróleo na secagem de cereais, madeira e fumo, forçando os setores de armazenamento e secagem de produtos agrícolas a encontrarem alternativas energéticas que substituíssem os combustíveis fósseis (GOMES, 2017).

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 do fato de, em si, ser gratuita e não sofrer impacto pelas flutuações nos preços das outras formas de energia. Atualmente, as formas mais usuais de utilização tecnológica da energia solar, conforme Grilo (2007), são através da:

- **Arquitetura bioclimática:** As construções que são projetadas dentro do conceito de aproveitamento das condições ambientais locais economizam energia e água, privilegiando a ventilação, a iluminação natural e o aproveitamento da água de chuva. É a chamada “arquitetura verde”, cada vez mais utilizada por arquitetos e engenheiros;
- **Energia solar fototérmica:** Utilização da energia proveniente do Sol como fonte de aquecimento de fluidos em geral, principalmente aquecimento de água para substituição do chuveiro elétrico e o aquecimento do ar ambiente usado nos processos de secagem de produtos agrícolas;
- **Energia solar fotovoltaica:** Conversão direta de energia solar em energia elétrica através da radiação incidente em painéis fotovoltaicos. Essa é a utilização mais nobre da energia solar, mas demanda um investimento inicial elevado.

Partindo desse 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 (GRILO, 2007).

Segundo Nunes (2016), para ser avaliado, o desempenho do sistema de secagem testado deve ser analisado sob dois pontos de vista: o desempenho do equipamento propriamente dito e a eficiência do processo de secagem — pois se trata de um equipamento térmico destinado a promover a secagem de produtos agrícolas.

Segundo Barbosa (2011), a eficiência do secador solar está relacionada ao seu rendimento térmico, enquanto a eficiência do processo de secagem pode ser avaliada pela diferença entre a massa inicial e final do caulim, em relação à massa inicial de água no produto e considerando-se o mesmo tempo de experimento, ou seja, para um mesmo tempo qual sistema de secagem retira mais água do caulim.

2.9.1 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 através do 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 (GRILLO, 2007).

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

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

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

2.9.2 Energia solar fotovoltaica

Segundo Gomes (2017), a primeira vez que foi verificada a conversão direta de luz em energia elétrica foi em 1839, pelo físico Edmond Becquerel, quando se observou que, quando exposto à luz, ocorria uma diferença de potencial nas extremidades de um material semiconductor.

Com o advento dos programas espaciais, os investimentos em sistemas fotovoltaicos impulsionaram essa tecnologia e, associados à crise mundial de energia, possibilitou a utilização desse 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

Capítulo III
MATERIAIS E MÉTODOS

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 LOCALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Os experimentos foram realizados na empresa INCOMGEL, localizada na cidade de Assunção, a 85 km de Campina Grande, latitude local de 7° Sul e longitude 36° Oeste, com altitude ar de aproximadamente, 500 m. Localizada no Sertão do Cariri, o município está incluído na área geográfica de abrangência do semiárido brasileiro. Segundo a divisão do Estado da Paraíba em regiões bioclimáticas, o município possui bioclima subdesértico quente, de tendência tropical.

A precipitação média anual foi de 522 mm (observado no período 2001-2021), 81% destas concentradas de março a maio. As temperaturas médias são da ordem de 25°C (INMET).

A escolha da empresa como local para a realização deste projeto se dá por dois fatores: a) devido a sua infraestrutura e à concordância da gerência para realização de ensaios na empresa, que cedeu o espaço, material para análise e oportunidade para realização dos experimentos necessários para a aquisição de dados da pesquisa, bem como construção do protótipo e aparato experimental; e b) pela necessidade de medidas em campo, visando a reprodução mais próxima da realidade de condições de temperatura, umidade relativa do ar ambiente e irradiação solar da região.

No início do ano 2020, foi firmado um acordo com a gerência da INCOMGEL que consistia na construção de um galpão com cobertura de policarbonato no local onde antes funcionava um forno à lenha usado na secagem de caulim. Esse ambiente seria utilizado como uma célula de teste para ser observado o funcionamento do processo de secagem de caulim. Seriam realizadas medidas de temperatura, umidade e velocidade do ar ambiente e também medido o tempo de secagem para comparar os resultados obtidos com os de secagem de caulim em outros ambientes, na mesma empresa. Por razões particulares, o galpão foi construído com uma cobertura de polipropileno, como pode ser visto A Figura 3.1 apresenta um dos pátios de secagem de caulim da empresa INCOMGEL.

Figura 3.1 - Parte da estrutura de secagem da empresa INCOMGEL



Fonte: Próprio Autor.

Pode-se observar a estrutura de secagem vista ao fundo, com dimensões de 25 m por 8 m, utiliza cobertura de polipropileno e foi construída em fevereiro de 2020. A estrutura vista em primeiro plano é preexistente e utiliza telhas de alumínio.

Diante do exposto, houve a necessidade de construção de dois sistemas de secagem que pudessem analisar e comparar a eficiência da estrutura proposta com a estrutura construída pela empresa. Estes sistemas foram compostos de dois secadores com estruturas idênticas com cobertura de policarbonato e polipropileno, respectivamente, os quais servirão de modelo para estudar experimentalmente a secagem de caulim, na empresa, e poder comparar os resultados obtidos.

A estratégia adotada para realização da pesquisa foi dividida em três sistemas de secagem:

- ✓ Secagem de caulim num secador solar com cobertura de policarbonato;
- ✓ Secagem de caulim num secador solar com cobertura de polipropileno
- ✓ Secagem de caulim com energia solar a céu aberto (secagem natural).

Os resultados obtidos em cada processo servirão de comparação em relação a três parâmetros:

- Rendimento térmico;
- Consumo específico de energia (CEE);
- Tempo de secagem para o caulim atingir 5% de umidade em base úmida.

3.1.1 Posicionamento dos secadores

Segundo Grilo (2007), para um secador solar, localizado no hemisfério Sul, obter uma melhor captação da radiação solar incidente ao longo do ano, recomenda-se que ele esteja posicionado voltado para o norte geográfico, com uma inclinação igual à latitude local, mais uma inclinação de 10° a 15°. Isso garante uma melhor eficiência energética do equipamento durante todo o ano, inclusive durante o inverno, ou seja, entre junho e setembro.

Para as cidades de Assunção/PB, com latitude média local de 7° Sul, foi utilizada inclinação do coletor a 22°, voltado para o Norte.

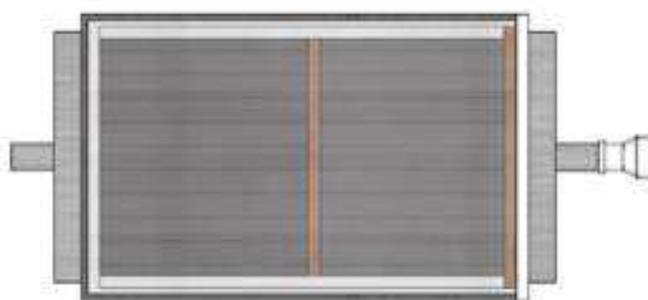
3.2 DESCRIÇÃO DO SECADOR SOLAR UTILIZADO NOS TESTES

Para a primeira bateria de experimentos (Experimento 1 e Experimento 2), os dois secadores solares utilizados para os testes de secagem são apresentados pelas Figuras 3.2 e 3.3, sendo secadores solares do tipo direto, com convecção natural e com área de exposição à radiação solar de aproximadamente 0,287 m² em cada secador, com volume interno de aproximadamente 0,055 m³ (55 litros). A cobertura dos secadores de um deles é em policarbonato, com espessura de 4 mm e, no outro, em polipropileno também de 4 mm.

Figura 3.2 - Projeto do secador solar proposto.



Figura.3.3 - Vista superior do secador solar



Fonte: Fernandes. 2021

A base dos secadores é feita com MDF, com 15 mm de espessura, por ser um material em que seu elemento base é a madeira, possuindo uma boa capacidade de isolamento térmico. Ambos possuem duas aberturas que servem para a entrada do ar de secagem e para a saída, respectivamente.

Na segunda bateria de experimentos (Experimento 3 e Experimento 4), foram utilizados secadores com dimensões adaptadas, desenvolvidos por Costa, 2022. Estes possuíam dimensões de 1 m² e volume interno de 0,150 m³ (150 litros). A cobertura de um deles é de policarbonato, com espessura de 4 mm; e o outro, em polipropileno, também de 4 mm.

A base dos secadores é feita de alumínio e isopor, proporcionando, assim, uma boa capacidade de isolamento térmico, além de baixo peso e facilidade de transporte. Ambos também possuem duas aberturas que servem para a entrada do ar de secagem e para a saída, respectivamente.

3.3 MATERIAIS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DO SECADOR

Foram utilizados materiais facilmente encontrados no comércio local, e de baixo custo, para facilitar a sua construção, operação e manutenção, tais como:

- **Painel de fibras de média densidade, conhecido comercialmente como *Medium Density Fiberboard* (MDF):** Material fabricado com fibras de madeiras selecionadas, de pinus ou eucalipto de reflorestamento, aglutinadas com resina sintética termo fixa, sob a ação conjunta de calor e pressão. Aplicado na confecção de toda a estrutura do secador solar. O MDF Ultra apresenta dupla proteção contra umidade e cupins, o que lhe garante um prolongamento de vida útil, principalmente quando o equipamento está exposto a ações de intempéries;
- **Polycarbonato alveolar:** Material elaborado à base de resina, que oferece transmitância elevada à radiação solar incidente com alto nível de segurança. Foi utilizado como cobertura transparente para captação da luz solar no coletor solar, em substituição ao vidro transparente de 4 mm, permitindo a obtenção do efeito estufa e facilitando a visualização do processo de secagem. O uso do polycarbonato é uma inovação dos secadores construídos na UFCG;
- **Polipropileno:** As telhas de Polipropileno são compostas por 70% de resina, ou seja, material leve, com alta durabilidade e resistência. Possui translucidez de aproximadamente 70%, resistência a raios UV e bom desempenho na proteção contra corrosão, mofo e agentes químicos;
- **Tela de nylon:** Material de fibra têxtil sintética que apresenta ótima resistência ao desgaste e à tração. Usada na bandeja onde se deposita o material a ser

desidratado. A tela de *nylon* permite a circulação do ar no interior da câmara e apresenta facilidade para limpeza de resíduos das frutas nos processos de secagem;

- **Telha de fibrocimento:** Placa absorvedora de energia solar (uma telha de fibrocimento pintado de preto fosco), com espessura de 4 mm. Utilizado como refletor e absorvedor de calor, posicionado no interior do secador solar. A telha pintada de preto apresenta elevada capacidade absorptiva e condutiva, o que facilita o processo de transferência de calor ao ar de secagem. Funciona também como capacitor térmico.

3.4 SISTEMA DE MEDIÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS (SMAD)

As medições da temperatura e umidade relativa do ar de secagem são fundamentais para observar sua variação ao longo do dia para a condição de otimização dos processos de secagem. Para tanto, é necessário medi-las em várias posições do secador solar: na entrada (temperatura ambiente), no interior e na saída do secador solar.

Para realizar estas medições do ar de secagem, foi projetado e construído um sistema de medição de temperatura e da umidade relativa do ar, desenvolvido especificamente para este sistema de secagem como parte dos objetivos desta tese. O sistema de medição e aquisição de dados (SMAD) foi confeccionado, na plataforma Arduino, o mesmo possui três sensores de temperatura e umidade do tipo DHT22. Estes sensores foram posicionados conforme mostrado na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Posicionamento dos sensores DHT22 no secador solar.



Fonte: Próprio Autor.

Com o posicionamento dos sensores, apresentados na Figura 3.4, foi possível o acompanhamento da variação das temperaturas e da umidade do ar na saída do secador, além de permitir a comparação com os valores obtidos de temperatura ambiente.

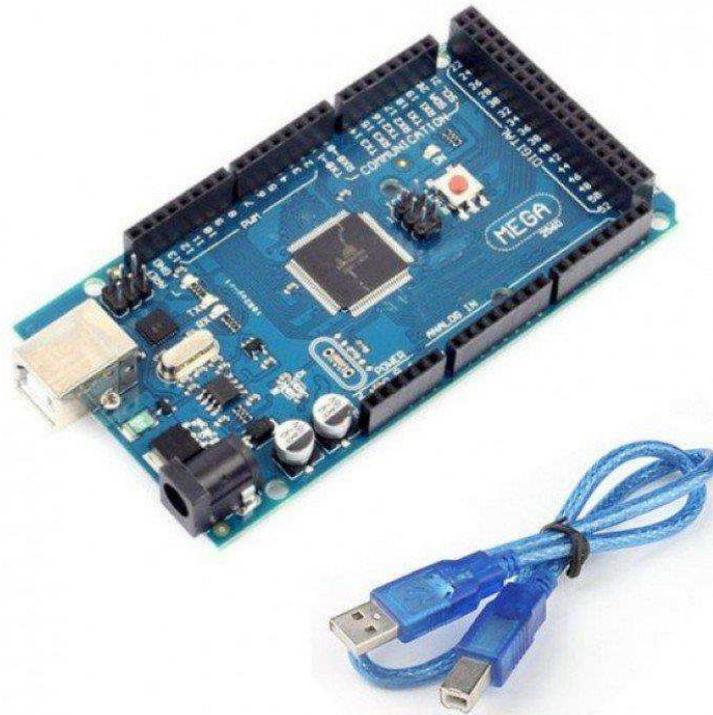
3.4.1 O Arduino e suas características

O Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em *hardware* e *software* de programação. Para que o microcontrolador execute os comandos necessários e realize o monitoramento e registro dos dados, utiliza-se uma linguagem de programação e o *Software* Arduino (IDE).

Para o sistema de medição e aquisição de dados construídos e utilizados nos experimentos, foi empregado a versão do Arduino MEGA por possuir uma quantidade maior de portas e conexões, permitindo a ligação com diferentes sensores e acessórios.

A Figura 3.5 apresenta o Arduino utilizado na construção dos sistemas de monitoramento e aquisição de dados (SMAD).

Figura 3.5 - Arduino Mega utilizado no SMAD.

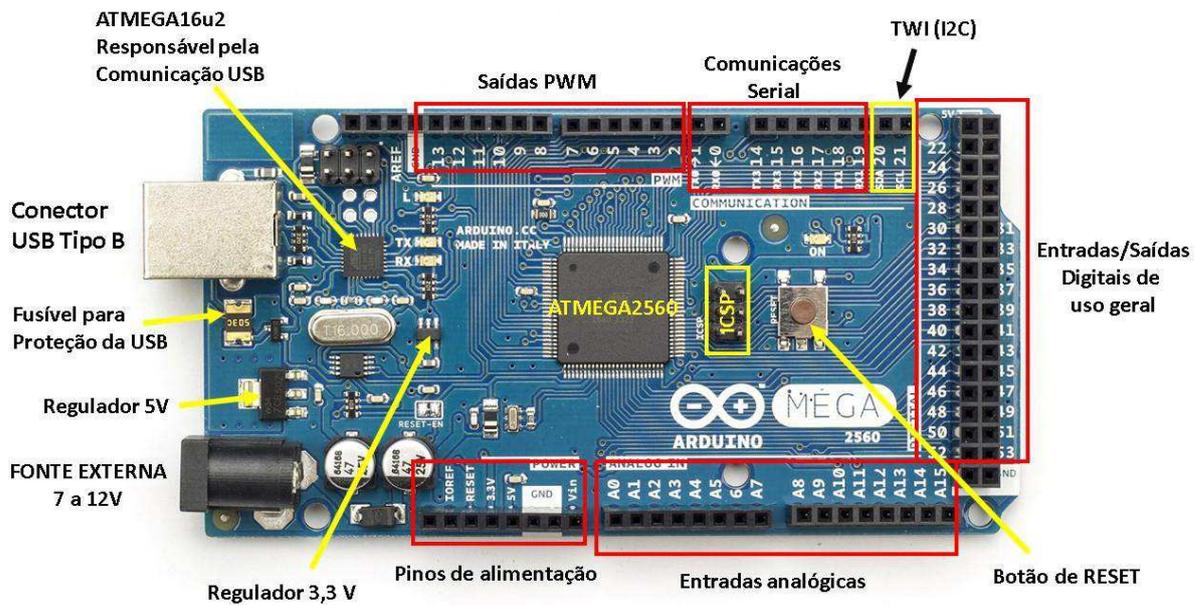


Fonte: Fernandes (2021)

O Arduino MEGA possui 54 pinos digitais de Entrada/Saída e 16 entradas analógicas, conector USB (*Universal Serial Bus* - Porta universal), conector ICSP (*In-Circuit Serial Programming*), conector de fonte externa e reguladores de tensão para 5 V e 3 V que alimentam o processador.

A Figura 3.6 apresenta a distribuição dos blocos e seus posicionamentos na placa Arduino.

Figura 3.6 - Distribuição dos blocos na placa Arduino.



Fonte: Fernandes (2021)

A seguir, são apresentados cada um desses blocos e algumas de suas características individuais:

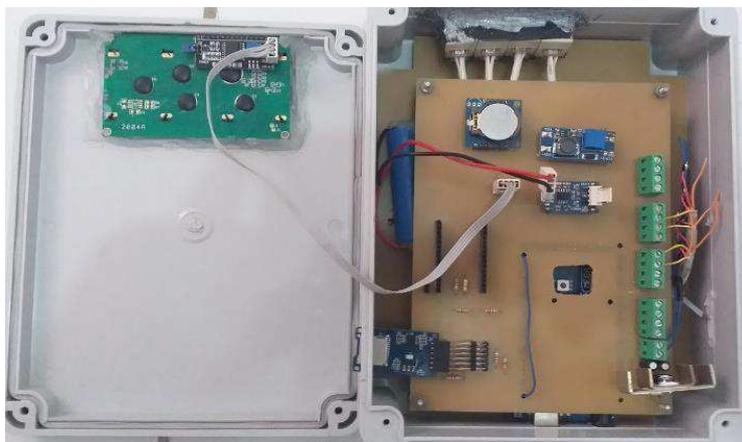
- **Conector USB:** Porta de comunicação responsável por conectar o Arduino ao computador;
- **Pinos de entrada e saída:** Pinos programáveis para interação com o meio externo. Podem ser analógicos ou digitais. O número de pinos varia com o modelo do Arduino;
- **Pinos de alimentação:** Fornece valores diversos de tensão que podem energizar os componentes ligados ao Arduino;
- **Botão Reset:** Reinicia a placa do Arduino;
- **Conversor Serial-USB e LEDs TX/RX:** Chip responsável pela comunicação entre o computador e o microcontrolador. Os LEDs indicam se o microcontrolador está gravando alguma informação (TX) ou lendo alguma informação (RX);

- **Conector de alimentação:** Responsável por receber energia externa e alimentar o Arduino. A tensão pode variar de 7 a 20 Volts, porém, recomenda-se 9 Volts;

Neste trabalho, a leitura dos dados (temperatura e umidade relativa do ar) é realizada a cada minuto e são mostrados em um *display* de LCD (*Liquid Crystal Display*), automaticamente. Além disso, estes dados também são gravados em leitura de 1 minuto. Para esta gravação, optou-se por um armazenamento periférico dos dados, tipo cartão de memória micro SD (*Secure Digital*). Esta tecnologia foi escolhida para permitir que a aquisição dos dados de secagem fosse contínua e de forma autônoma.

Na Figura 3.7, é apresentado todo o Sistema de Medição e Aquisição de Dados utilizado no experimento e a caixa onde fica acomodado, protegido das intempéries ocasionais presentes nos momentos de execução de experimentos.

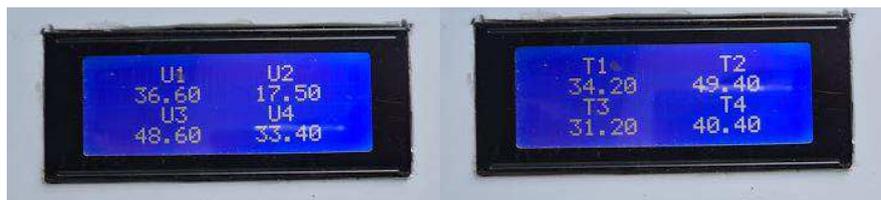
Figura 3.7 - Sistema de medição e aquisição de dados em sua caixa de proteção.



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 3.8 mostra o *display* de LCD com uma leitura de temperatura e umidade relativa. O *display* foi responsável pela exibição dos dados de medição em tempo real, com o intuito de acompanhar e auditar qualquer inconsistência dos dados que estavam sendo armazenados, fornecendo mais segurança e confiabilidade aos dados registrados.

Figura 3.8 - Apresentação do *display* LCD.



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 3.9 mostra a parte externa da caixa de proteção do Arduino, onde pode-se ver o compartimento para inserção com o próprio cartão SD – periférico de saída do sistema Arduino para o registro dos dados obtidos.

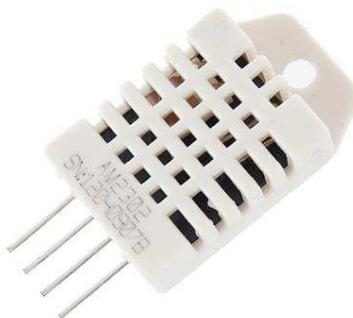
Figura 3.9 - Apresentação do compartimento para inserção do cartão SD.



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 3.10 mostra o sensor do tipo DHT22, responsável pela leitura dos dados de temperatura e umidade relativa do ar e envio destes à placa Arduino. É um sensor de temperatura e umidade relativa que permite realizar leituras de temperatura na faixa de -40°C a 80°C, com umidade relativa entre 0 e 100%. O DHT22 é composto por um sensor de umidade capacitivo e um termistor para medir a temperatura do ar ao redor.

Figura 3.10 - Sensor DHT22 para leitura de temperatura e umidade relativa do ar.



Fonte: Próprio Autor.

As umidades relativas e as temperaturas do ar de secagem, medidas nas diversas posições de interesse ao longo do dia, foram organizadas em tabelas onde tiveram-se os valores expostos, separadamente, para cada variável medida em cada sensor, especificamente.

A Tabela 3.1 mostra o modelo utilizado para coleta e análise dos dados de temperatura nos diversos experimentos realizados.

TABELA 3.1- Modelo de tabela de distribuição de temperatura e umidade do ar no secador.

Data	Tempo de Experimento (min)	Hora	Temp. Ambiente	Umidade Relativa Ambiente	Secador Policarbonato		Secador Polipropileno	
					Ts (°C)	URs (%)	Ts (°C)	URs (%)
//_	0	9:00						
	60	10:00						
	120	11:00						
	180	12:00						
	240	13:00						
	300	14:00						
	360	15:00						
	420	16:00						
	480	17:00						

Fonte: Autor

Onde:

$T_{\text{emp Ambiente}}$ = Temperatura do ar ambiente ($^{\circ}\text{C}$) = a mesma de entrada nos secadores;

$U_{\text{mid Ambiente}}$ = Umidade relativa do ar ambiente (%) = a mesma de entrada nos secadores;

T_s = Temperatura do ar medida na saída do secador solar ($^{\circ}\text{C}$);

UR_s = Umidade relativa do ar medida na saída do secador solar (%);

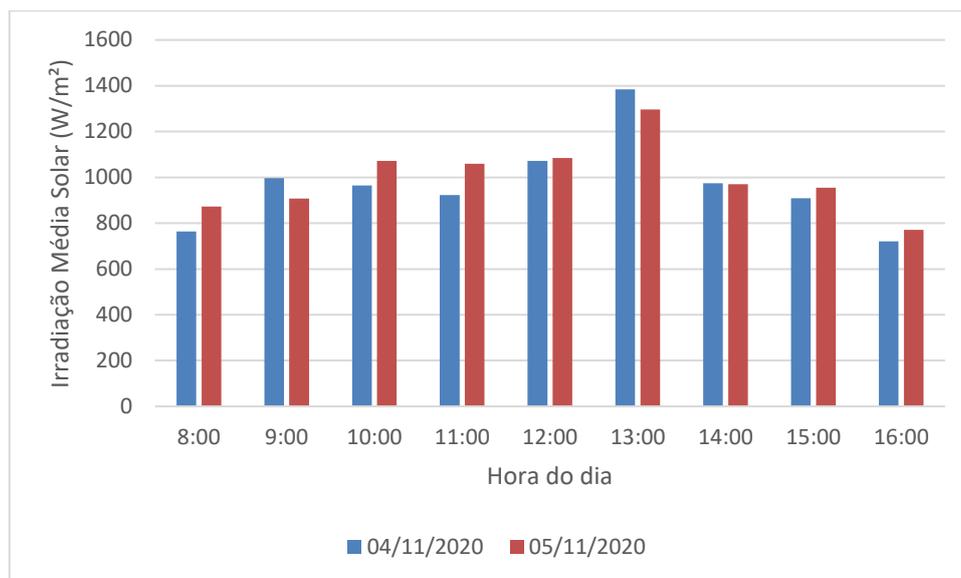
Os valores de temperatura e umidade do ar medidos e apresentados nos quadros puderam ser plotados em gráficos que permitiu observar a variação da temperatura e umidade medida por cada sensor, ao longo de um dia de experimento.

3.4.2 Medição da energia solar

Neste trabalho, para a determinação da irradiação solar incidente e consequente potência solar por unidade de área (W/m^2), foram utilizados os dados fornecidos pela estação meteorológica localizada em Patos/PB (estação A321, dados do INMET), distante a 60 km da cidade de Assunção. A estação foi escolhida devido a sua maior proximidade da cidade e também por ambas estarem localizadas no mesmo microclima.

Outra fonte de dados foi a estação de medição solar da Universidade Federal de Campina Grande, localizada no LEIAM (Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas), prédio ao lado do LEMT. A partir dos dados fornecidos sobre média horária de irradiação solar, obteve-se o gráfico mostrado na Figura 3.11. A vantagem desse tipo de gráfico se deve a praticidade de apresentar e analisar os dados da variação a cada hora e ao longo do dia.

Figura 3.11 - Intensidade média de irradiação solar medida em dois dias de experimento.



Fonte: Próprio Autor.

3.5 O PROCESSO DE SECAGEM

Inicialmente, foi determinado o teor de umidade inicial do produto. Foi separada uma amostra de 200 g de torta de caulim e levada à estufa, a uma temperatura de 100°C, com o objetivo de remover toda a água presente. O material permaneceu na estufa por 24hrs. Observou-se, após este procedimento, que a massa seca de caulim foi de 140 g, o que permitiu inferir que a torta de caulim sai da etapa do filtro prensa e vai para a secagem com teor de água em base úmida igual a 30%.

Os dados experimentais referentes à variação da massa do caulim, durante o processo de secagem, foram obtidos em intervalos regulares de 01 (uma) hora, fazendo-se a retirada do caulim do secador e medindo-se sua massa com uso de uma balança digital com precisão de 0,01 g, mostrada na Figura 3.12. A vantagem desse tipo de gráfico é que ele permite observar a variação a cada hora ao longo do dia, mostrando claramente a interferência de nuvens e de outros fenômenos climáticos que acabam por influir na variação de temperatura do ar de secagem.

Figura 3.12 - Balança de precisão.

Fonte: Autor

A medida da massa, em cada instante de cada experimento e em cada um dos três processos de secagem, foi registrada em uma tabela, conforme o modelo mostrado no Tabela 3.2, em que constam o tempo em que ocorre a medição, a massa medida, além de outros dados que são calculados, como a razão de umidade (RU).

TABELA 3.2 - Modelo de tabela utilizada para registrar os dados de massa.

Data	__/__/__	Amostra Ambiente				Secador Policarbonato				Secador Polipropileno			
Tempo de experimento (min)	Hora do dia (h)	Massa total (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	RU	Massa total (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	RU	Massa total (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	RU
0	08:00												
60	9:00												
120	10:00												
180	11:00												
...	...												
...	...												
Última medição	17:00												

Fonte: Próprio Autor.

No mesmo quadro, a partir desses registros iniciais, é possível calcular o teor de água em base seca e em base úmida e a razão de umidade (RU), que será utilizada para construir a curva de cinética de secagem (RU x tempo).

3.5.1 Determinação das curvas de secagem

As curvas de secagem, também denominadas de cinética de secagem, indicam a relação entre a razão de umidade em função do tempo de secagem. Para obtenção das curvas experimentais de secagem em cada experimento, foram calculadas a Razão de Umidade através da Equação 3.2.

$$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (3.2)$$

Onde,

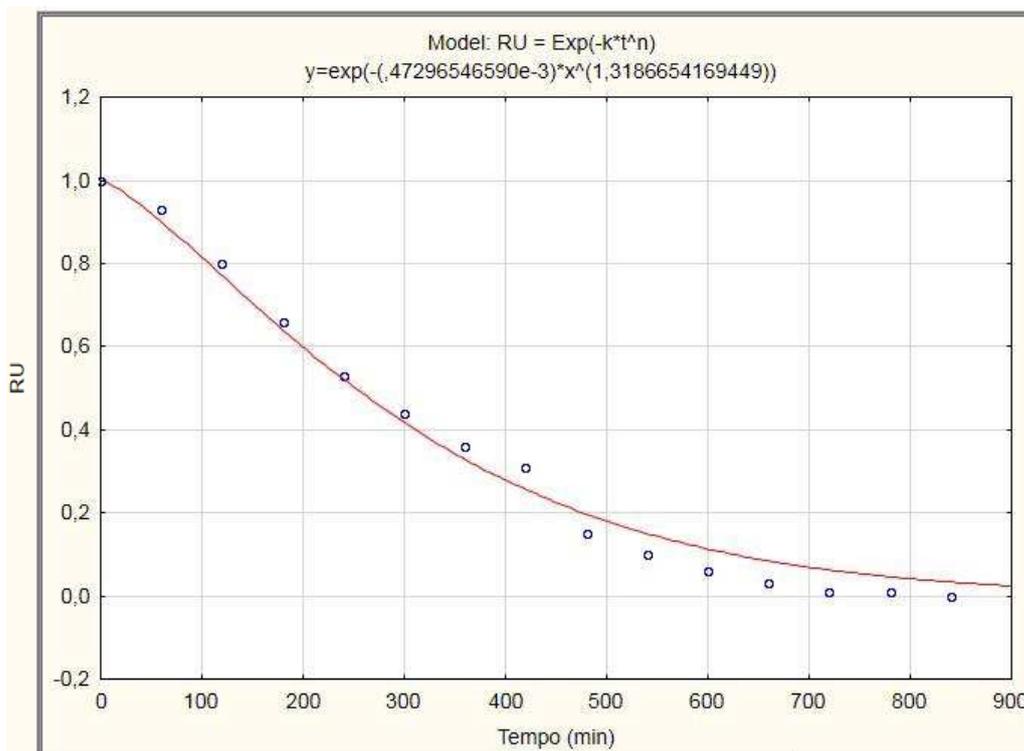
RU = razão de umidade, base seca;

X = teor de umidade, base seca;

X_e = teor de umidade de equilíbrio, base seca;

X₀ = teor de umidade inicial, base seca.

As curvas de secagem, também conhecidas como curvas de cinética de secagem, são plotadas em gráficos cujo modelo pode ser visto na Figura 3.13.

Figura 3.13 - Modelo de curva de secagem ajustada pelo modelo de Page.

Fonte: Próprio Autor.

A Figura 3.13 apresenta um exemplo de curva de secagem ajustada pelo modelo matemático de Page. Os pontos na curva representam os valores reais obtidos experimentalmente para a razão de umidade e a linha cheia representa o ajuste do modelo matemático proposto aos pontos.

A avaliação do processo de secagem, obtido experimentalmente, é realizada comparando os valores experimentais com os modelos matemáticos descritos na literatura. Realizou-se a coleta dos parâmetros necessários à determinação das curvas de secagem (razão de umidade e tempo) e calculou-se por meio do *software* e utilizando o programa computacional *Statistica* versão 7.0 e o modelo matemático de Page ajustado aos dados obtidos, conforme Tabela 3.3. Observou-se a aderência ao modelo proposto a partir do coeficiente de determinação (R^2) e verificou-se a predição do processo.

Tabela 3.3 - Modelo matemático empregado para ajustes dos dados de secagem.

Modelo	Equação	Nº de grandezas	Referência
Page	$RU = \exp(-k \cdot t^n)$	3	Orikasa <i>et al.</i> (2014)

Fonte: Orikasa *et al.* (2014).

Onde:

k = constante do modelo;

n = parâmetro do modelo;

t = tempo de secagem [min].

3.6 ANÁLISE ENERGÉTICA DO DESEMPENHO

Neste trabalho, foram coletados os dados de temperatura e umidade relativa do ar de secagem na entrada, no interior e na saída do secador solar. Isto possibilita o cálculo do rendimento térmico do secador solar, utilizando o balanço de energia a ser aplicado.

3.6.1 Cálculo do rendimento térmico a partir do balanço energético

Para calcular utilizando os conceitos termodinâmicos derivados da conservação da massa e da Primeira Lei da Termodinâmica, foi necessário fazer a aquisição dos dados de temperatura e umidade relativa do ar.

3.6.1.1 Conceitos termodinâmicos

Para avaliação do desempenho do secador, alguns conceitos termodinâmicos e da transferência de calor e massa foram aplicados ao secador solar testado. A partir do balanço de energia no coletor solar, aplicando as equações de continuidade (conservação da massa) e a Primeira Lei da Termodinâmica, foi possível obter a equação usada para calcular a eficiência térmica do secador solar.

Para a obtenção dos valores da eficiência térmica, foi necessário medir a temperatura, a umidade relativa e a velocidade do ar de secagem na entrada e na saída de cada secador solar.

Os conceitos apresentados foram analisados via volumes de controle, visto que os dispositivos trabalham com fluxo de massa e de energia.

3.6.1.2 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 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 3.3:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (3.3)$$

Onde:

$\frac{dm_{vc}}{dt}$ = taxa temporal da variação da massa contida no interior do volume de controle $\left(\frac{kg}{s}\right)$;

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

3.6.1.3 Cálculo do rendimento térmico do secador solar pela 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”.

Aplicou-se o Princípio da Conservação da Energia ao volume de controle, representado matematicamente pela Equação 3.4:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (3.4)$$

Onde:

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

\dot{Q}_{vc} = taxa de transferência de calor ao longo da fronteira (superfície de controle) do volume de controle (W);

\dot{W}_{vc} = taxa de transferência por trabalho ao longo da fronteira (superfície de controle) do volume de controle (W);

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

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

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

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

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);

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

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

A vazão mássica do fluido de trabalho para o coletor solar (onde a massa de ar que entra é a mesma que sai), pode ser calculada pela Equação 3.5.

$$\dot{m} = \rho_e V_e A_e = \rho_s V_s A_s \quad (3.5)$$

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 $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$;

V_e = Velocidade de entrada 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);

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

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

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

A medição da velocidade do ar que passa através das seções de entrada e saída do secador foram executadas pela utilização de um anemômetro digital portátil, mostrado na Figura 3.14, modelo VEC-GM 8901, marca Vectus. Este equipamento foi utilizado para medições pontuais da velocidade do ar com o objetivo de corroborar na validação dos resultados obtidos no anemômetro de copo, localizado próximo ao secador e que, conectado ao Arduino, os dados de velocidade do ar de entrada do secador também foram registrados.

Figura 3.14 - Anemômetro digital utilizado no trabalho.



Fonte: Autor

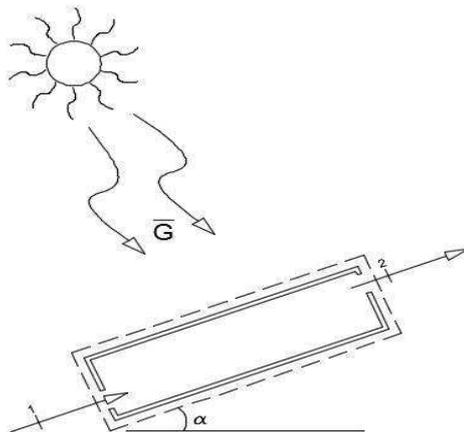
3.6.1.4 Cálculo da eficiência pela Primeira Lei da Termodinâmica

Para a execução dos cálculos, será aplicada a Primeira Lei da Termodinâmica ao secador solar. Para isso, faz-se necessário, inicialmente, a definição de um volume de controle e sua respectiva fronteira.

Nesta sub-seção, é apresentada a metodologia empregada para calcular a eficiência térmica a partir das propriedades termodinâmicas envolvidas no processo de secagem. Com o auxílio de equações, será calculada a eficiência do sistema de secagem a partir do balanço de energia aplicado ao secador solar.

Na Figura 3.15, pode ser vista uma representação esquemática do volume de controle aplicado ao secador solar.

Figura 3.15 - Representação do volume de controle para o secador solar.



Fonte: Nunes (2016).

Na análise do volume de controle aplicado ao secador solar, as vazões mássicas possuem valores de entrada e saída diferentes. Neste caso, a massa que sai do secador solar é maior que a massa que entra no mesmo, e isto devido ao fato de a massa que sai é igual a soma da massa que entrou mais a massa de água que está sendo retirada do caulim durante o processo de secagem. Logo, tem-se:

$$\dot{m}_s = \dot{m}_e + \dot{m}_{\text{água ret do caulim}} \quad (3.6)$$

Onde:

$$\dot{m}_{\text{água ret do caulim}} = \text{Vazão mássica de água removida do caulim} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right).$$

Aplicando a Primeira Lei da Termodinâmica, dada pela Equação geral 3.4, considera-se que a energia cinética e a energia potencial na entrada e saída do coletor solar são iguais, o que é perfeitamente aceitável, dadas as características construtivas e operacionais do coletor solar ($EC_E = EC_S$ e $EP_E = EP_S$). Considera-se, também, que o trabalho realizado pelo secador solar é nulo, porque não se trata de uma máquina térmica (não realiza trabalho) e sim de um aparelho térmico, isto é:

$$\dot{W}_{e-s} = 0 \quad (3.7)$$

Com estas considerações, a Equação 3.4 fica apresentada na forma dada pela Equação 3.8:

$$\dot{Q}_{e-s} + \dot{m}_e h_e = \dot{m}_s h_s + \dot{E}_b \quad (3.8)$$

Onde:

\dot{Q}_{e-s} é o \dot{Q} *real*, ou seja, é a energia realmente transferida para o ar que, neste caso, é o fluido de trabalho.

\dot{E}_b = Energia retirada do caulim.

Em que:

$$\dot{E}_b = h_v \times \dot{m}_{\text{água ret do caulim}} \quad (3.9)$$

onde:

h_v = Entalpia de vaporização da água na temperatura média de saída

Aplicando, pela Primeira Lei da Termodinâmica, o conceito de eficiência térmica para um volume de controle, chega-se à expressão que representa o rendimento térmico do secador solar dado pela Equação 3.10:

$$\eta_{secador} = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{solar}} = \frac{\dot{m} (h_s - h_e) + \dot{E}_b}{A \cdot \bar{G}_{solar}} \quad (3.10)$$

Onde:

A = Área da cobertura transparente do secador solar (m^2);

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

3.6.1.5 Cálculo da quantidade de massa de água retirada por experimento

Considerando que, durante cada experimento, o caulim, em todas as situações (cobertura de policarbonato, cobertura de polipropileno e ao ar livre), teve a mesma exposição à energia solar (visto que as três situações eram expostas simultaneamente às mesmas condições de radiação e fluxo de ar) e durante o mesmo período, é possível comparar a quantidade de massa de água retirada do produto. Para isso, foi desenvolvido uma forma de medir a perda de água do produto em função do tempo total do experimento. Esse indicador mostra a quantidade de água retirada, por hora, durante todo o processo. A Equação 3.11 apresenta os parâmetros necessários para essa determinação:

$$\Delta m / \Delta t = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{t_{total}} \quad (3.11)$$

Onde:

$\Delta m / \Delta t$ = Quantidade de água retirada no intervalo Δt (g/h) ;

$m_{inicial}$ = Massa inicial do produto (g);

m_{final} = Massa final do produto (g);

t_{total} = tempo total do experimento (h).

Com este parâmetro, pode-se comparar os diferentes processos de secagem de cada experimento e analisar, de forma mássica (massa de água do produto), a velocidade média de secagem. Também foi possível observar qual processo foi mais eficiente, do

ponto de vista mássico - quantidade de água retirada do produto por tempo - durante o experimento.

3.6.1.6 Cálculo do consumo específico de energia (CEE) dos processos de secagem

O cálculo do consumo específico de energia, que é a quantidade de energia necessária para evaporar uma unidade de massa de água presente no produto durante os processos de secagem, foi realizado em todos os testes. A Equação 3.12 foi utilizada, neste trabalho, para determinar o consumo específico dos processos de secagem. O resultado do cálculo do consumo específico de energia foi um dos principais indicadores de rendimento dos sistemas de secagem estudados neste trabalho.

$$CEE = \frac{EC \cdot (100 - U_f)}{m_i \cdot (U_i - U_f)} \quad (3.12)$$

Onde:

CEE = consumo específico total de energia kJ/kg de água evaporada;

EC = energia consumida na secagem (térmica), kJ;

U_i = teor de água inicial do produto, % b.u.;

U_f = teor de água final do produto, % b.u.;

m_i = massa inicial do produto.

Como forma de sintetizar os resultados obtidos, a Tabela 3.4 apresenta os principais resultados para que seja possível comparar os parâmetros analisados em cada um dos experimentos realizados.

Tabela 3.4- Resultados de rendimento térmico, quantidade de água retirada e CEE para o Experimento.

	Rendimento térmico (%)	Quantidade de água ret. no intervalo de tempo (g/h)	CEE (kWh/kg)
Secador policarbonato			
Secador polipropileno			
Secagem natural			

Fonte: Próprio Autor.

Capítulo IV
RESULTADOS E DISCUSSÕES

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PROPOSTAS DE MODIFICAÇÕES

A partir dos estudos *in loco* e visitas a diversas plantas de beneficiamento de caulim, além da análise específica da fase de secagem do minério, observou-se uma série de medidas e alterações nos processos e em equipamentos que podem otimizar tal etapa. Diversas mudanças estruturais, como de procedimentos, resultam em ganhos energéticos e redução de tempo de secagem, tornando tal atividade mais eficiente.

4.1.1 Mudanças estruturais

Durante a pesquisa, não foi possível identificar um projeto padronizado, de estruturas já existentes, usado para a secagem de caulim. O tamanho dos pátios de secagem e suas dimensões não seguiam qualquer padrão e nem estavam de acordo com a demanda de produção.

Observou-se grandes estruturas, com pouca quantidade de material secando, bem como outras pequenas onde era observado que a alta quantidade de caulim, ali presente, estava acima da capacidade de disposição do material. As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 mostram exemplos de divergência em diversos quesitos como altura do telhado, área de disposição do material, tipo de cobertura utilizada, tipo de tijolo utilizado, bem como a presença de parede lateral. Aspectos podem ser levados em consideração para a determinação de uma estrutura otimizada.

Figura 4.1 - Sistema de secagem utilizado na empresa A.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.2 - Sistema de secagem utilizado na empresa B.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.3 - Estrutura de secagem da empresa C.



Fonte: Próprio Autor.

Para uma melhor eficiência no processo de secagem, são apresentadas algumas sugestões:

- ✓ A altura do telhado deve ser alta o suficiente para a movimentação de pessoas e manejo do material a ser seco, mas não deve ser extremamente alta para que a temperatura no seu interior seja mantida mais elevada. Recomenda-se a utilização de um pé direito inferior, de 2,2 m, e pé direito superior proporcional ao tamanho da estrutura, mantendo sempre uma angulação de 22°, pois facilitará o fluxo de ar, criando um efeito “bocal” e aumentando a velocidade do fluxo através da estrutura;
- ✓ A cobertura utilizada nessas estruturas pode ser de material que translúcido, um facilitador da transmissão do calor solar (alta transmissividade) e seja capaz de manter o ambiente com temperatura mais elevada (efeito estufa). A utilização de telhas refletivas ou com materiais de pouca absorção e transmissão dificultam a secagem;
- ✓ A utilização de tijolos refratários que possam manter a temperatura elevada por um período mais longo; no caso dos fornos, são facilitadores da manutenção da temperatura maior;

- ✓ A presença de paredes, ou barreiras laterais, pode facilitar e direcionar o maior fluxo do vento, desde que as estruturas estejam posicionadas corretamente (ou seja, aproveitamento da posição de incidência do vento predominante — em geral, essa incidência é Leste, Nordeste e Sudeste na região da PPB). Essas estruturas também protegem o material das impurezas e contaminações ao redor, atribuindo ao produto um maior valor. Essas paredes não chegam a impactar consideravelmente na temperatura, mas têm papel importante na preservação do minério em boa qualidade.

A Figura 4.4 mostra uma estrutura de secagem presente na INCOMGEL, com algumas dessas sugestões já implementadas. Foram observados ganhos significativos de temperatura em seu interior quando comparado à secagem ao ar livre. Observe que uma barreira lateral foi feita do próprio minério e o material está disposto no piso de forma a tentar manter uma uniformidade na distribuição e uma grande área de contato da torta com o ar. Os ganhos em temperatura chegaram a ser da ordem de 15%.

Figura 4.4 - Estrutura recém-construída com cobertura de polipropileno.



Fonte: Próprio Autor.

4.1.2 Posicionamento das estruturas e futuras construções

Um fato importante a ser observado nas construções já existentes para a secagem de caulim é a questão do posicionamento de tais estruturas. Não existe um padrão e, aparentemente, as estruturas foram construídas aleatoriamente ou apenas visando o mais fácil manejo do material.

Sabe-se que o vento na região é predominantemente Leste, com variações Sudeste e Nordeste; porém, observam-se diversas estruturas e sistemas de secagem que não se atentam para esse posicionamento. Isto resulta em situações em que, em alguns casos, o caulim deixa de estar embaixo dessas estruturas e está simplesmente disposto pelas regiões onde “corredores de vento” acontecem, acabando por secar o produto mais rápido.

A Figura 4.5, uma foto tirada na empresa JPR Mineração (também da região), mostra um ambiente onde o material depositado ao ar livre acaba por secar de forma mais rápida do que a disposta no sistema de secagem, simplesmente por causa de um “corredor de vento” que provoca um fluxo de ar de secagem, acelerado este processo no local. A disposição ao ar livre, no local, apesar de resultar numa secagem mais rápida, traz outra série de problemas como grande contaminação do caulim local por causa de impurezas que são trazidas no ar.

Figura 4.5 - Corredor de maior circulação de ar na empresa JPR Mineração.



Fonte: Próprio Autor.

4.1.3 Disposição do material

Observou-se, também, que a disposição do material nos sistemas de secagem não segue um padrão de umidade e tamanho. Alguns empreendimentos colocam a torta por inteira já direto nos sistemas de secagem; outros fragmentam, antes, o material em “torrões” menores. Há também o uso de algumas estruturas de prateleiras, que maximizam a capacidade das demais estruturas. Existem ainda outras empresas que apenas colocam o material no piso e espalham de maneira uniforme.

Na situação observada da Figura 4.6, o minério de caulim é seco apenas pela ação do ar seco que circula pelo ambiente, sendo o ambiente mantido à temperatura ambiente, o que também dificulta o processo de secagem, tornando-o mais demorado.

Figura 4.6 - Estrutura de secagem com utilização de prateleiras.



Fonte: Próprio Autor.

Há também aquelas que deixam, no mesmo ambiente, materiais já secos e outros oriundos do processo de secagem, com alto teor de umidade. Isto também prejudica a etapa de secagem, visto que há uma troca de umidade entre eles.

A Figura 4.7 exemplifica tal situação, pois é possível notar o material já seco e o material úmido depositados no mesmo ambiente. Tal situação deveria ser evitada ao máximo, tendo um depósito específico para a disposição do material já seco que será, posteriormente, levado para a etapa de moagem.

Figura 4.7 - Material seco em contato com material úmido.



Fonte: Próprio Autor.

Caso não haja a presença de prateleiras que maximizem a quantidade de material a ser seco, a área de disposição do material deve ser suficientemente grande para que não ocorra a sobreposição das tortas, pois tal ação dificulta a área de contato das tortas de caulim com o fluxo de ar do ambiente.

4.1.4 Utilização de coberturas mais eficientes

Uma das componentes que recebeu maior atenção e pesquisa, durante todo este trabalho, foi o uso de coberturas mais eficientes nos ambientes (galpões) onde ocorre o

processo de secagem. Para que isto ocorra, é necessário que o material da cobertura desses materiais tenha características como:

- Capacidade de proteger de intempéries, como chuva e contaminantes;
- Capacidade de transmitir raios solares para o interior do ambiente;
- Capacidade de manter a temperatura no interior do ambiente (efeito estufa);
- Durabilidade;
- Preço compatível com os custos de produção.

Na região da PPB, a maioria dos sistemas de secagem utilizam telhas de fibra ou cerâmica; em alguns casos, é observado, também, a presença de coberturas de alumínio, como mostrado nas figuras anteriormente citadas. Tais materiais não se mostram os mais eficientes, vistas as suas características e propriedades de transmissão/absorção/reflexão da radiação solar incidente.

Os estudos realizados no LEMT/UFCG sobre secadores solares mostram que a utilização de coberturas de policarbonato e outros compostos sintéticos trazem um ganho significativo para o processo de secagem. O policarbonato mostra-se uma cobertura eficiente do ponto de vista energético. Daí a importância do planejamento das construções e dos materiais a serem utilizados.

4.1.5 Utilização da energia solar para transformação em energia elétrica

Na empresa INCOMGEL, como observado na Figura 4.3, há também a presença de sopradores que aceleram o processo de secagem por convecção forçada. Tais equipamentos possuem um alto consumo de energia elétrica e impactam significativamente nos custos do processo de secagem, quando acionados de forma contínua.

Para solucionar tal problema, é viável a utilização de painéis solares para conversão da energia solar em energia elétrica, visto o alto potencial de irradiação solar na região. Esse investimento serviu não somente para a utilização dos sopradores utilizados para a secagem, mas também para outros equipamentos da planta de beneficiamento que foram alimentados por eletricidade oriunda de painéis fotovoltaicos.

Essa tecnologia já começa a ser colocada em prática na região; porém, de forma incipiente, devido à insegurança, falta de conhecimento e capacidade técnica de instalação na região, bem como os custos de investimento iniciais envolvidos em tais equipamentos. Entretanto, com o crescente aumento da tarifa de energia elétrica, começa a se tornar vantajosa, com um tempo de retorno do investimento cada vez menor.

Como estudo de caso, foi dimensionado para o soprador da empresa INCOMGEL o número de painéis solares necessários para que fosse alimentado completamente por energia solar. O soprador da empresa possui potência de 2.5 kW, com coeficiente de rendimento 0,9. Considerando a radiação média da região como 85% da média dos valores medidos durante os experimentos (visto que os meses de novembro e dezembro são meses de alta incidência de irradiação solar), temos a Tabela 4.1 mostrando as principais informações e cálculos para determinar o número de painéis necessários para manter um equipamento com tais características em funcionamento por 8 horas/dia. Considerou-se, também, um painel de dimensões padrão, de 1,63 m², e eficiência na conversão de energia solar em elétrica de 16,50%.

A partir de tais informações, foi possível determinar o número de painéis necessários para manter o soprador existente na empresa em funcionamento, considerando apenas a quantidade de energia gerada pelas placas fotovoltaicas e que as mesmas estariam ligadas num sistema *ongrid*, com a rede elétrica já existente.

Tabela 4.1 - Dados para dimensionamento de painéis fotovoltaicos para o soprador.

Consumo horário do soprador (teórico)	2,5 kWh
Eficiência do Soprador	0,9
Consumo horário do soprador (real)	2,78 kWh
Irradiação Média (85% da média nos experimentos)	0,835 kWh
Eficiência do painel escolhido:	16,50%
Energia gerada por m ² do Painel (Irradiação X Eficiência)	0,137 kWh/m ²
Área do Painel (99 cm x 165 cm)	1,63 m ²
Total de Painéis	13 painéis

Fonte: Próprio Autor.

4.1.6 Dimensionamento e posicionamento correto dos sopradores de ar

Observou-se, também, que os sopradores de ar não estavam operando com o máximo de eficiência devido a problemas de posicionamento e circulação do ar. As tortas de caulim que estavam mais próximas do soprador secavam mais rápido do que as mais distantes, pois o ar não estava atingindo todas as tortas de modo uniforme, o que dificultava e atrasava a retirada de água do produto.

A sugestão foi anexar, na saída do soprador, um tubo radial perfurado ao longo do corredor de tortas. Com isso, o ar sairia - como ocorre em sistemas de capilaridade - uniforme e atingiria todas as tortas de maneira mais regular e constante; favorecendo, assim, a secagem de todas as tortas num mesmo período e tornando o processo realizado de forma batelada, com todo o produto já à disposição para a próxima etapa.

Vale ressaltar a importância de verificar questões como o tempo de aplicação dos sopradores. A determinação da relação custo/benefício da aplicação desses equipamentos está relacionada ao consumo de energia em função de quanto o processo de secagem pode ser acelerado, com as tortas passando para a etapa de moagem, considerando a demanda por produto. Sendo assim, isso pode variar de acordo com a demanda, sendo necessário um conhecimento das necessidades da empresa, a cada período, para a utilização de tais equipamentos. A utilização de sopradores é viável quando a demanda pelo produto cresce e as condições meteorológicas não estão favoráveis.

Também foi sugerido para a empresa a utilização de um outro sistema que realizasse a circulação de ar por todo o galpão de secagem de forma mais eficiente, e que funcionasse com menor consumo de energia. A substituição do soprador industrial de 2,5 kW de potência por vários ventiladores de menor potência, era capaz de realizar a circulação de ar (sendo o ar ambiente o fluido de transferência de calor) além de diminuir o consumo energético, tornando o processo mais eficiente em todos os aspectos.

Todo esse conjunto de ações visa reduzir o principal impacto ambiental causado pelo beneficiamento do bem mineral na região, com a utilização de lenha como vetor energético no processo de secagem das tortas de caulim.

4.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Quatro experimentos foram realizados e apresentados durante a pesquisa, sendo três na empresa INCOMGEL, em Assunção, e uma na UFCG, em Campina Grande. Todos tinham como objetivo avaliar o comportamento de diferentes coberturas e sua importância para o processo de secagem do caulim. Em cada experimento foram utilizados dois secadores, com as mesmas dimensões e características, e três amostras. Uma amostra foi seca no secador com cobertura de policarbonato, outra no secador com cobertura de polipropileno e uma terceira exposta ao ar livre.

Os Experimentos 1 e 2 (E1 e E2) foram realizados utilizando secadores solares de menor capacidade, no ano de 2020, ambos na empresa INCOMGEL em Assunção (PB). Já os Experimentos 3 e 4 (E3 e E4) foram realizados com o secador solar otimizado, no ano de 2021, sendo o E3 realizado na UFCG em Campina Grande -PB e o E4 também na INCOMGEL, em Assunção – PB. A relevância de realizar um experimento também em Campina Grande-PB está relacionado a testar os secadores com diferentes coberturas em diferentes situações de umidade relativa do ar, velocidade do ar e radiação solar, e atestar assim a sua eficiência e sua capacidade de realizar a secagem do caulim.

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos nos experimentos, sendo medidas as seguintes propriedades:

- ✓ Massa do caulim;
- ✓ Temperatura e umidade relativa do ar ambiente;
- ✓ Temperatura e umidade relativa do ar nas entradas dos secadores solar;
- ✓ Temperatura e umidade relativa do ar nas saídas dos secadores solares;

Para os experimentos realizados, os valores obtidos para variação da massa do caulim e para variação da temperatura e da umidade relativa do ar, medidos a cada hora, são apresentados em tabelas e gráficos.

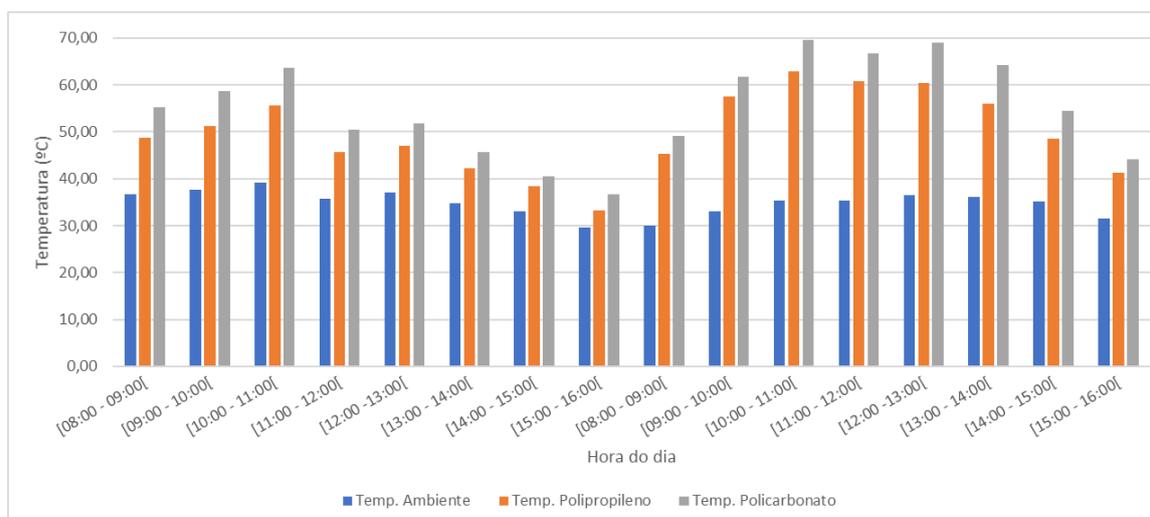
Na sequência, a partir desses valores obtidos, são calculados e apresentados os demais parâmetros necessários à construção das respectivas curvas de secagem, do cálculo do rendimento térmico do equipamento solar.

4.2.1 Experimento 1 (E1) realizado nos dias 4 e 5 de novembro de 2020

Para realização dos experimentos, amostras do caulim foram fragmentadas e posicionadas nas bandejas no interior do secador solar.

Na Figura 4.8, é possível observar os valores obtidos para as temperaturas do ar ambiente (sendo essa a temperatura do ar na entrada em ambos os secadores) e na saída dos dois equipamentos (secador solar com cobertura de policarbonato e com cobertura de polipropileno). Observam-se altas temperaturas na saída do secador; valores estes que, normalmente, são conseguidos no processo de secagem nas indústrias com uso intensivo de energia térmica proveniente da queima de lenha em fornos. Portanto, a redução no impacto ambiental e no passivo gerado pode ser utilizada para demonstrar a viabilidade técnica dos equipamentos desenvolvidos e sua funcionalidade operacional.

Figura 4.8 - Distribuição de temperatura do ar ambiente na entrada e na saída dos secadores durante o Experimento 1.



Fonte: Próprio Autor.

Observa-se, também, que a temperatura do ar de saída do secador com cobertura de policarbonato é sempre superior, levantando-se, inicialmente, a hipótese de que sua eficiência de secagem seria também superior.

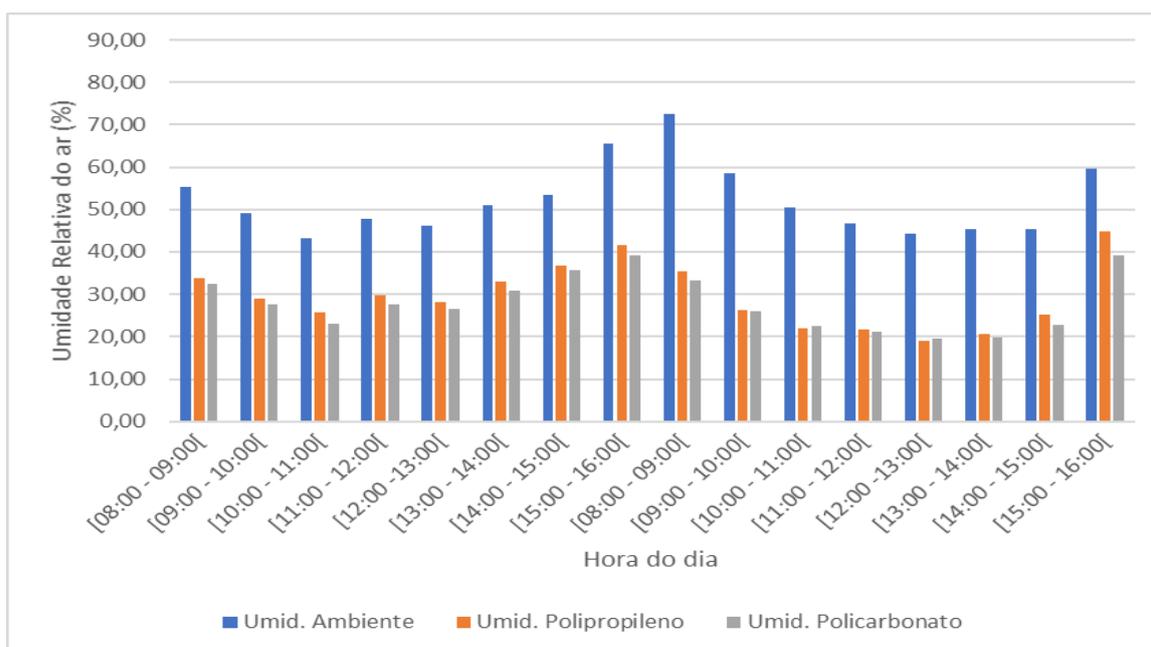
A partir dos valores obtidos, mostrados na Figuras 4.11, percebe-se que a temperatura do ar na entrada esteve, durante todo o experimento, acima de 28°C. Observa-se um ganho de até 35°C de temperatura em horários de maior incidência solar,

corroborando com a ideia de que a cobertura, juntamente com os demais componentes do sistema de secagem, atuam como indutores do efeito estufa, tornando o ambiente do interior do secador com temperatura mais elevada e mais eficiente para realizar o processo de secagem. Este ganho de temperatura foi observado durante todo o processo e torna-se mais acentuado durante o horário de 10 h às 14 h.

Essa variação de temperatura, ao longo do processo de secagem, já era esperada devido à intermitência normal que existe nos processos que utilizam a fonte solar. Isso decorre do fato de que a intensidade de radiação solar também tem um comportamento equivalente a este.

A Figura 4.9 mostra a variação da umidade relativa do ar ambiente nos dois secadores durante o experimento. Nota-se que este valor é significativamente menor nos equipamentos em relação ao ambiente, tornando o processo de secagem mais eficiente. Esta variação se dá pelas propriedades higroscópicas do ar aquecido. Os valores, em ambos os secadores, são próximos, estando, ambos, dentro da margem de erro inferida do sensor (DHT 22) pelo fabricante, que é da ordem de 5%. Os valores de temperatura variaram de 40 a 70 °C, estando sempre superiores a temperatura ambiente medida.

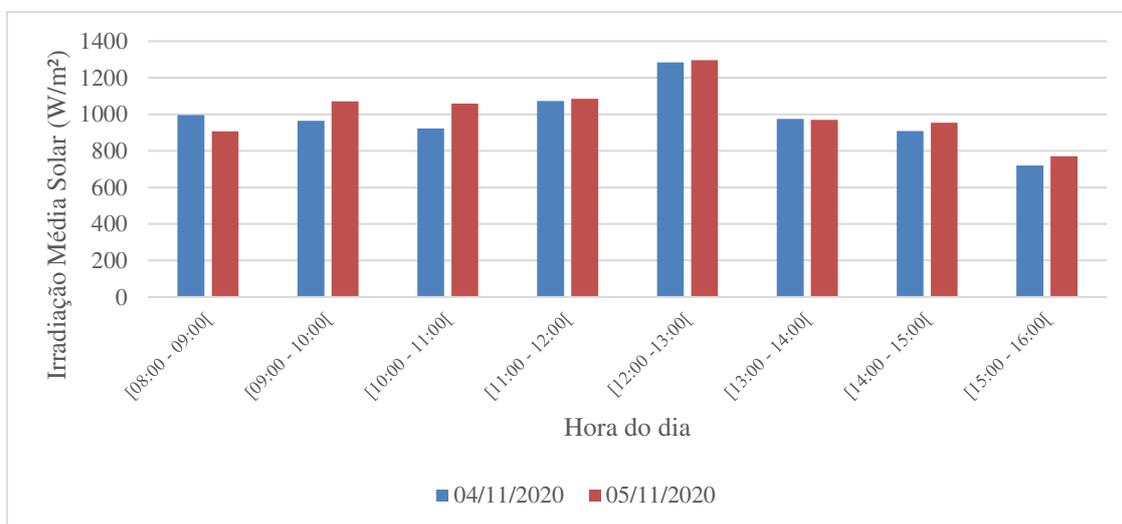
Figura 4.9 - Distribuição da umidade relativa do ar ambiente na entrada e na saída dos secadores durante o Experimento 1.



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 4.10 mostra os valores registrados da média horária da intensidade de radiação solar, nos dias em que foram feitos os testes. É possível observar que as condições climáticas eram favoráveis, registrando altos níveis de irradiação. Isso se mostrou primordial para o bom desempenho dos equipamentos no processo de secagem. Neste experimento, obteve-se uma irradiação média de, aproximadamente, 983,07 W/m². Os dados de radiação solar também se encontram nos apêndices, apresentando os valores medidos ao longo de todos os experimentos.

Figura 4.10 - Média das irradiações durante o Experimento 1.



Fonte: Próprio Autor.

Na Tabela 4.2, são apresentados os valores obtidos para massa de caulim a cada 60 minutos de teste, sendo a primeira medição às 8:00 h e a última do dia às 16:00 h, para os dois dias do experimento (4 e 5 de novembro de 2020).

Tabela 4.2 - Dados de massa obtidos no Experimento 1.

Tempo de experimento (min)	Hora do dia (h)	Amostra Ambiente					Secador 1 (policarbonato)					Secador 2 (polipropileno)				
		Massa total (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	RU	Massa total (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	RU	Massa total (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	RU
0	08:00	200,00	140,00	0,30	0,43	1,00	200,00	140,00	0,30	0,43	1,00	200,00	140,00	0,30	0,43	1,00
60	09:00	197,40	140,00	0,29	0,41	0,95	199,80	140,00	0,30	0,43	1,00	196,60	140,00	0,29	0,40	0,94
120	10:00	195,20	140,00	0,28	0,39	0,91	194,10	140,00	0,28	0,39	0,90	191,00	140,00	0,27	0,36	0,84
180	11:00	191,70	140,00	0,27	0,37	0,84	190,00	140,00	0,26	0,36	0,83	185,50	140,00	0,25	0,33	0,73
240	12:00	187,50	140,00	0,25	0,34	0,76	188,10	140,00	0,26	0,34	0,80	179,40	140,00	0,22	0,28	0,62
300	13:00	183,60	140,00	0,24	0,31	0,68	179,90	140,00	0,22	0,29	0,66	173,20	140,00	0,19	0,24	0,51
360	14:00	181,70	140,00	0,23	0,30	0,64	176,70	140,00	0,21	0,26	0,60	169,90	140,00	0,18	0,21	0,45
420	15:00	179,50	140,00	0,22	0,28	0,60	174,30	140,00	0,20	0,25	0,56	166,10	140,00	0,16	0,19	0,38
480	16:00	178,50	140,00	0,22	0,28	0,58	173,20	140,00	0,19	0,24	0,54	163,70	140,00	0,14	0,17	0,34
540	09:00	171,10	140,00	0,18	0,22	0,43	163,70	140,00	0,14	0,17	0,38	155,30	140,00	0,10	0,11	0,18
600	10:00	169,30	140,00	0,17	0,21	0,40	161,20	140,00	0,13	0,15	0,34	152,90	140,00	0,08	0,09	0,14
660	11:00	165,30	140,00	0,15	0,18	0,32	156,10	140,00	0,10	0,12	0,25	150,70	140,00	0,07	0,08	0,10
720	12:00	161,00	140,00	0,13	0,15	0,24	150,50	140,00	0,07	0,08	0,16	149,00	140,00	0,06	0,06	0,07
780	13:00	156,90	140,00	0,11	0,12	0,16	146,40	140,00	0,04	0,05	0,09	147,50	140,00	0,05	0,05	0,04
840	14:00	152,80	140,00	0,08	0,09	0,08	143,40	140,00	0,02	0,02	0,04	146,30	140,00	0,04	0,04	0,02
900	15:00	150,6	140,00	0,07	0,08	0,03	141,70	140,00	0,01	0,01	0,01	145,80	140,00	0,04	0,04	0,01
960	16:00	148,9	140,00	0,06	0,06	0,00	141,10	140,00	0,01	0,01	0,00	145,40	140,00	0,04	0,04	0,00

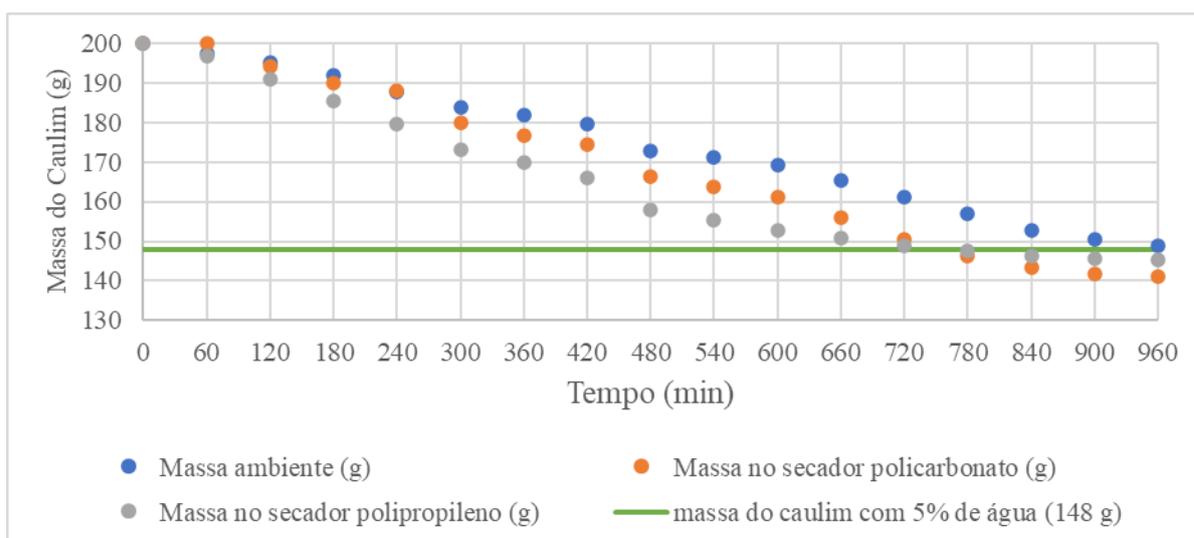
Fonte: Próprio Autor.

Para que o caulim esteja em condições de seguir para a etapa de moagem, é necessário que esteja com um teor de umidade, em base úmida, abaixo de 5%. Se o caulim for para a etapa de moagem sem essas condições, problemas técnicos de empolamento impregnado nos martelos do moinho podem comprometer toda a operação.

No secador com cobertura de policarbonato, depois de 13 horas de secagem, foi obtido o teor de umidade inferior a 5%. No secador com cobertura de polipropileno, o teor de umidade de 5% foi atingido somente após 14 horas de secagem, como mostrado na Figura 4.11 e na Tabela 4.2

A Figura 4.11 traz a variação da massa de caulim *versus* o tempo ao longo do experimento. Tais resultados foram obtidos a partir da Tabela 4.3.

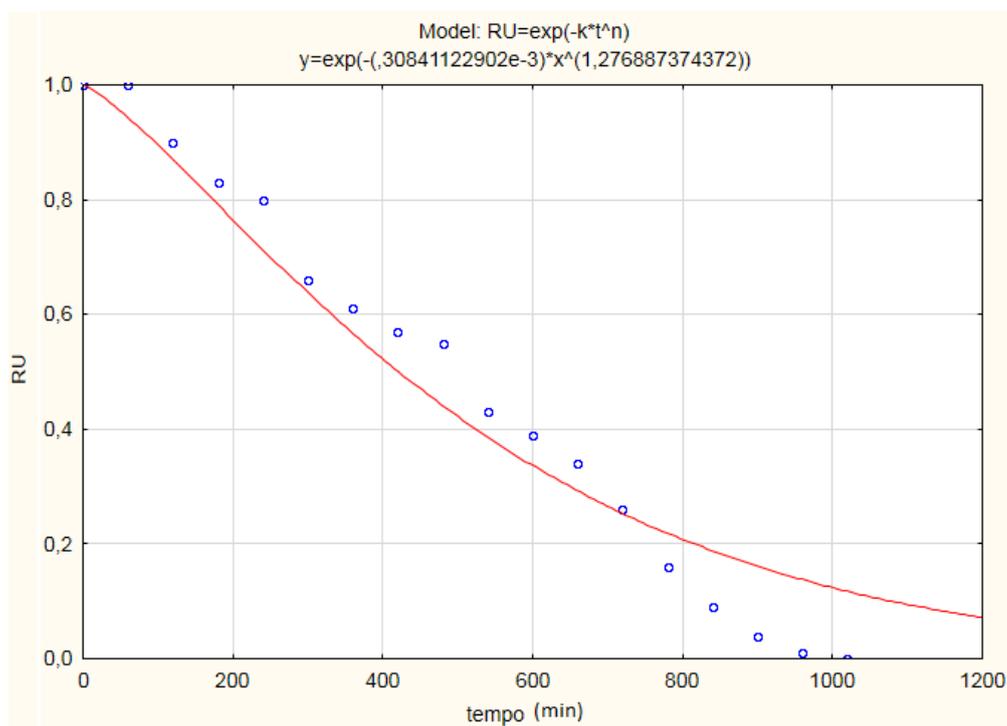
Figura 4.11 - Variação da massa de caulim em relação ao tempo no Experimento 1.



Fonte: Próprio Autor.

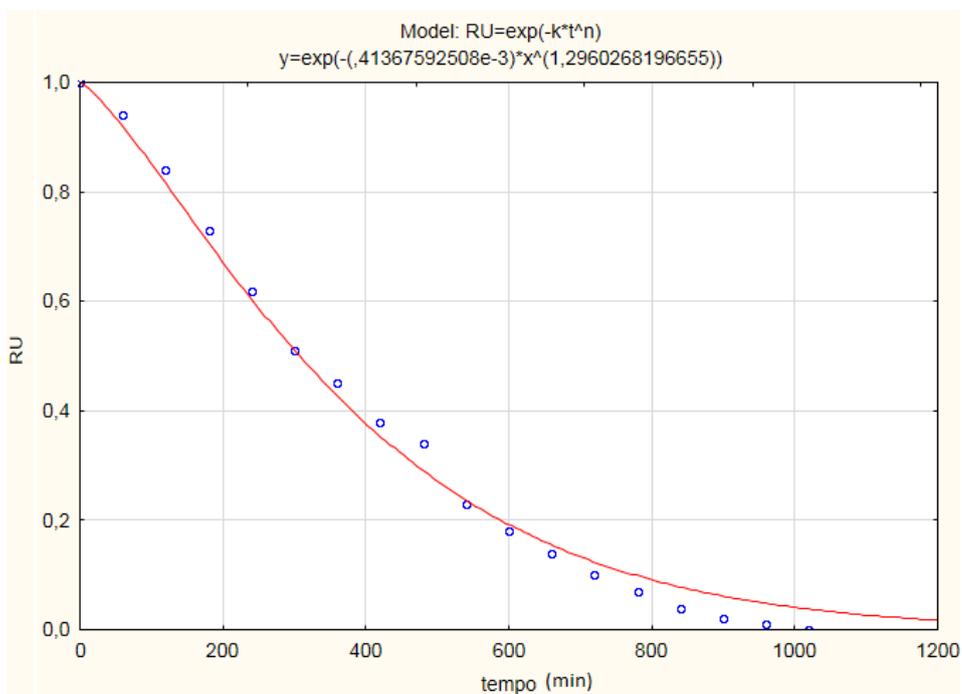
A cinética de secagem, mostradas na Figura 4.15, representam a cinética de secagem com cobertura de policarbonato. A Figura 4.16 representa a secagem com cobertura de polipropileno. Já a Figura 4.17 representa a cinética de secagem ao ar livre. Todas as curvas foram obtidas através dos dados do Quadro 4.1. Nestas figuras, os pontos representam os valores obtidos experimentalmente e a curva em linha cheia representa a cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page.

Figura 4.12 - Cinética de secagem do Experimento 1 para a secagem no secador com cobertura de Policarbonato ajustada ao modelo de Page.



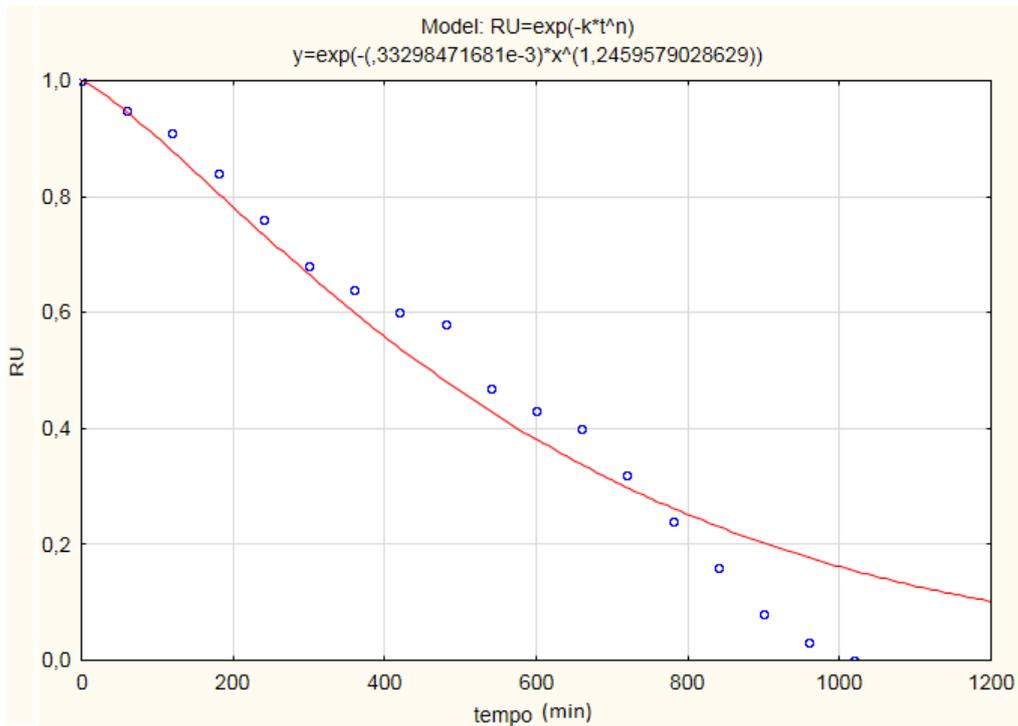
Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.13 – Cinética de secagem do Experimento 1 para a secagem no secador com cobertura de Polipropileno ajustada ao modelo de Page.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.14 - Cinética de secagem do Experimento 1 para a secagem ao ar livre ajustada ao modelo de Page.



Fonte: Próprio Autor.

Através do ajuste do modelo matemático de Page aos dados obtidos, chegou-se a um coeficiente de determinação de 97,53% para o processo de secagem com o secador com cobertura de policarbonato; 97,32% para o processo de secagem com o secador com cobertura de polipropileno e 99,65% para o processo de secagem ao ar livre

Para comparar os experimentos, foi determinada a taxa de massa de água retirada (m_{H_2O}) por experimento para cada situação. Para isso, utilizamos a Equação 3.12, onde substituímos os valores da massa inicial e final da torta de caulim e o tempo total do experimento, obtidos da Quadro 4.1.

Substituindo os valores para o processo de secagem no secador com cobertura de policarbonato, tem-se:

$$\Delta m / \Delta t = \frac{200 \text{ g} - 141,1 \text{ g}}{16 \text{ h}} = 3,68 \text{ g/h}$$

Substituindo os valores para o processo de secagem no secador com cobertura de polipropileno, tem-se:

$$\Delta m/\Delta t = \frac{200 \text{ g} - 145,4 \text{ g}}{16 \text{ h}} = 3,41 \text{ g/h}$$

Substituindo os valores para a secagem ao ar livre, tem-se:

$$\Delta m/\Delta t = \frac{200 \text{ g} - 148,94 \text{ g}}{16 \text{ h}} = 3,19 \text{ g/h}$$

Pode-se inferir que a redução no tempo de secagem está diretamente relacionada à redução da umidade relativa do ar e o aumento da temperatura do ar no interior dos sistemas de secagem.

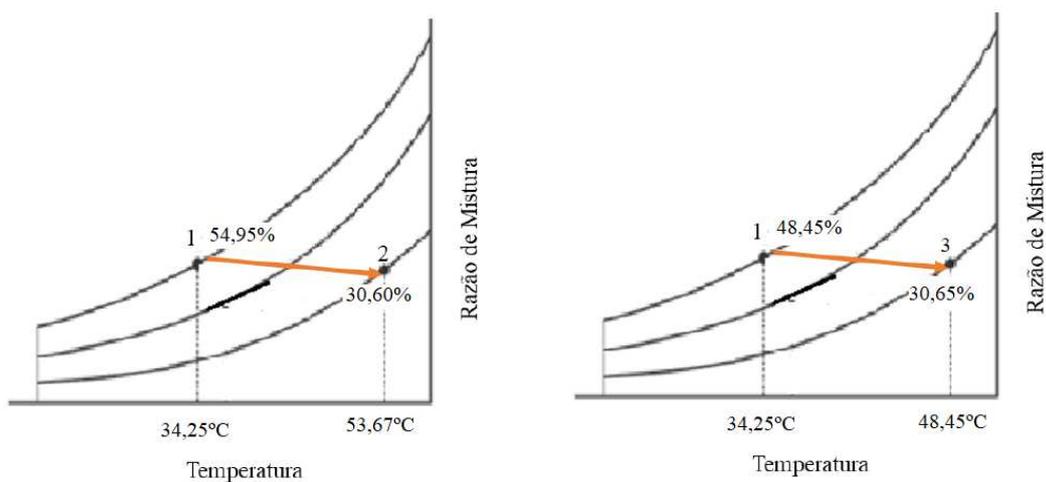
A Figura 4.15 apresenta, na carta psicrométrica, a média da temperatura e umidade relativa do ar durante a realização do experimento.

✓ ponto 1 representa o estado termodinâmico 1, na entrada dos sistemas de secagem com secadores – que é a temperatura ambiente;

✓ ponto 2 representa o estado termodinâmico 2, na saída do secador com cobertura de policarbonato;

✓ ponto 3 representa o estado termodinâmico 3, na saída do secador com cobertura de polipropileno;

Figura 4.15 Condições psicrométricas do ar no Experimento 1.



Fonte: Próprio Autor.

1→ 2 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar ambiente passa do estado 1 para o estado 2 no interior do secador com cobertura de policarbonato. O ar ambiente é aquecido por meio da energia transferida pelo capacitor térmico e, com esse aumento da temperatura do ar (de 30,25°C para 53,67°C), ocorre uma redução da umidade relativa (de 54,95% para 30,60%).

O ar aquecido e com uma umidade relativa menor, ao entrar em contato com as amostras de caulim, provoca uma transferência de calor do fluido de trabalho para o caulim e uma transferência de massa de vapor de água do caulim para o fluido de trabalho, resultando na secagem das amostras.

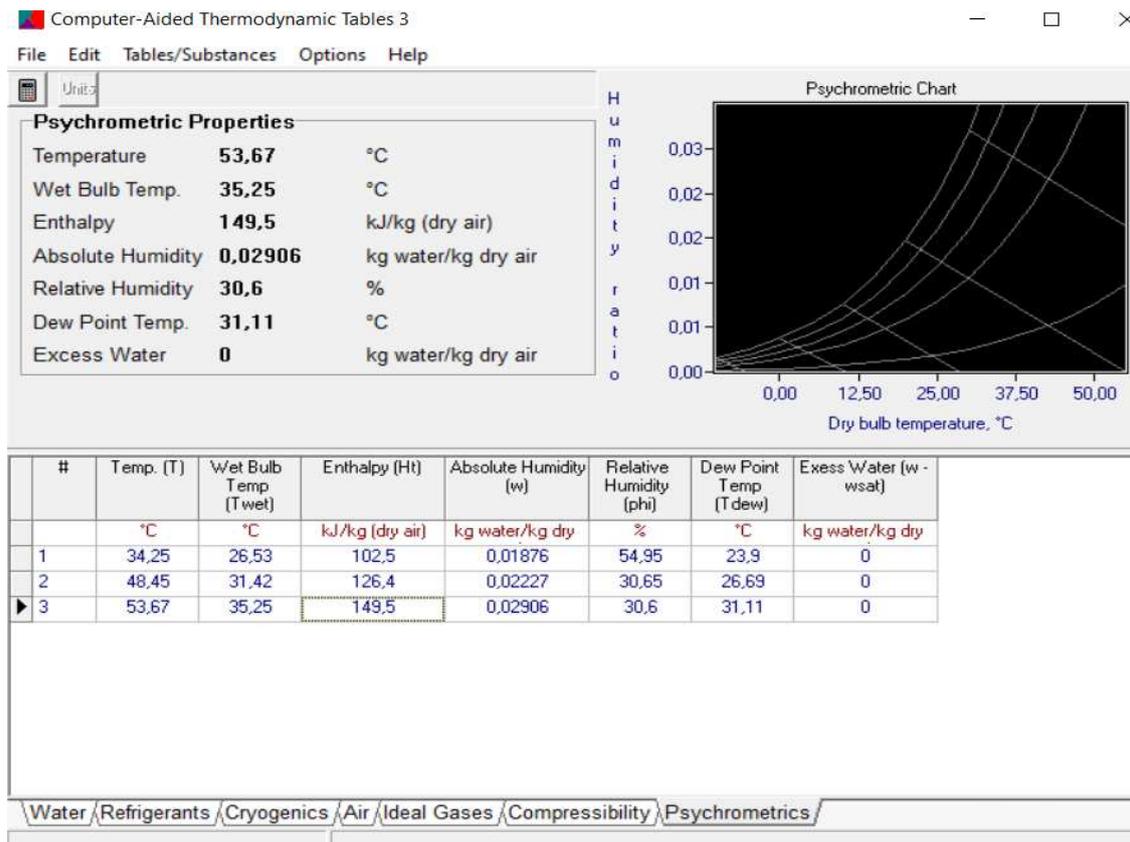
O processo 1→ 3 é análogo, porém com variações de temperatura e umidade relativa do ar menores, devido a menor eficiência da cobertura de polipropileno se comparada a cobertura de policarbonato.

Para calcular o rendimento térmico através do método do balanço energético, foram utilizados os dados obtidos para temperatura e umidade relativa do ar de secagem e, baseando-se na Primeira Lei da Termodinâmica, foi utilizada a Equação 3.10. Esses conceitos foram aplicados apenas nos experimentos realizados nos secadores, comparando apenas o efeito das diferentes coberturas na eficiência termodinâmica (visto que são necessárias informações de entrada e saída, tendo um volume de controle bem definido). Na secagem ao ar livre, não existe volume de controle.

Inicialmente, para calcular o rendimento térmico, foi determinado as entalpias específicas e necessárias às equações termodinâmicas. Esses dados foram encontrados a partir das médias de temperatura e umidade relativa do ar de ambos os secadores durante o E1, e inseridas no CATT. Para efeito de volume de controle, a temperatura e umidade de entrada utilizada foi a ambiente, e a temperatura e a umidade de saída foram medidas na saída de cada secador.

Na Figura 4.16, o estado 1 representa as características termodinâmicas do ar ambiente - que são as mesmas de entrada em ambos os secadores - e os estados 2 e 3 representam as características do ar na saída dos secadores, com cobertura de polipropileno e policarbonato, respectivamente. Tais informações são importantes para o cálculo do rendimento térmico do secador.

Figura 4.16 – Dados termodinâmicos do Experimento 1 obtidos pelo CATT.



Fonte: Próprio Autor.

Substituindo os valores para o secador com cobertura de policarbonato, tem-se:

$$\eta_{\text{secador}} = \frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{\dot{Q}_{\text{solar}}}$$

$$\frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{\dot{Q}_{\text{solar}}} = \frac{0,0006383 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left(149,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 102,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + \left(0,00040416 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 149,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)}{0,28 \text{ m}^2 \cdot 0,983 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} = 32,85\%$$

Substituindo os valores para o secador com cobertura de polipropileno, tem-se:

$$\eta_{\text{secador}} = \frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{\dot{Q}_{\text{solar}}}$$

$$\frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{\dot{Q}_{\text{solar}}} = \frac{0,0006383 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left(126,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 102,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + \left(0,00040416 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 126,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)}{0,28 \text{ m}^2 \cdot 0,983 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} = 24,12\%$$

Observou-se que o valor da eficiência do secador com cobertura de policarbonato foi sensivelmente superior ao secador com cobertura de polipropileno. Este resultado era previsto, uma vez que, que em testes preliminares realizados no LEMT/UFCG, comparando as diferentes coberturas, observou-se valores de temperatura maiores no secador com cobertura de policarbonato em comparação ao polipropileno.

A energia térmica recebida, durante a realização do Experimento 1, foi de 7.208,44 Wh/m² no primeiro dia de experimento e 8.519,76 Wh/m² no segundo dia, totalizando 15,728,20 Wh/m² nos dois dias de experimento. O sistema de secagem solar utilizado nesta pesquisa possui um coletor com área de incidência solar de 0,28 m². Com essas informações, foi possível determinar a energia térmica incidente, multiplicando a irradiação média horária pela área de incidência do coletor. Com base nessas informações, foi possível determinar o consumo específico de energia do experimento, que forneceu informações relevantes para a avaliação da etapa de secagem.

Convertendo em kWh a energia térmica, o valor da energia utilizada para secagem solar foi de 3,45 kWh. Após a determinação da energia térmica utilizada no experimento, com o auxílio da equação 3.13 (apresentada anteriormente no capítulo 3), foi possível determinar o consumo específico de energia (CEE).

Assim, com os dados dos teores de umidade inicial e final do produto e considerando o valor total da amostra do produto utilizado no experimento e a energia térmica recebida pela irradiação solar durante o experimento, foi determinado o consumo específico de energia (CEE).

Sendo assim,

$$CEE = \frac{EC \cdot (100 - U_f)}{Mi \cdot (U_i - U_f)}$$

pôde-se então determinar o Consumo Específico de Energia para cada sistema de secagem do experimento.

Na Tabela 4.3, pode ser observado os valores de energia consumida, umidade inicial do produto, umidade final do produto, massa inicial do produto bem como o

cálculo do consumo específico de energia para cada situação do experimento (Cobertura de policarbonato, Cobertura de polipropileno e Secagem ao ar livre).

Tabela 4.3 - Valores de Energia consumida, teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia no Exp 1 para cada situação.

Tipo de sistema de secagem	EC (kWh)	Ui (% bu)	Uf (% bu)	Mi (kg)	CEE (kWh/kg)
Secador de Policarbonato	3,45	30	1	0,2	58,88
Secador de Polipropileno	3,45	30	4	0,2	63,69
Secagem ao ar livre	3,45	30	6	0,2	67,56

Fonte: Próprio Autor.

A Tabela 4.4 nos permitiu comparar os resultados de rendimento térmico, velocidade de retirada de água e consumo específico de energia (CEE) das três condições a qual o caulim foi exposto.

Tabela 4.4 - Resultados de rendimento térmico, taxa de evaporação e CEE para o Experimento 1.

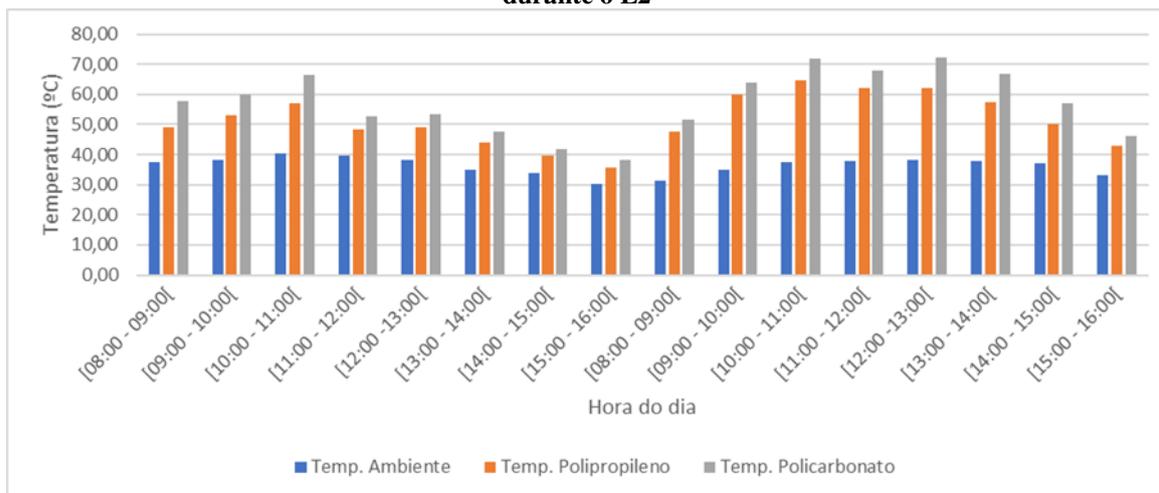
Tipo de sistema de secagem	Rendimento térmico (%)	Quantidade de água ret. no intervalo de tempo (g/h)	CEE (kWh/kg)
Secador policarbonato	32,85	3,68	58,88
Secador polipropileno	24,12	3,41	63,69
Secagem ao ar livre	-	3,19	67,56

Fonte: Próprio Autor.

4.2.2 Experimento 2 (E2), realizado em 09 e 10 de dezembro de 2020

Na Figura 4.17, pode-se observar os valores de temperatura do ambiente e no interior dos secadores com cobertura de policarbonato e polipropileno durante o Experimento 2.

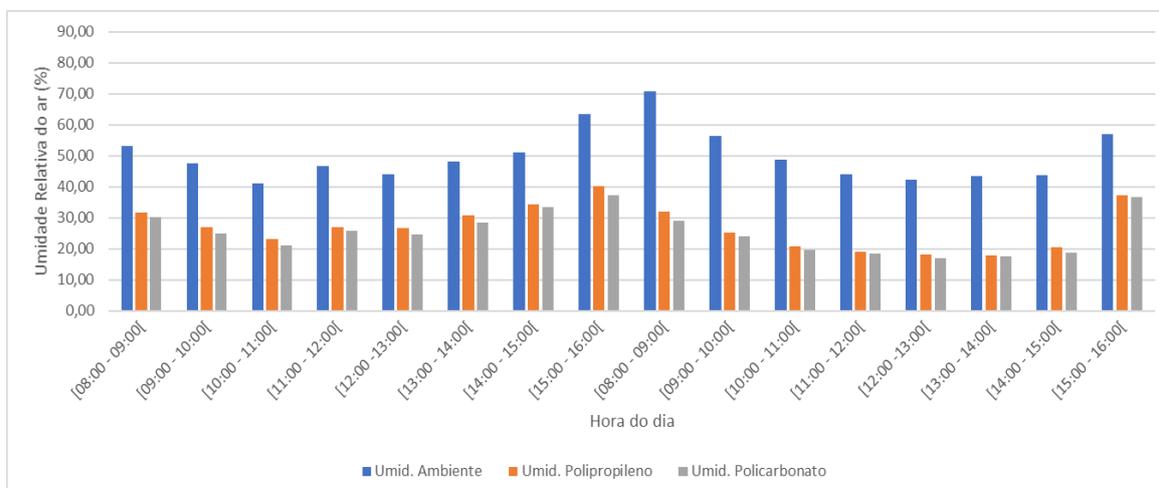
Figura 4.17 - Distribuição de temperatura do ambiente na entrada e na saída dos secadores solar durante o E2



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 4.18, pode-se observar os valores umidade relativa do ar ambiente e no interior dos secadores com cobertura de policarbonato e polipropileno durante o Experimento 2.

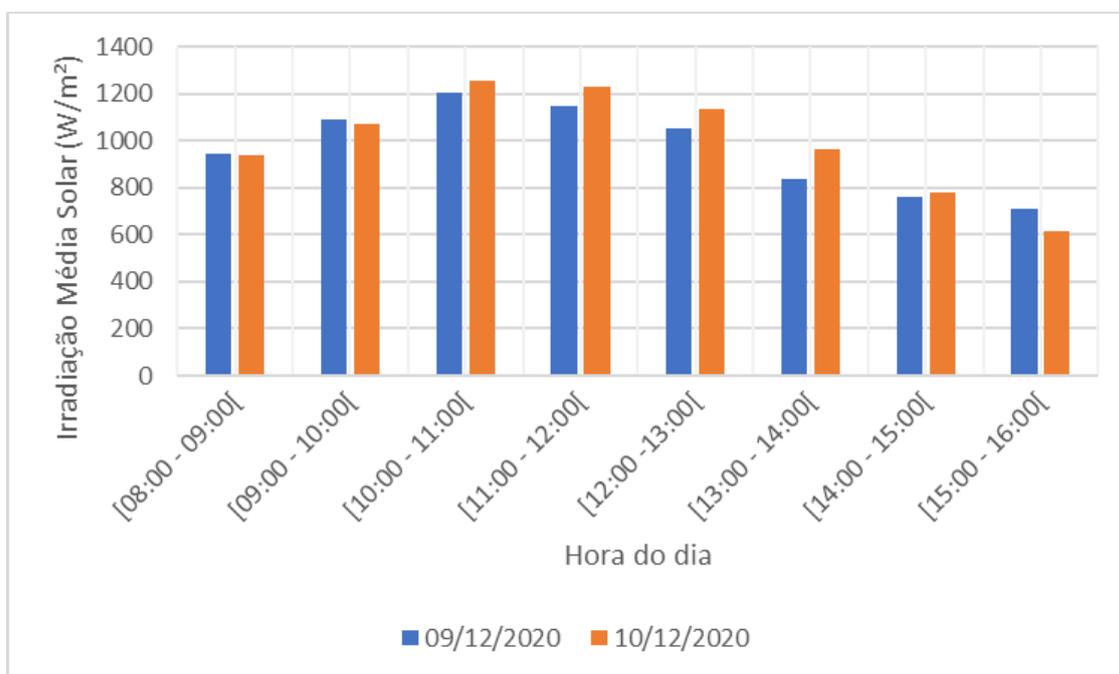
Figura 4.18 - Distribuição de umidade relativa do ar ambiente na entrada e na saída dos secadores solares durante o Experimento 2.



Fonte: Próprio Autor.

Observa-se que a temperatura no interior de ambos os secadores é, a todo o momento, superior à temperatura ambiente, o que confirma a hipótese de que os secadores solares atuam de maneira eficiente para que a temperatura no interior do secador seja elevada; facilitando, assim, a etapa de secagem do produto, pois o mesmo consegue liberar a água presente de maneira mais rápida devido às propriedades do ar. O mesmo fenômeno pode ser observado com os valores de umidade relativa, que diminuem significativamente na saída do secador. A Figura 4.19 mostra a média horária da intensidade de radiação solar nos dias em que foram feitos os testes experimentais E2. Os valores de radiação do Experimento 2 também se encontram no apêndice, e são representados aqui em forma de gráfico.

Figura 4.19 - Média das irradiações durante o Experimento 2.



Fonte: Próprio Autor.

É possível observar que as condições climáticas, nos dias dos experimentos foram bem similares. A média de irradiação solar, ao longo dos dois dias, foram muito próximas, sendo no primeiro dia da ordem de 948,78 W/m² e, no segundo dia, da ordem de 981,10 W/m². Neste experimento, obteve-se uma irradiação média de, aproximadamente, 964,94 W/m². Na Tabela 4.5 são apresentados os valores obtidos para massa de caulim a cada 60 minutos de teste, sendo a primeira medição às 08:00 h e a última do dia às 16:00 h, para os dois dias do experimento E2 (09 e 10 de dezembro de 2020).

Tabela 4.5 - Dados de massa obtidos no Experimento 2.

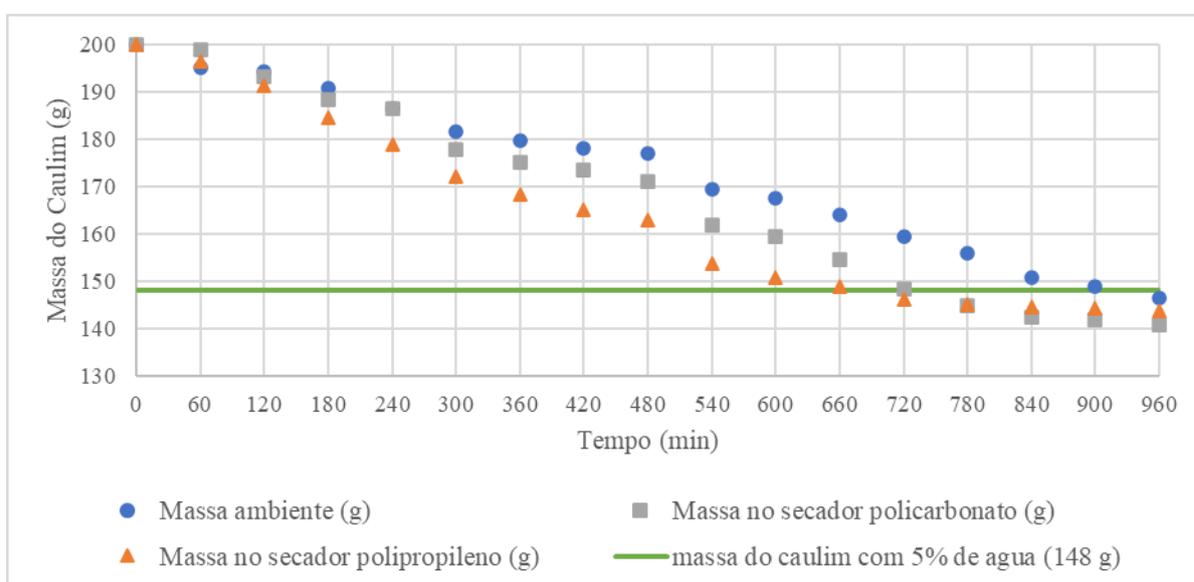
Tempo de experimento (min)	Hora do dia (h)	Amostra Ambiente					Secador 1 (policarbonato)					Secador 2 (polipropileno)				
		Massa total (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	RU	Massa total (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	RU	Massa total (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	RU
0	08:00	200,00	140,00	0,30	0,43	1,00	200,00	140,00	0,30	0,43	1,00	200,00	140,00	0,30	0,43	1,00
60	09:00	195,10	140,00	0,28	0,39	0,91	198,90	140,00	0,30	0,42	0,98	196,40	140,00	0,29	0,40	0,94
120	10:00	194,30	140,00	0,28	0,39	0,89	193,10	140,00	0,27	0,38	0,88	191,20	140,00	0,27	0,37	0,84
180	11:00	190,60	140,00	0,27	0,36	0,82	188,40	140,00	0,26	0,35	0,80	184,60	140,00	0,24	0,32	0,73
240	12:00	186,40	140,00	0,25	0,33	0,75	186,40	140,00	0,25	0,33	0,77	178,90	140,00	0,22	0,28	0,62
300	13:00	181,60	140,00	0,23	0,30	0,66	177,80	140,00	0,21	0,27	0,63	172,10	140,00	0,19	0,23	0,50
360	14:00	179,60	140,00	0,22	0,28	0,62	175,10	140,00	0,20	0,25	0,58	168,40	140,00	0,17	0,20	0,44
420	15:00	178,10	140,00	0,21	0,27	0,59	173,40	140,00	0,19	0,24	0,55	164,90	140,00	0,15	0,18	0,38
480	16:00	176,90	140,00	0,21	0,26	0,57	171,10	140,00	0,18	0,22	0,51	162,80	140,00	0,14	0,16	0,34
540	09:00	169,40	140,00	0,17	0,21	0,43	161,80	140,00	0,13	0,16	0,36	153,70	140,00	0,09	0,10	0,18
600	10:00	167,40	140,00	0,16	0,20	0,39	159,30	140,00	0,12	0,14	0,31	150,80	140,00	0,07	0,08	0,12
660	11:00	163,90	140,00	0,15	0,17	0,33	154,40	140,00	0,09	0,10	0,23	148,70	140,00	0,06	0,06	0,09
720	12:00	159,40	140,00	0,12	0,14	0,24	148,30	140,00	0,06	0,06	0,13	146,20	140,00	0,04	0,04	0,04
780	13:00	155,70	140,00	0,10	0,11	0,18	144,70	140,00	0,03	0,03	0,07	145,10	140,00	0,04	0,04	0,02
840	14:00	150,80	140,00	0,07	0,08	0,08	142,30	140,00	0,02	0,02	0,03	144,60	140,00	0,03	0,03	0,01
900	15:00	148,7	140,00	0,06	0,06	0,04	141,90	140,00	0,01	0,01	0,02	144,20	140,00	0,03	0,03	0,01
960	16:00	146,3	140,00	0,04	0,05	0,00	140,60	140,00	0,00	0,00	0,00	143,80	140,00	0,03	0,03	0,00

Fonte: Próprio Autor.

Para este experimento, também foi considerado que o teor de umidade inicial do caulim, em base úmida, foi de 30%. Chegou-se a esse valor a partir de secagens realizadas em estufa no próprio LEMT, sendo este o teor de umidade inicial das amostras de caulim. No secador com cobertura de policarbonato, depois de 11 h (onze) horas de secagem, foi obtido o teor de umidade de 5%, o recomendado para a etapa seguinte de beneficiamento (moagem). Já no secador com cobertura de polipropileno, o teor de umidade de 5% foi atingido 1 hora antes em comparação ao secador com cobertura de policarbonato, como mostrado na Figura 4.22.

Essa variação é relativamente pequena, mostrando uma proximidade de ambos os secadores na eficácia de retirar a água das amostras de caulim para o alcance das condições ideais para as próximas etapas de beneficiamento. Por outro lado, observa-se que a amostra exposta ao meio ambiente e a radiação solar direta só obteve um teor em base úmida inferior a 5% após mais de 15 horas de processo de secagem. A Figura 4.20 mostra a variação da massa do caulim *versus* o tempo ao longo do experimento. Esses resultados foram obtidos a partir da Tabela 4.5, mostrada anteriormente.

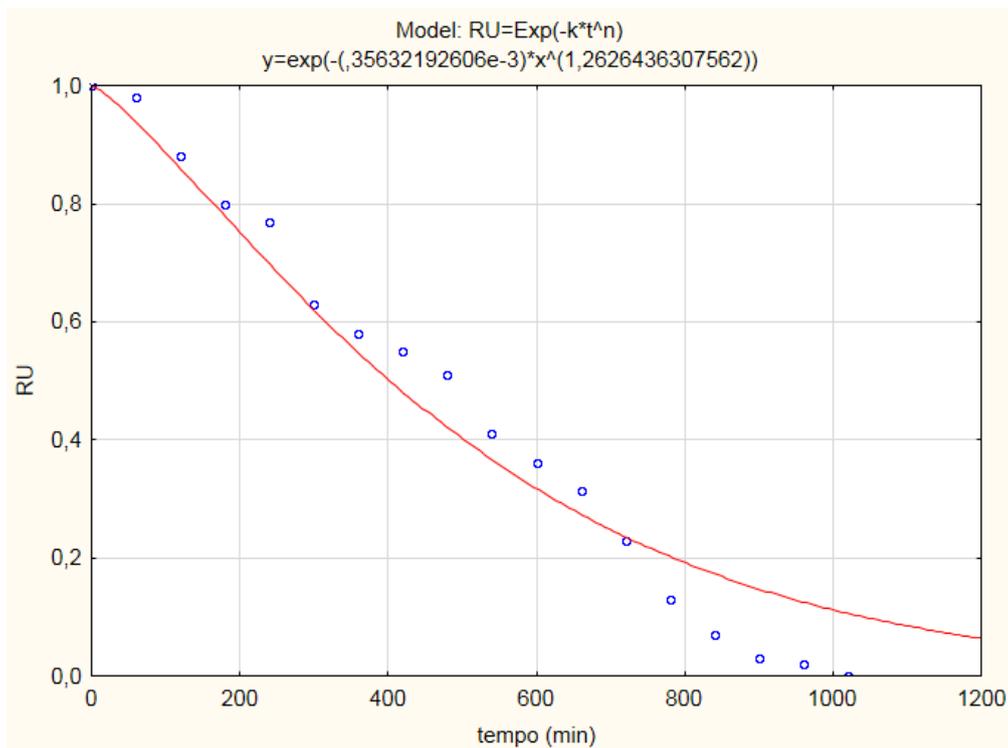
Figura 4.20 - Variação da massa de caulim em relação ao tempo no Experimento 2.



Fonte: Próprio Autor.

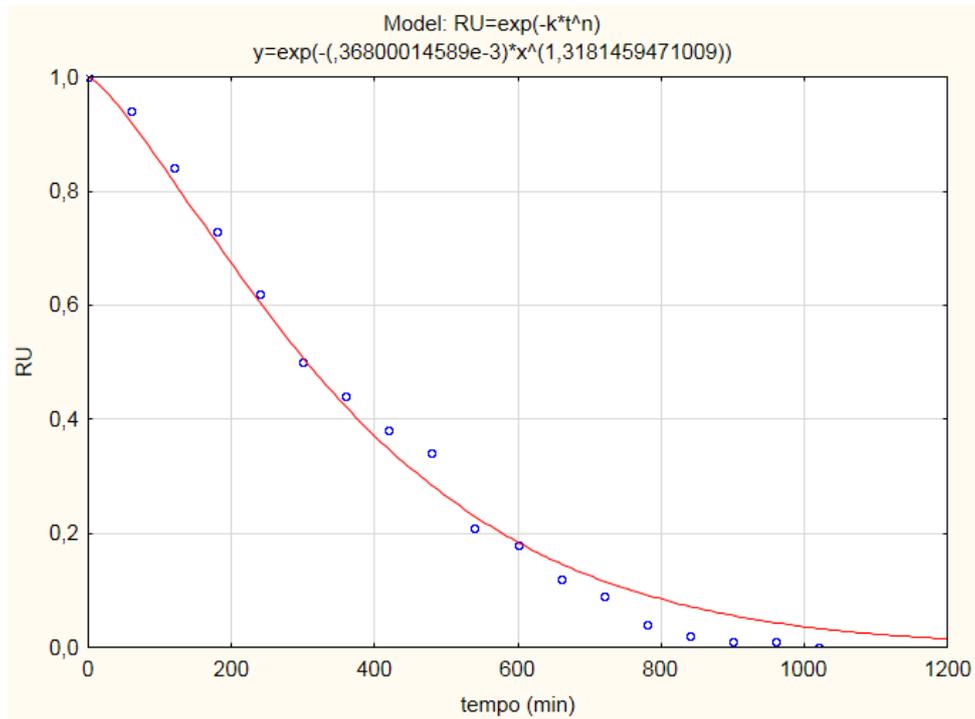
Para o Experimento 2, também foram desenvolvidas as curvas ajustadas pelo modelo de Page. Tais curvas estão apresentadas nas imagens da Figura 4.21, Figura 4.22 e Figura 4.23, representando, respectivamente, a cinética de secagem com cobertura de polipropileno, secagem com cobertura de policarbonato e secagem ao ar livre, obtidas através dos dados da Tabela 4.2.

Figura 4.21 - Cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page, secador com cobertura de policarbonato (EXP2).



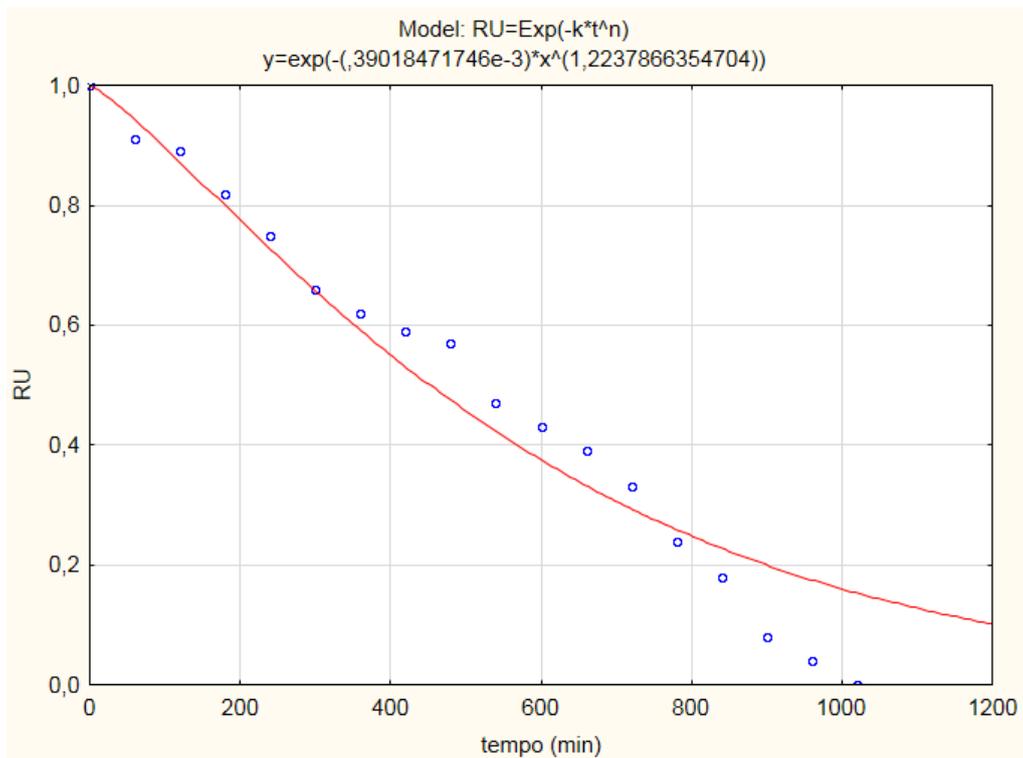
Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.22 - Cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page, secador com cobertura de polipropileno (EXP2).



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.23 - Cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page, secagem ao ar livre (EXP2).



Fonte: Próprio Autor.

Através do ajuste do modelo matemático de Page aos dados obtidos, chegou-se a um coeficiente de determinação de 97,53% para o processo de secagem com o secador com cobertura de policarbonato; 97,32% para o processo de secagem com o secador com cobertura de polipropileno e 99,65% para o processo de secagem ao ar livre,

Neste experimento também foi calculada a velocidade de retirada de massa de água das amostras de caulim. Esse parâmetro é interessante para poder comparar os três experimentos, considerando que os mesmos estavam sob as mesmas condições de velocidade do ar, umidade relativa do ar e irradiação solar. Foi utilizada a Equação 3.12, onde foram substituídos os valores da massa inicial e final de caulim obtidos da Tabela 4.5

Substituindo os valores para o processo de secagem no secador com cobertura de policarbonato, tem-se:

$$\Delta m/\Delta t = \frac{200 \text{ g} - 140,6 \text{ g}}{16 \text{ h}} = 3,7125 \text{ g/h}$$

Substituindo os valores para o processo de secagem no secador com cobertura de polipropileno, tem-se:

$$\Delta m/\Delta t = \frac{200 \text{ g} - 143,8 \text{ g}}{16 \text{ h}} = 3,5125 \text{ g/h}$$

Substituindo os valores para a secagem ao ar livre, tem-se:

$$\Delta m/\Delta t = \frac{200 \text{ g} - 146,3 \text{ g}}{16 \text{ h}} = 3,3563 \text{ g/h}$$

Observou-se que os valores encontrados foram muito similares se comparados ao Experimento 1 e, mais uma vez, a secagem com o secador com cobertura de Policarbonato se mostrou a mais eficiente do ponto de vista da taxa de retirada de água por tempo, durante o experimento.

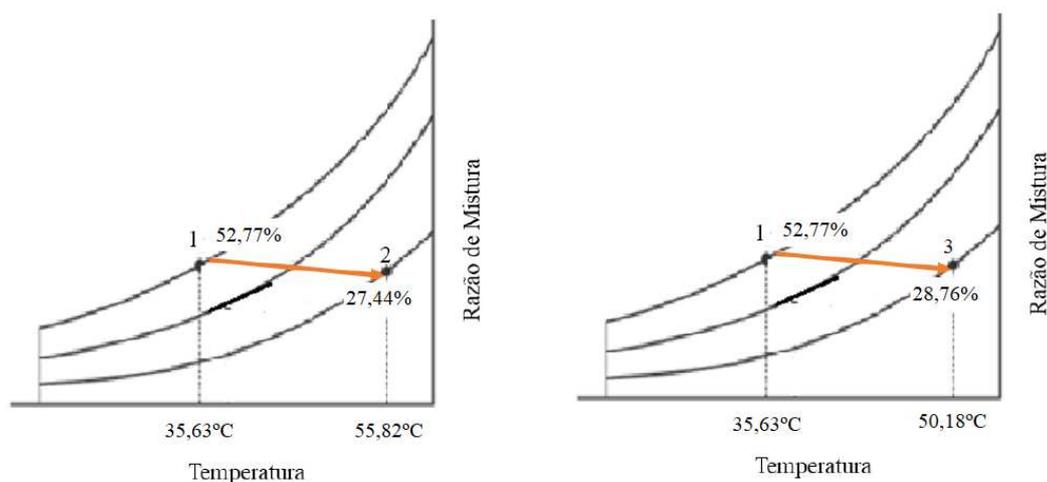
A Figura 4.24 apresenta, na carta psicrométrica, a média da temperatura e umidade relativa do ar durante a realização do experimento.

✓ ponto 1 representa o estado termodinâmico 1, na entrada dos sistemas de secagem com secadores – que é a temperatura ambiente;

✓ ponto 2 representa o estado termodinâmico 2, na saída do secador com cobertura de policarbonato;

✓ ponto 3 representa o estado termodinâmico 3, na saída do secador com cobertura de polipropileno;

Figura 4.24 Condições psicrométricas do ar no experimento 2



Fonte: Próprio Autor.

1 → 2 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar ambiente passa do estado 1 para o estado 2 no interior do secador com cobertura de policarbonato. O ar ambiente é aquecido por meio da energia transferida pelo capacitor térmico e, com esse aumento da temperatura do ar (de 35,63°C para 55,82°C), ocorre uma redução da umidade relativa (de 52,77% para 27,44%).

O ar aquecido e com uma umidade relativa menor, ao entrar em contato com as amostras de caulim, provoca uma transferência de calor do fluido de trabalho para o caulim e uma transferência de massa de vapor de água do caulim para o fluido de trabalho, resultando na secagem das amostras.

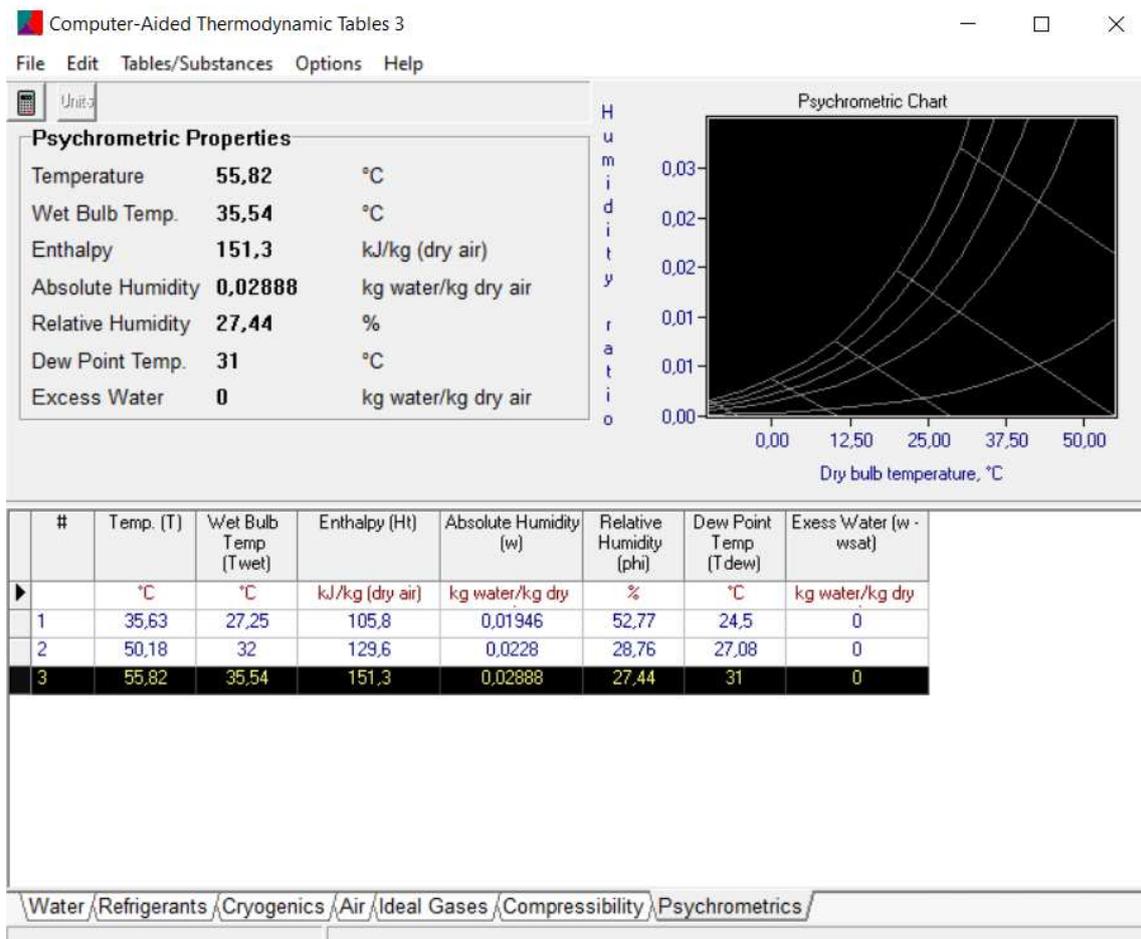
O processo 1→3 é análogo, porém com variações de temperatura e umidade relativa do ar menores, devido a menor eficiência da cobertura de polipropileno se comparada a cobertura de policarbonato.

Para calcular o rendimento térmico usando o método do balanço energético, foram utilizados os dados obtidos para temperatura e umidade relativa do ar de secagem e, baseando-se na Primeira Lei da Termodinâmica, foi utilizada a Equação 3.10. Tais conceitos foram novamente aplicados apenas nos experimentos realizados nos secadores, comparando, assim, apenas o efeito das diferentes coberturas na eficiência termodinâmica (visto que são necessárias informações de entrada e saída, tendo um volume de controle bem definido). Na secagem ao ar livre, não há volume de controle.

Primeiramente, foram buscados os dados de entalpias específicas, necessárias às equações termodinâmicas. Tais dados foram encontrados a partir das médias de temperatura e umidade relativa do ar ambiente de ambos os secadores durante o Experimento 2 e inseridas no CATT. Para efeito de volume de controle, a temperatura e umidade de entrada utilizada foi a ambiente, e a de saída respectiva de cada secador (com suas características de cobertura diferentes).

Na Figura 4.25, o estado 1 representa as características termodinâmicas do ar ambiente - que é a mesma de entrada em ambos os secadores - e os estados 2 e 3 representam as características do ar na saída dos secadores com cobertura de polipropileno e policarbonato, respectivamente. Tais informações são de suma importância para o cálculo do rendimento térmico do secador.

Figura 4.25 – Dados termodinâmicos do Experimento 2 obtidos pelo CATT.



Fonte: Próprio Autor.

Substituindo os valores para o secador com cobertura de policarbonato, tem-se:

$$\eta_{\text{secador}} = \frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{\dot{Q}_{\text{solar}}}$$

$$= \frac{0,0006383 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left(151,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 105,08 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + \left(0,00040416 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 151,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)}{0,28 \text{ m}^2 \cdot 0,964 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} = 33,51\%$$

Substituindo os valores para o secador com cobertura de polipropileno, tem-se:

$$\eta_{\text{secador}} = \frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{\dot{Q}_{\text{solar}}}$$

$$= \frac{0,0006383 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left(129,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 105,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + \left(0,00040416 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 129,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)}{0,28 \text{ m}^2 \cdot 0,964 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} = 25,03\%$$

Observou-se, mais uma vez, que o valor da eficiência do secador com cobertura de policarbonato foi sensivelmente superior ao secador com cobertura de polipropileno. Este resultado está dentro do esperado, visto que, em testes preliminares comparando as diferentes coberturas, observou-se valores de temperatura maiores no secador com cobertura de policarbonato em comparação ao polipropileno.

Mais uma vez, foi realizada o cálculo do consumo específico de secagem, sendo este mais um índice de comparação entre os três sistemas.

A energia térmica recebida durante a realização do Experimento 2, foi de 7269,04 Wh/m² no primeiro dia de experimento e 8254,96 Wh/m² no segundo dia, totalizando 15.524,00Wh/m² nos dois dias de experimento. O sistema de secagem solar utilizado nesta pesquisa possui um coletor com área de incidência solar de 0,22 m². Com essas informações, foi possível determinar a energia térmica incidida, multiplicando a irradiação média horária pela área de incidência do coletor. Com base nessas informações, foi possível determinar o consumo específico de energia do experimento, que forneceu informações relevantes para a avaliação da etapa de secagem.

Convertendo em kWh a energia térmica, o valor da energia utilizada para secagem solar foi de 3,41 kWh. Após a determinação da energia térmica utilizada no experimento, com o auxílio da equação 3.13 apresentada anteriormente no capítulo 3, foi possível determinar o consumo específico de energia (CEE).

Na Tabela 4.6, pode ser observado os valores de energia consumida, umidade inicial do produto, umidade final do produto, massa inicial do produto bem como o cálculo do consumo específico de energia para cada situação do experimento (Cobertura de policarbonato, Cobertura de Polipropileno e Secagem ao ar livre).

Tabela 4.6 - Valores de Energia consumida, teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia no Exp 2 para cada situação

Tipo de sistema de secagem	EC (kWh)	Ui (% bu)	Uf (% bu)	Mi (kg)	CEE (kWh/kg)
Secador de Policarbonato	3,41	30	0	0,2	56,83
Secador de Polipropileno	3,41	30	3	0,2	61,25
Secagem ao ar livre	3,41	30	4	0,2	62,95

Fonte: Próprio Autor.

Novamente, sintetizou-se os resultados do Experimento 2 na Tabela 4.7 e tornou possível a comparação, do ponto de vista de eficiência térmica do processo de secagem, entre as três situações em que o caulim foi exposto no ponto de vista de eficiência térmica do processo de secagem.

Tabela 4.7 - Resultados de rendimento térmico, quantidade de água retirada e CEE para o Experimento 2

Tipo de sistema de secagem	Rendimento térmico (%)	Quantidade de água ret. no intervalo de tempo (g/h)	CEE (kWh/kg)
Secador policarbonato	33,51	3,71	56,83
Secador polipropileno	25,03	3,51	61,25
Secagem natural	-	3,35	62,95

Fonte: Próprio Autor.

4.2.3 Experimento 3 (E3), realizado em 14 e 19 de julho de 2021

Após novos avanços tecnológicos desenvolvidos pelo LEMT/UFCG, a partir de trabalhos e teses desenvolvidas, chegou-se a uma dimensão de secadores comprovadas experimentalmente mais eficientes. Tais dimensões foram obtidas por Gomes (2021), e tais equipamentos foram utilizados no Experimento 3.

A Figura 4.26 mostra os secadores solares utilizados durante os experimentos realizados no LEMT (E3). Tais secadores foram desenvolvidos por Costa (2022) e utilizados também no experimento realizado na empresa INCOMGEL nos dias 03 e 04 de agosto de 2021 (E4). Observa-se as diferentes coberturas (policarbonato e polipropileno) bem como a amostra no seu interior, para a realização da secagem.

Figura 4.26 – Secador solar com diferentes coberturas no *solarium* do LEMT



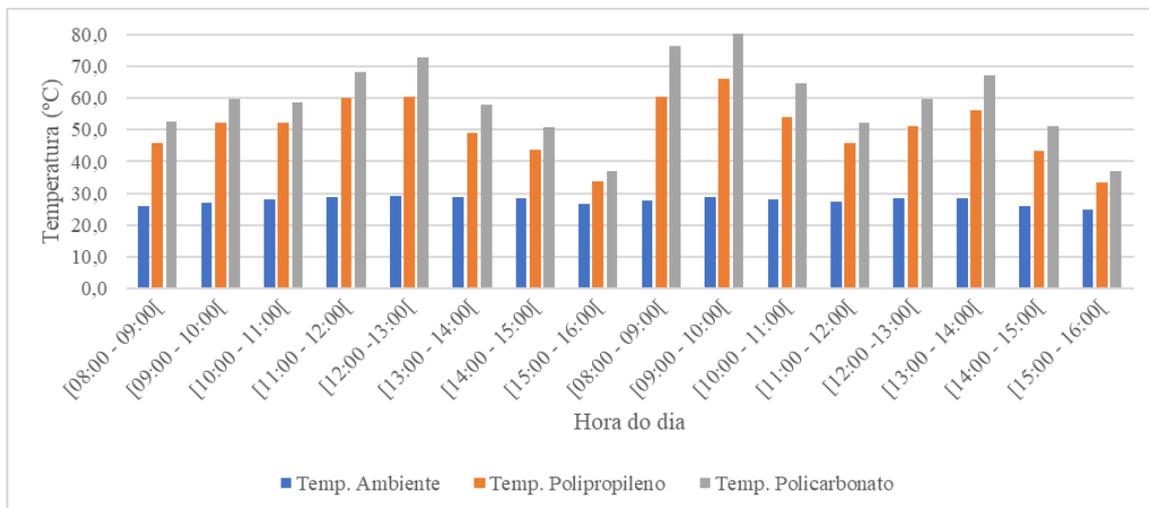
Fonte: Próprio Autor.

O terceiro experimento (E3) foi realizado no *solarium* do LEMT, na Universidade Federal de Campina Grande em Campina Grande - PB. Os dados de irradiação solar foram obtidos da estação meteorológica do LEIAM/UAEI/CEEI/UFCG.

As condições climáticas tornaram-se impróprias para realizar a secagem por dois dias seguidos, devido à nebulosidade e chuvas. Sendo assim, as amostras foram secadas em dias espaçados. Durante o período do dia 14 ao dia 19 de julho, as amostras foram condicionadas em compartimentos isolados de umidade para que fossem preservadas as características do material. As mesmas também foram pesadas, para confirmarem que se mantiveram nas mesmas condições.

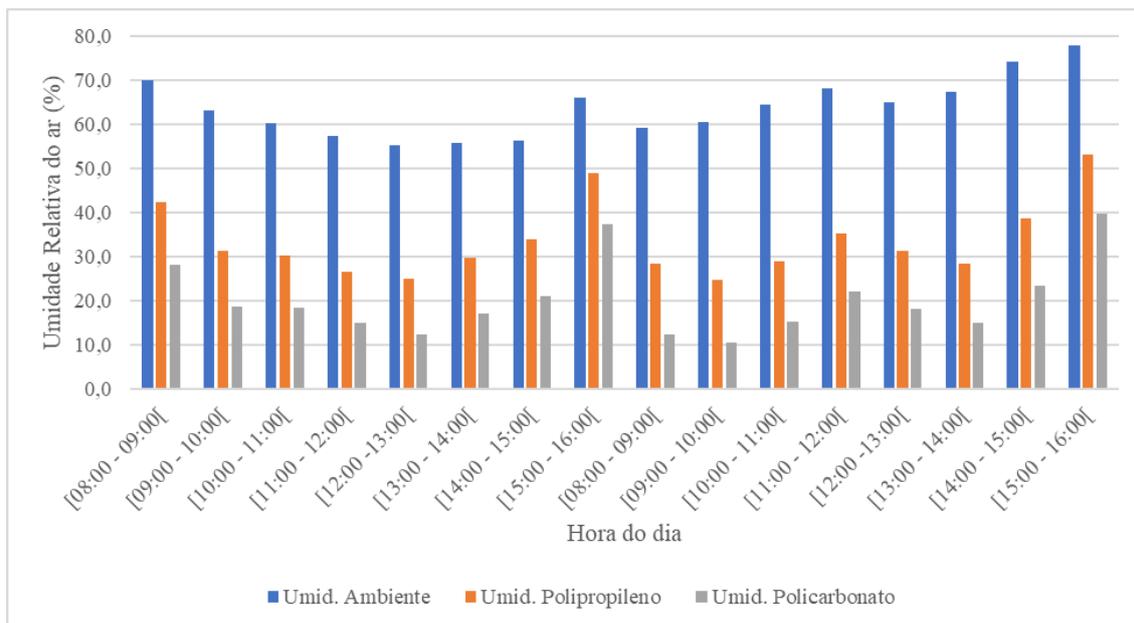
Nas Figuras 4.27 e 4.28, podem-se observar os valores de temperatura e umidade relativa do ar ambiente no interior dos secadores com cobertura de policarbonato e polipropileno no Experimento 3.

Figura 4.27 - Distribuição de temperatura do ambiente na entrada e na saída dos secadores solar durante o E3.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.28 - Distribuição de umidade relativa do ar ambiente na entrada e na saída dos secadores solar durante o Experimento 3.



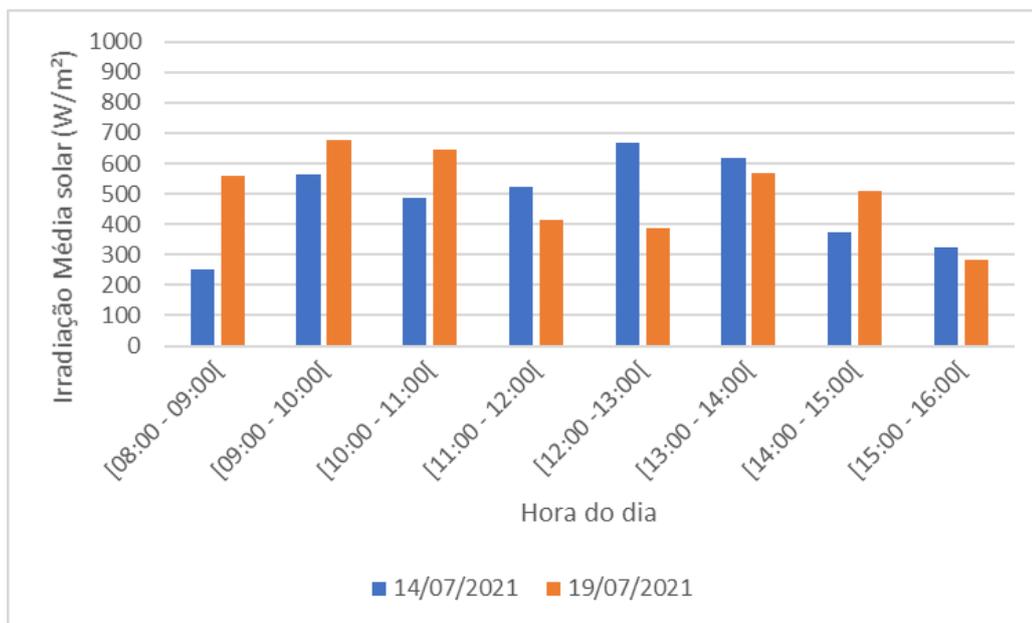
Fonte: Próprio Autor.

Observa-se que a temperatura no interior de ambos os secadores é, a todo o momento, superior à temperatura ambiente, confirmando a informação de que os secadores solares atuam de maneira eficiente para que a temperatura no interior do secador seja elevada, facilitando, assim, a etapa de secagem do produto, pois há a liberação água presente de maneira mais rápida em virtude das propriedades do ar. O mesmo fenômeno pode ser observado com os valores de umidade relativa, que diminuem significativamente na saída do secador.

Outro ponto observado é que foram alcançados valores maiores de temperatura quando comparados aos experimentos anteriores. Mesmo em condições de menor radiação solar (visto que o experimento foi realizado no outono/inverno, época do ano de menor intensidade de radiação, os valores de irradiação solar também foram menores), observou-se registros de temperaturas mais elevadas. Isto está relacionado às dimensões otimizadas do secador.

A Figura 4.29 mostra a média horária da intensidade de radiação solar nos dias em que foram feitos os testes experimentais E3. Os valores medidos durante o experimento se encontram nos apêndices.

Figura 4.29 - Média das irradiações durante o Experimento 3.



Fonte: Próprio Autor.

É possível observar que as condições climáticas, em ambos os dias, foram bem abaixo das observadas nos experimentos anteriores, com valores médios de irradiação bem menores. A média de irradiação solar ao longo dos dois dias foi muito próxima, sendo no primeiro dia da ordem de 435,85 W/m² e no segundo dia da ordem de 457,88 W/m². Neste experimento, obteve-se uma irradiação média de, aproximadamente, 446,87 W/m². Na Tabela 4.8 são apresentados os valores obtidos para massa de caulim a cada 60 minutos de teste, sendo a primeira medição às 08:00 h e a última do dia às 16:00 h, para os dois dias do experimento E3 (14 e 19 de julho de 2021).

Tabela 4.8 - Dados de massa obtidos no Experimento 3.

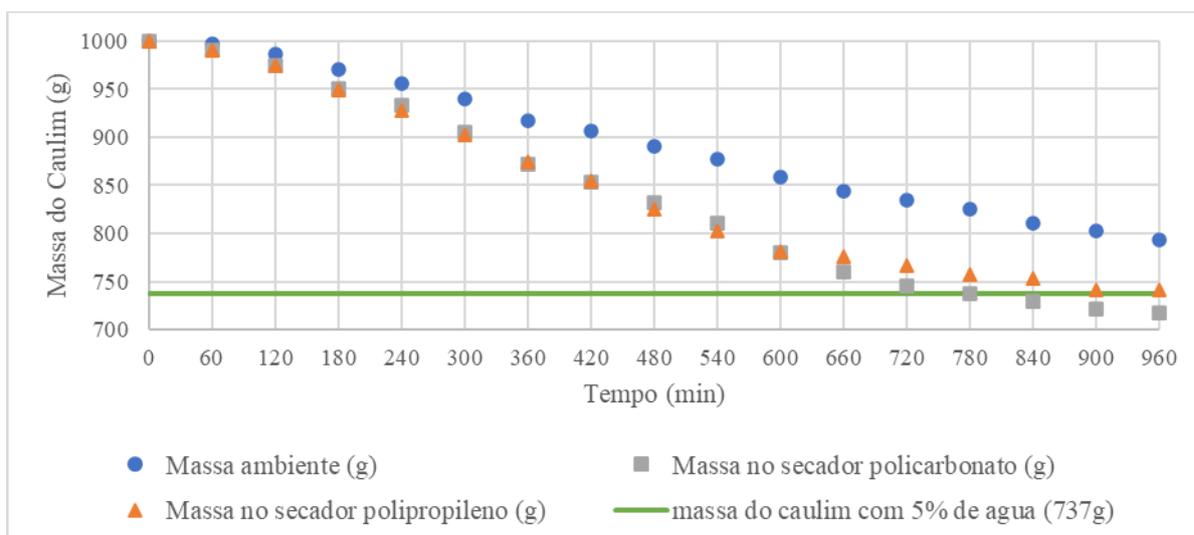
Tempo de experimento (min)	Hora do dia (h)	Amostra Ambiente					Secador 1 (policarbonato)					Secador 2 (polipropileno)				
		Massa total (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	RU	Massa total (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	RU	Massa total (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	RU
0	08:00	1000,00	700,00	0,30	0,43	1,00	1000,00	700,00	0,30	0,43	1,00	1000,00	700,00	0,30	0,43	1,00
60	09:00	997,00	700,00	0,30	0,42	0,99	991,00	700,00	0,29	0,42	0,97	991,00	700,00	0,29	0,42	0,97
120	10:00	986,00	700,00	0,29	0,41	0,93	974,00	700,00	0,28	0,39	0,91	974,00	700,00	0,28	0,39	0,90
180	11:00	970,00	700,00	0,28	0,39	0,85	950,00	700,00	0,26	0,36	0,82	949,00	700,00	0,26	0,36	0,80
240	12:00	956,00	700,00	0,27	0,37	0,79	933,00	700,00	0,25	0,33	0,76	928,00	700,00	0,25	0,33	0,72
300	13:00	940,00	700,00	0,26	0,34	0,71	905,00	700,00	0,23	0,29	0,66	902,00	700,00	0,22	0,29	0,62
360	14:00	917,00	700,00	0,24	0,31	0,60	872,00	700,00	0,20	0,25	0,55	874,00	700,00	0,20	0,25	0,51
420	15:00	906,00	700,00	0,23	0,29	0,54	853,00	700,00	0,18	0,22	0,48	855,00	700,00	0,18	0,22	0,44
480	16:00	903,00	700,00	0,22	0,29	0,53	840,00	700,00	0,17	0,20	0,43	837,00	700,00	0,16	0,20	0,37
540	09:00	877,00	700,00	0,20	0,25	0,40	811,00	700,00	0,14	0,16	0,33	802,00	700,00	0,13	0,15	0,24
600	10:00	858,00	700,00	0,18	0,23	0,31	780,00	700,00	0,10	0,11	0,22	782,00	700,00	0,10	0,12	0,16
660	11:00	844,00	700,00	0,17	0,21	0,24	760,00	700,00	0,08	0,09	0,15	776,00	700,00	0,10	0,11	0,14
720	12:00	834,00	700,00	0,16	0,19	0,19	746,00	700,00	0,06	0,07	0,10	767,00	700,00	0,09	0,10	0,10
780	13:00	825,00	700,00	0,15	0,18	0,15	737,00	700,00	0,05	0,05	0,07	758,00	700,00	0,08	0,08	0,07
840	14:00	811,00	700,00	0,14	0,16	0,08	729,00	700,00	0,04	0,04	0,04	754,00	700,00	0,07	0,08	0,05
900	15:00	802,00	700,00	0,13	0,15	0,04	721,00	700,00	0,03	0,03	0,01	741,00	700,00	0,06	0,06	0,00
960	16:00	794,00	700,00	0,12	0,13	0,00	718,00	700,00	0,03	0,03	0,00	741,00	700,00	0,06	0,06	0,00

Fonte: Próprio Autor.

Para este experimento, também utilizou-se o teor de umidade inicial do caulim, em base úmida de 30%. No secador com cobertura de policarbonato, depois de 14 h (quatorze) horas de secagem, foi obtido o teor de umidade em 5%. Já no secador com cobertura de polipropileno, o teor de umidade de 5% foi atingido 2 horas depois comparado ao secador com cobertura de policarbonato, como mostrado na Figura 4.31.

Essa variação já se mostrou considerável. Por outro lado, observou-se que a amostra exposta ao meio ambiente e à radiação solar direta não atingiu a umidade desejada inferior a 5%, não estando em condições para seguir para a próxima etapa de beneficiamento após 16 horas de secagem ao ar livre. A Figura 4.30 mostra a variação da massa do caulim em função do tempo do experimento. Esses resultados foram obtidos a partir da Tabela 4.8.

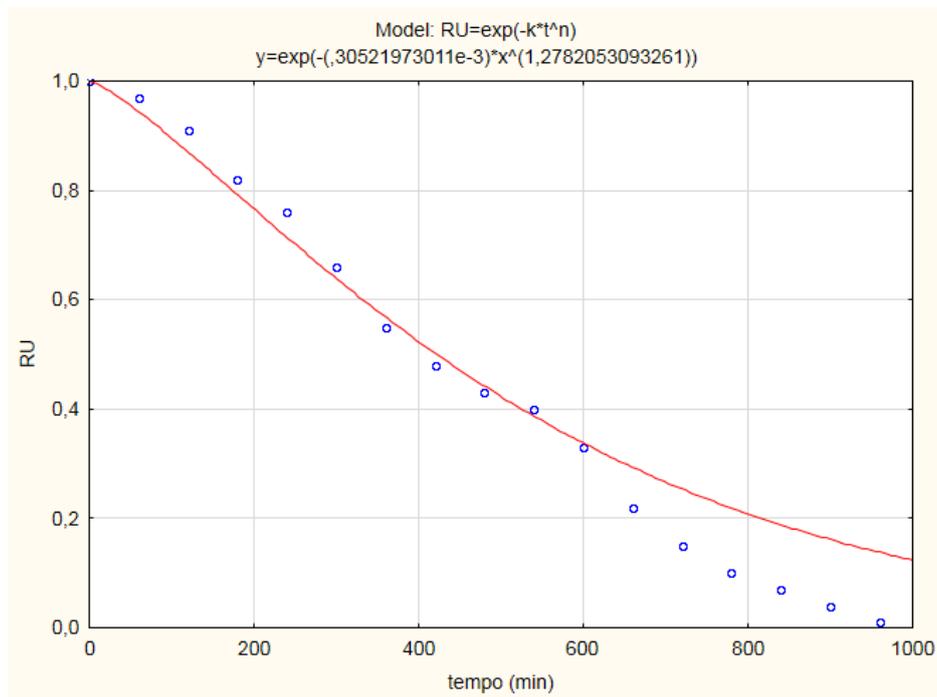
Figura 4.30 - Variação da massa de caulim em relação ao tempo no Experimento 3.



Fonte: Próprio Autor.

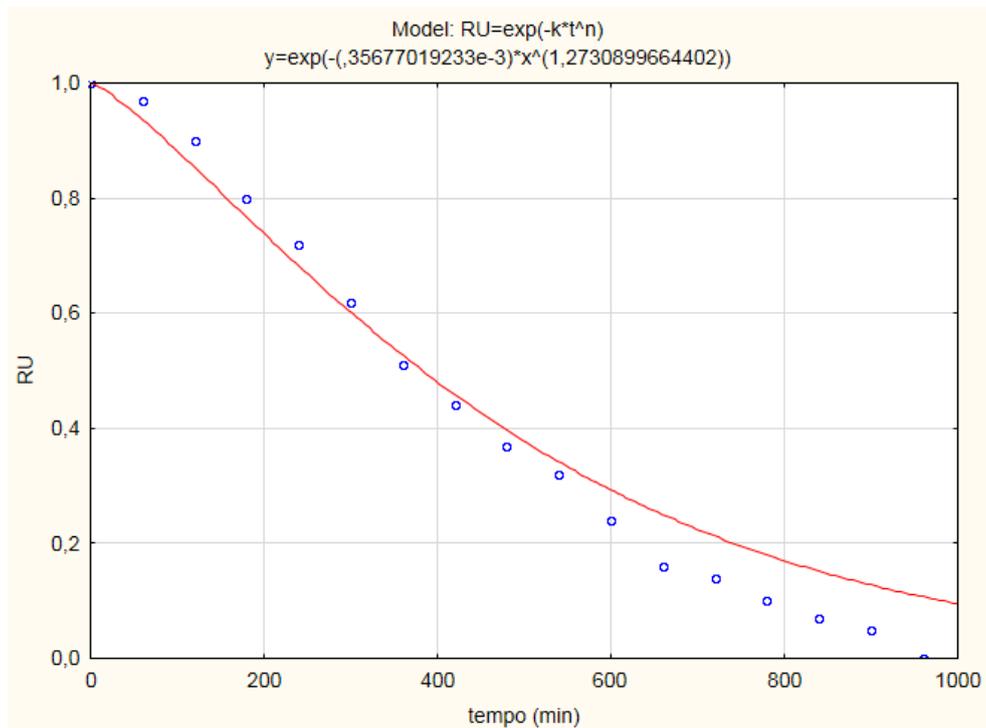
Para o Experimento 3, também foram obtidas as cinéticas de secagem ajustadas pelo modelo de Page. Tais curvas estão apresentadas nas imagens da Figura 4.31, Figura 4.32 e Figura 4.33, representando a cinética de secagem com cobertura de policarbonato, polipropileno, secagem com cobertura ao ar livre, respectivamente, e foram obtidas através dos dados da Tabela 4.6. Nestas figuras, os pontos representam os valores obtidos experimentalmente e a curva em linha cheia representa a cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page.

Figura 4.31 - Cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page, secador com cobertura de policarbonato (EXP3).



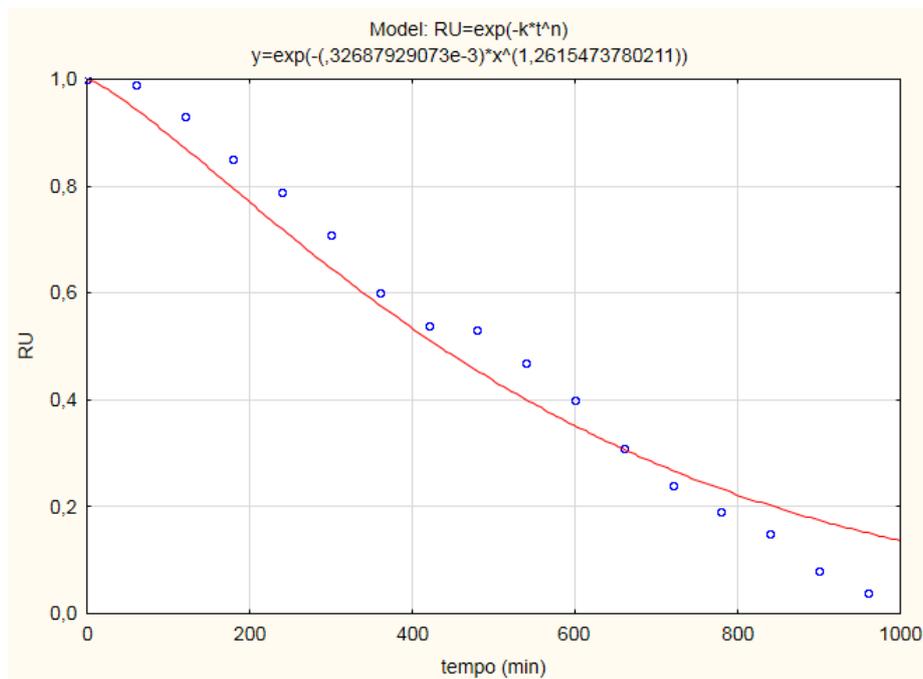
Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.32 - Cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page, secador com cobertura de polipropileno (EXP3)



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.33 - Cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page, secagem ao ar livre (EXP3).



Fonte: Próprio Autor.

Através do ajuste do modelo matemático de Page aos dados obtidos, chegou-se a um coeficiente de determinação de 97,63% para o processo de secagem com o secador com cobertura de policarbonato; 98,46% para o processo de secagem com o secador com cobertura de polipropileno e 98,01% para o processo de secagem ao ar livre.

Novamente, foi calculado também a velocidade de retirada de massa de água das amostras de caulim. Esse parâmetro é interessante para poder comparar os três experimentos, considerando que os mesmos estavam sob as mesmas condições de velocidade do ar, umidade relativa do ar e irradiação solar. Foi utilizada a Equação 3.12, onde se substitui os valores da massa inicial e final de caulim obtidos da Tabela 4.8.

Substituindo os valores para o processo de secagem no secador com cobertura de policarbonato, tem-se:

$$\Delta m / \Delta t = \frac{1000 \text{ g} - 718 \text{ g}}{16 \text{ hr}} = 17,63 \text{ g/h}$$

Substituindo os valores para o processo de secagem no secador com cobertura de polipropileno, tem-se:

$$\Delta m/\Delta t = \frac{1000 \text{ g} - 741 \text{ g}}{16 \text{ h}} = 16,19 \text{ g/h}$$

Substituindo os valores para a secagem ao ar livre, tem-se:

$$\Delta m/\Delta t = \frac{1000 \text{ g} - 794 \text{ g}}{16 \text{ h}} = 12,88 \text{ g/h}$$

Observou-se que os valores encontrados foram muito similares se comparados ao experimento 1, e mais uma vez, a secagem com o secador com cobertura de Policarbonato se mostrou a mais eficiente do ponto de vista da taxa de retirada de água por tempo, durante o experimento.

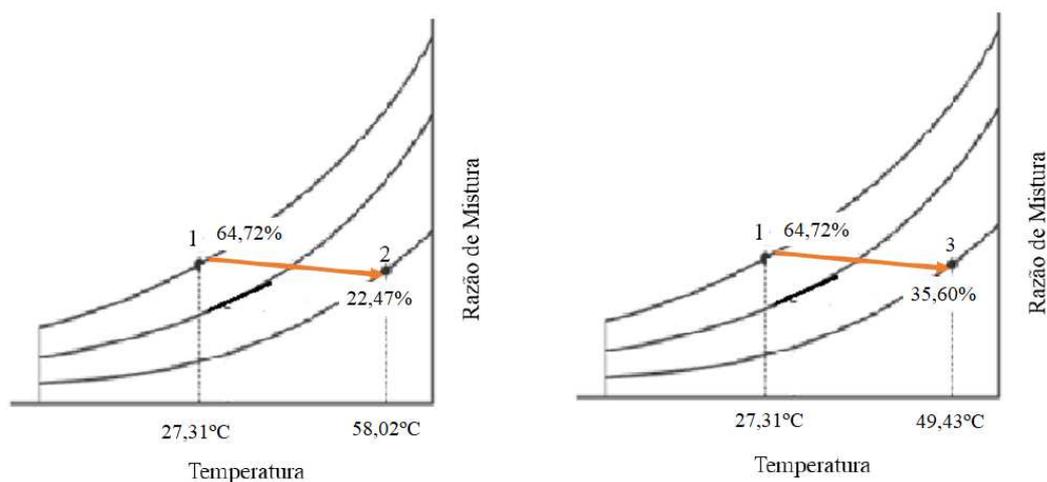
A Figura 4.34 apresenta, na carta psicrométrica, a média da temperatura e umidade relativa do ar durante a realização do Experimento 3.

✓ ponto 1 representa o estado termodinâmico 1, na entrada dos sistemas de secagem com secadores – que é a temperatura ambiente;

✓ ponto 2 representa o estado termodinâmico 2, na saída do secador com cobertura de policarbonato;

✓ ponto 3 representa o estado termodinâmico 3, na saída do secador com cobertura de polipropileno;

Figura 4.34 Condições psicrométricas do ar no Experimento 3.



Fonte: Próprio Autor.

1→ 2 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar ambiente passa do estado 1 para o estado 2 no interior do secador com cobertura de policarbonato. O ar ambiente é aquecido por meio da energia transferida pelo capacitor térmico e, com esse aumento da temperatura do ar (de 27,31°C para 58,02°C), ocorre uma redução da umidade relativa (de 64,72% para 22,47%).

O ar aquecido e com uma umidade relativa menor, ao entrar em contato com as amostras de caulim, provoca uma transferência de calor do fluido de trabalho para o caulim e uma transferência de massa de vapor de água do caulim para o fluido de trabalho, resultando na secagem das amostras.

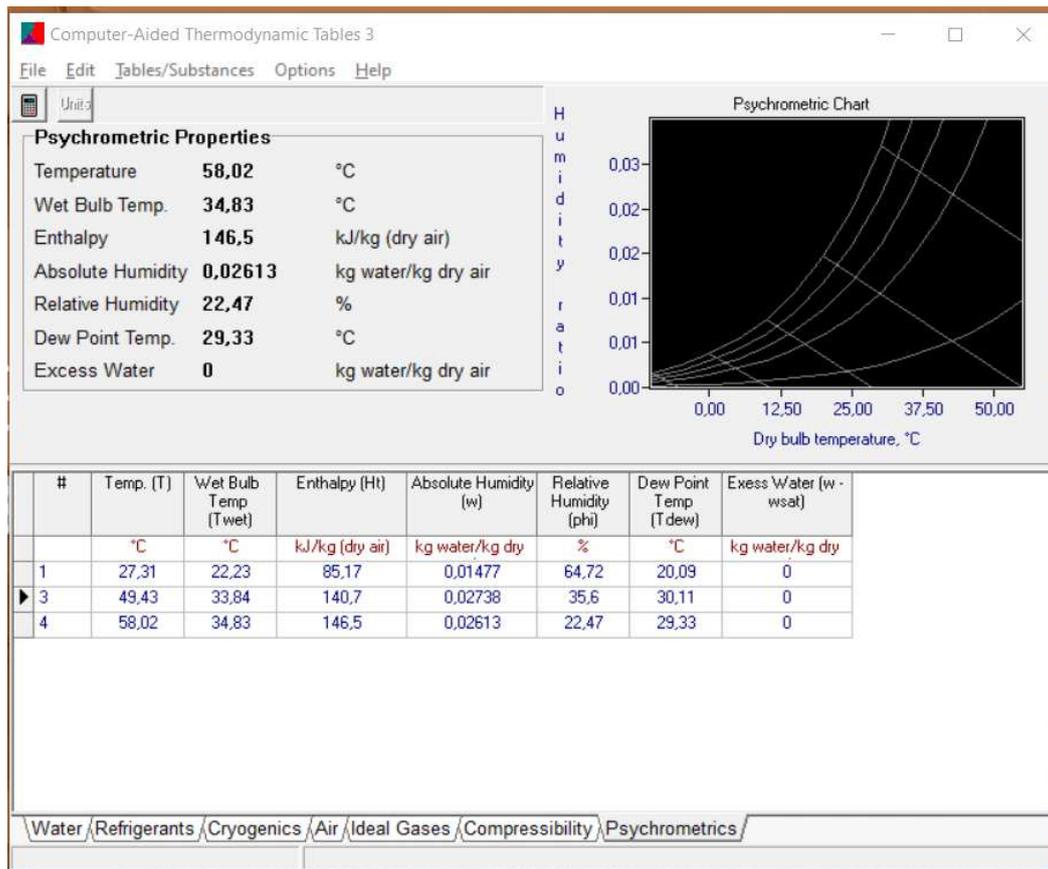
O processo 1→ 3 é análogo, porém com variações de temperatura e umidade relativa do ar menores, devido a menor eficiência da cobertura de polipropileno se comparada a cobertura de policarbonato.

Para calcular o rendimento térmico através do método do balanço energético, foram utilizados os dados obtidos para temperatura e umidade relativa do ar de secagem e, baseando-se na Primeira Lei da Termodinâmica, foi utilizada a Equação 3.10. Tais conceitos foram novamente aplicados apenas nos experimentos realizados nos secadores, comparando apenas o efeito das diferentes coberturas na eficiência termodinâmica (visto que são necessárias informações de entrada e saída, tendo um volume de controle bem definido). Na secagem ao ar livre não há volume de controle.

Inicialmente foram determinados os dados de entalpias específicas, necessárias às equações termodinâmicas. Tais dados foram encontrados a partir das médias de temperatura e umidade relativa do ar ambiente e de ambos os secadores durante o Experimento 3 e inseridas no CATT. Para efeito de volume de controle, a temperatura e umidade de entrada utilizada foi a ambiente, e a de saída respectiva de cada secador (com suas características de cobertura diferentes).

Na Figura 4.35, o estado 1 representa as características termodinâmicas do ar ambiente - que é a mesma de entrada em ambos os secadores - e os estados 2 e 3 representam as características do ar na saída dos secadores com cobertura de polipropileno e policarbonato, respectivamente. Tais informações são de suma importância para o cálculo da eficiência energética do secador.

Figura 4.35: Dados termodinâmicos do Experimento 3 obtidos pelo CATT.



Fonte: Próprio Autor.

Substituindo os valores para o secador com cobertura de policarbonato, tem-se:

$$\eta_{\text{secador}} = \frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{\dot{Q}_{\text{solar}}}$$

$$\frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{\dot{Q}_{\text{solar}}} = \frac{0,0018383 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left(146,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 85,17 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + (0,00040416 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 146,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})}{1 \text{ m}^2 \cdot 0,446 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} = 38,24\%$$

Substituindo os valores para o secador com cobertura de polipropileno, tem-se:

$$\eta_{\text{secador}} = \frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{\dot{Q}_{\text{solar}}}$$

$$\frac{0,0018383 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left(140,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 85,17 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + (0,00040416 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 140,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})}{1 \text{ m}^2 \cdot 0,446 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} = 35,59\%$$

Observou-se que o valor da eficiência do secador com cobertura de policarbonato foi levemente superior ao secador com cobertura de polipropileno. Este resultado foi dentro do esperado, visto que, em testes preliminares comparando as diferentes coberturas, observou-se valores de temperatura maiores no secador com cobertura de policarbonato em comparação ao polipropileno. A hipótese para a proximidade das eficiências está relacionada à baixa irradiação solar média, o que torna os valores bastante próximos.

Mais uma vez, foi realizada o cálculo do consumo específico de secagem, sendo este mais um índice de comparação entre as três situações.

A energia térmica recebida, durante a realização do experimento 3, foi de 3422,73 Wh/m² no primeiro dia de experimento e 3714,98 Wh/m² no segundo dia, totalizando 7.136,71 Wh/m² nos dois dias de experimento. O sistema de secagem solar utilizado nesta pesquisa possui um coletor com área de incidência solar de 1 m².

Convertendo em kWh a energia térmica, o valor da energia utilizada para secagem solar foi de 7.136,71 kWh. Após a determinação da energia térmica utilizada no experimento, com o auxílio da equação 3.13 apresentada anteriormente no capítulo 3, foi possível determinar o consumo específico de energia (CEE).

Assim, com os dados dos teores de umidade inicial e final do produto, considerando o valor total da amostra do produto utilizado no experimento e a energia térmica recebida pela irradiação solar durante o experimento, foi determinado o consumo específico de energia (CEE). Na Tabela 4.9, pode ser observado os valores de energia consumida, umidade inicial do produto, umidade final do produto, massa inicial do produto, bem como o cálculo do consumo específico de energia para cada situação do experimento (Cobertura de policarbonato, Cobertura de Polipropileno e Secagem ao ar livre).

Tabela 4.9- Valores de Energia consumida, teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia no Exp.3 para cada situação

Tipo de sistema de secagem	EC (kWh)	Ui (% bu)	Uf (% bu)	Mi (kg)	CEE (kWh/kg)
Secador de Policarbonato	7,14	30	3	1	23,80
Secador de Polipropileno	7,14	30	6	1	25,65
Secagem ao ar livre	7,14	30	13	1	26,36

Fonte: Próprio Autor..

Novamente, sintetizou-se os resultados do Experimento 3 na Tabela 4.10 e foi possível a comparação, do ponto de vista de eficiência térmica do processo de secagem, entre as três situações em que o caulim foi exposto, do ponto de vista de eficiência térmica do processo de secagem.

Tabela 4.10 - Resultados de rendimento térmico, quantidade de água retirada e CEE para o Experimento 3

Tipo de sistema de secagem	Rendimento térmico (%)	Quantidade de água ret. no intervalo de tempo (g/h)	CEE (kWh/kg)
Secador policarbonato	38,24	17,63	23,80
Secador polipropileno	35,59	16,19	25,65
Secagem natural	-	12,88	26,36

Fonte: Próprio Autor.

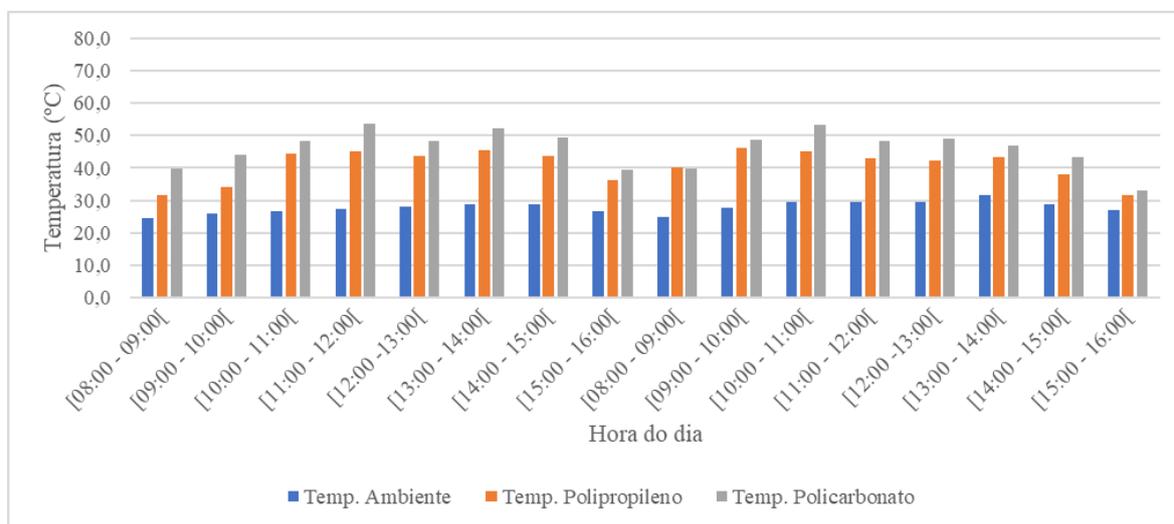
4.2.4 Experimento 4 (E4), realizado em 03 e 04 de agosto de 2021 na INCOMGEL

Seguindo com a segunda bateria de experimentos, foi realizado um quarto (E4) experimento; este na empresa INCOMGEL, em Assunção-PB. O objetivo deste experimento foi utilizar o secador de dimensões otimizadas para a realização da secagem em condições de radiação e velocidade do ar encontradas pelas empresas da região da Província Pegmatítica Borborema. Isto permitiu comparar o funcionamento dos mesmos sistemas de secagem solar em duas cidades com características meteorológicas distintas (Campina Grande – PB e Assunção – PB).

Durante os dois dias de experimento, as condições climáticas encontradas foram características do inverno na região, com certa nebulosidade e ventos com intensidade acima da média, o que foi percebido pelas medições realizadas durante os experimentos.

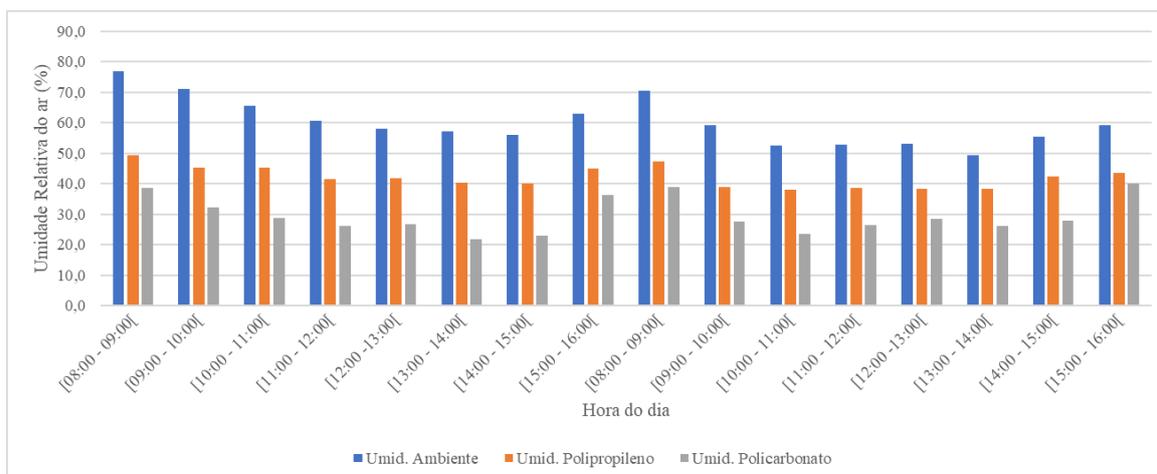
Nas Figuras 4.36 e 4.37, podem-se observar os valores de temperatura e umidade relativa do ambiente e no interior dos secadores com cobertura de policarbonato e polipropileno no Experimento 4.

Figura 4.36 - Distribuição de temperatura do ar ambiente na entrada e na saída dos secadores solar durante o E4.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.37 - Distribuição de umidade relativa do ar ambiente na entrada e na saída dos secadores solar durante o Experimento 4.



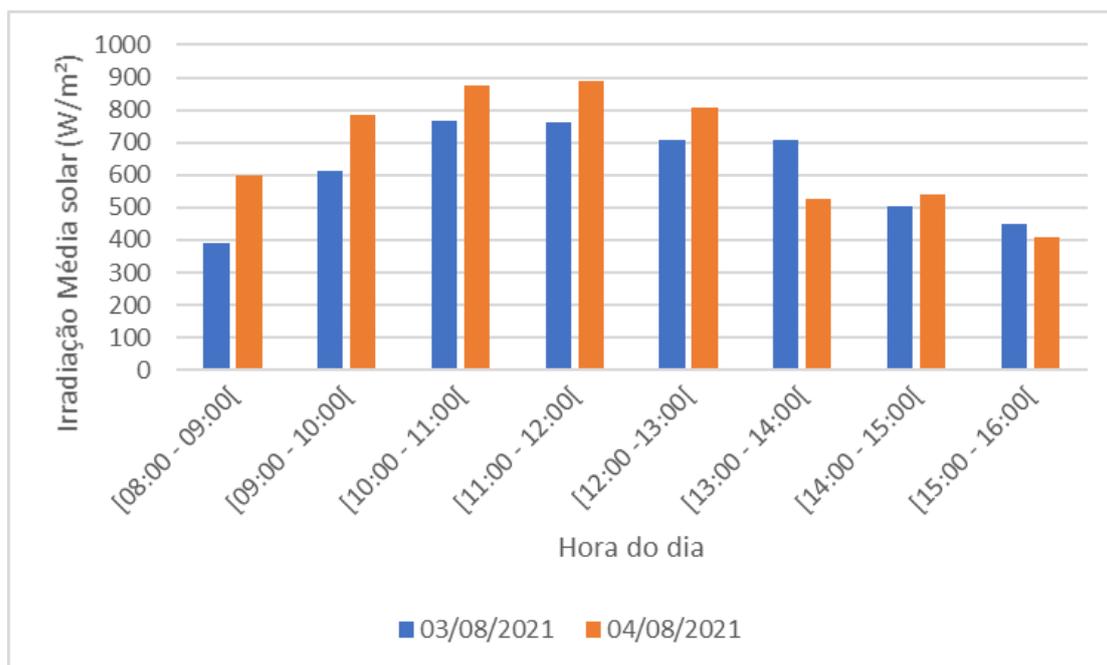
Fonte: Próprio Autor.

Da mesma forma como o observado nos experimentos anteriores, a temperatura no interior de ambos os secadores, a todo o momento, foi superior à temperatura ambiente, confirmando a hipótese de que os secadores solares atuam de maneira eficiente para que a temperatura no interior do secador seja elevada, facilitando a etapa de secagem do produto, pois o mesmo consegue liberar a água presente de maneira mais rápida devido às propriedades do ar. Consequentemente, com o aumento da temperatura, observou-se a queda nos valores de umidade relativa, que diminuem significativamente na saída do secador.

Outro ponto observado sobre as temperaturas medidas, se comparadas aos outros experimentos, é que são menores no E4. A justificativa para este fenômeno está relacionada à alta velocidade de circulação do ar, fazendo com que o ar permaneça pouco tempo no interior do secador e, assim, não se aqueça a altas temperaturas, como em outros experimentos realizados.

A Figura 4.38 mostra a média horária da intensidade de radiação solar nos dias em que foram feitos os testes experimentais E4.

Figura 4.38 - Média das irradiações durante o Experimento 4.



Fonte: Próprio Autor.

É possível observar que as condições climáticas em ambos os dias foram bastante similares. A média de irradiação solar, ao longo dos dois dias, foram muito próximas, sendo no primeiro dia da ordem de 561,55 W/m² e, no segundo dia, da ordem de 647,46 W/m². Neste experimento, obteve-se uma irradiação média de, aproximadamente, 604,51 W/m². Na Tabela 4.11 são apresentados os valores obtidos para massa de caulim a cada 60 minutos de teste, sendo a primeira medição às 08:00 h e a última do dia às 16:00 h, para os dois dias do experimento E4 (03 e 04 de agosto de 2021).

Tabela 4.11 - Dados de massa obtidos no Experimento 4.

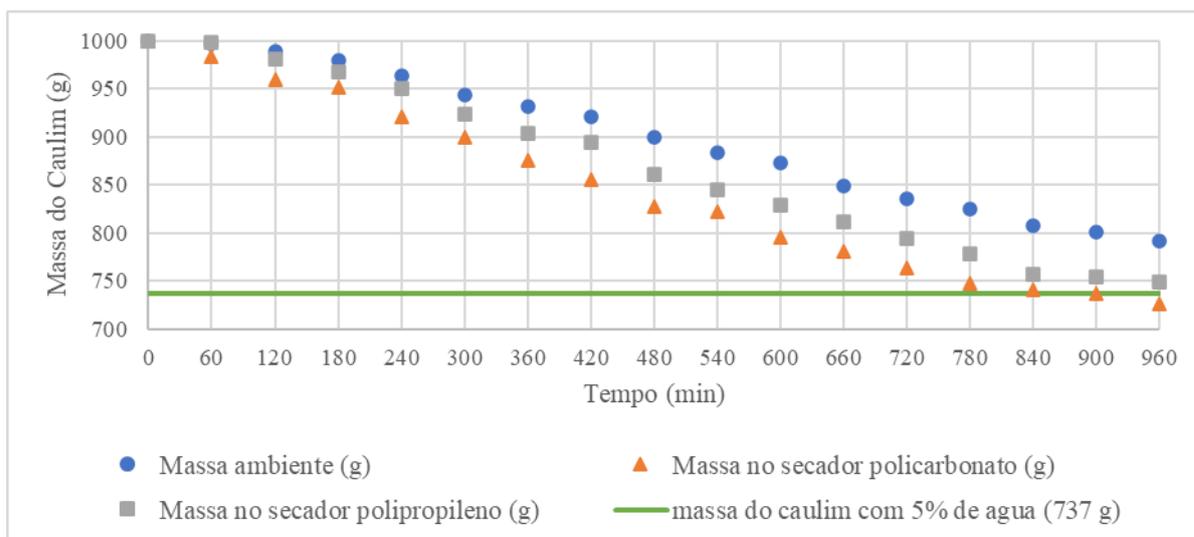
Tempo de experimento (min)	Hora do dia (h)	Amostra Ambiente					Secador 1 (policarbonato)					Secador 2 (polipropileno)				
		Massa total (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	RU	Massa total (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	RU	Massa total (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	RU
0	08:00	1000,00	700,00	0,30	0,43	1,00	1000,00	700,00	0,30	0,43	1,00	1000,00	700,00	0,30	0,43	1,00
60	09:00	997,00	700,00	0,30	0,42	0,99	983,00	700,00	0,29	0,40	0,94	998,00	700,00	0,30	0,43	0,99
120	10:00	989,00	700,00	0,29	0,41	0,95	960,00	700,00	0,27	0,37	0,85	981,00	700,00	0,29	0,40	0,92
180	11:00	980,00	700,00	0,29	0,40	0,90	951,00	700,00	0,26	0,36	0,82	967,00	700,00	0,28	0,38	0,87
240	12:00	964,00	700,00	0,27	0,38	0,83	921,00	700,00	0,24	0,32	0,71	950,00	700,00	0,26	0,36	0,80
300	13:00	944,00	700,00	0,26	0,35	0,73	899,00	700,00	0,22	0,28	0,63	924,00	700,00	0,24	0,32	0,70
360	14:00	932,00	700,00	0,25	0,33	0,67	876,00	700,00	0,20	0,25	0,55	903,00	700,00	0,22	0,29	0,61
420	15:00	921,00	700,00	0,24	0,32	0,62	856,00	700,00	0,18	0,22	0,47	894,00	700,00	0,22	0,28	0,58
480	16:00	904,00	700,00	0,23	0,29	0,54	834,00	700,00	0,16	0,19	0,39	875,00	700,00	0,20	0,25	0,50
540	09:00	884,00	700,00	0,21	0,26	0,44	822,00	700,00	0,15	0,17	0,35	845,00	700,00	0,17	0,21	0,38
600	10:00	873,00	700,00	0,20	0,25	0,39	796,00	700,00	0,12	0,14	0,25	829,00	700,00	0,16	0,18	0,32
660	11:00	849,00	700,00	0,18	0,21	0,27	781,00	700,00	0,10	0,12	0,20	812,00	700,00	0,14	0,16	0,25
720	12:00	835,00	700,00	0,16	0,19	0,21	764,00	700,00	0,08	0,09	0,14	794,00	700,00	0,12	0,13	0,18
780	13:00	825,00	700,00	0,15	0,18	0,16	748,00	700,00	0,06	0,07	0,08	779,00	700,00	0,10	0,11	0,12
840	14:00	807,00	700,00	0,13	0,15	0,07	741,00	700,00	0,06	0,06	0,05	757,00	700,00	0,08	0,08	0,03
900	15:00	801,00	700,00	0,13	0,14	0,04	737,00	700,00	0,05	0,05	0,04	754,00	700,00	0,07	0,08	0,02
960	16:00	792,00	700,00	0,12	0,13	0,00	727,00	700,00	0,04	0,04	0,00	749,00	700,00	0,07	0,07	0,00

Fonte: Próprio Autor.

Também conforme realizado em experimentos anteriores, foi considerado que o teor de umidade inicial do caulim, em base úmida, foi de 30%. No secador com cobertura de policarbonato, depois de 14 h (quatorze) horas de secagem, foi obtido o teor de umidade em 5%, o recomendado para a etapa seguinte de beneficiamento (moagem). Já no secador com cobertura de polipropileno, o teor de umidade de 5% foi atingido 2 horas depois em comparação ao secador com cobertura de policarbonato, como mostrado na Figura 4.39.

Essa variação já se mostrou considerável. Por outro lado, observou-se que a amostra exposta ao meio ambiente e à radiação solar direta não atingiu a umidade desejada, inferior a 5%, não estando em condições para seguir para a próxima etapa de beneficiamento após 16 horas de secagem ao ar livre. A Figura 4.39 mostra a variação da massa do caulim *versus* o tempo ao longo do experimento. Esses resultados foram obtidos a partir da Tabela 4.11.

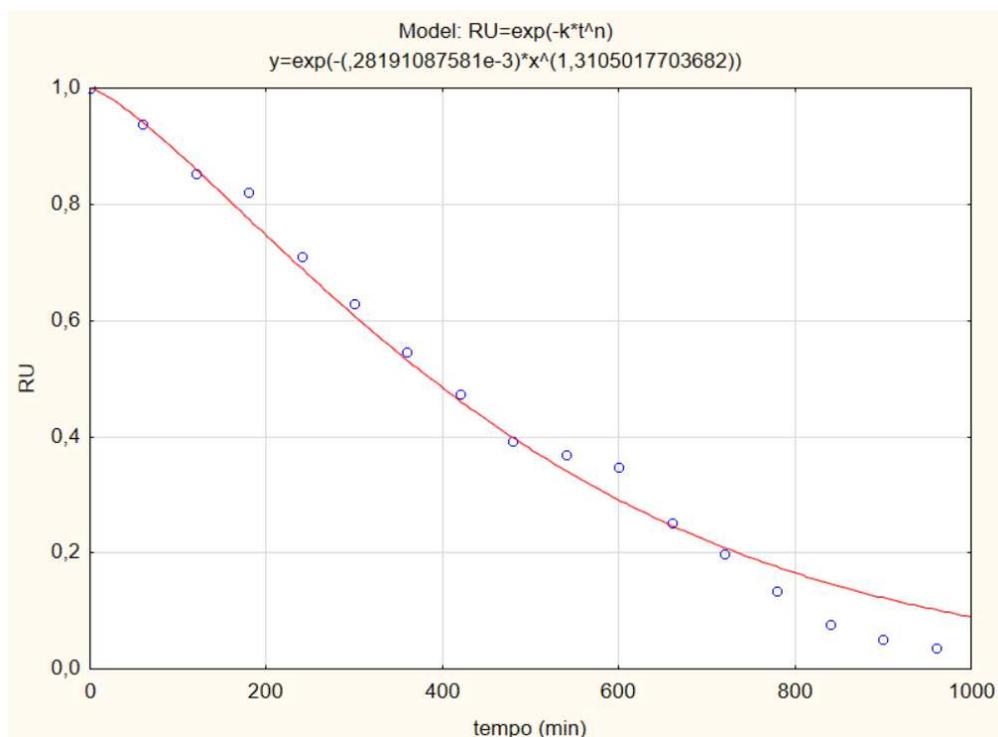
Figura 4.39 - Variação da massa de caulim em relação ao tempo no Experimento 4.



Fonte: Próprio Autor.

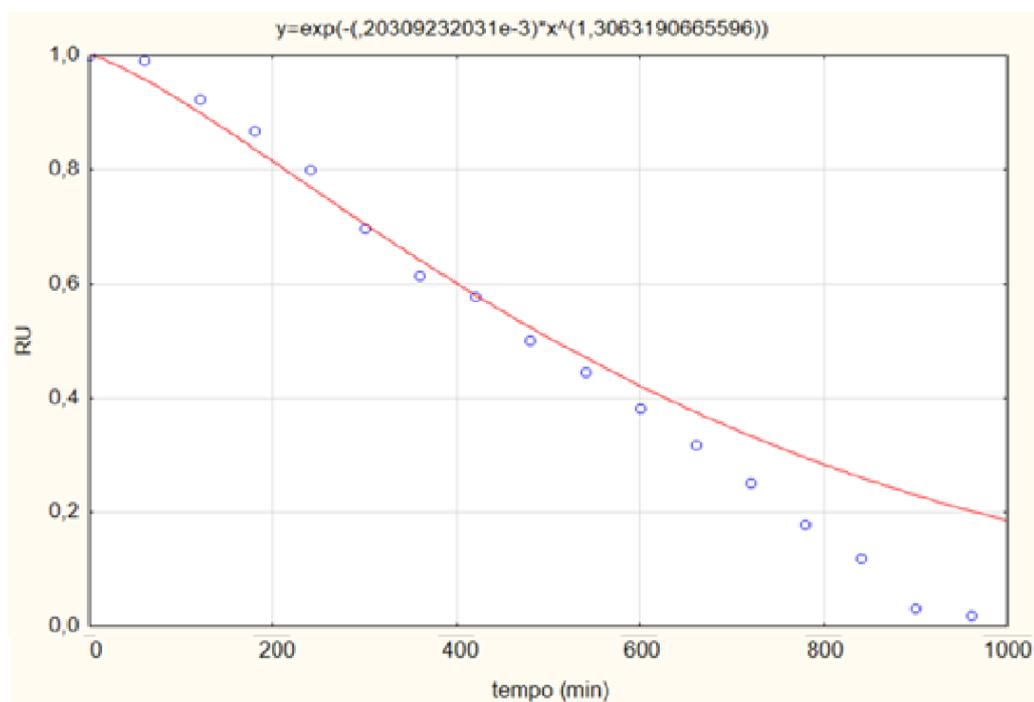
Também para o Experimento 4, foram determinadas as cinéticas de secagem ajustadas pelo modelo de Page. Tais curvas estão apresentadas nas imagens da Figura 4.40, Figura 4.41 e Figura 4.42, representando a cinética de secagem com cobertura de policarbonato, secagem com cobertura polipropileno e secagem com ao ar livre, respectivamente, e obtidas através dos dados da Tabela 4.11.

Figura 4.40- Cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page, secador com cobertura de policarbonato (EXP4).



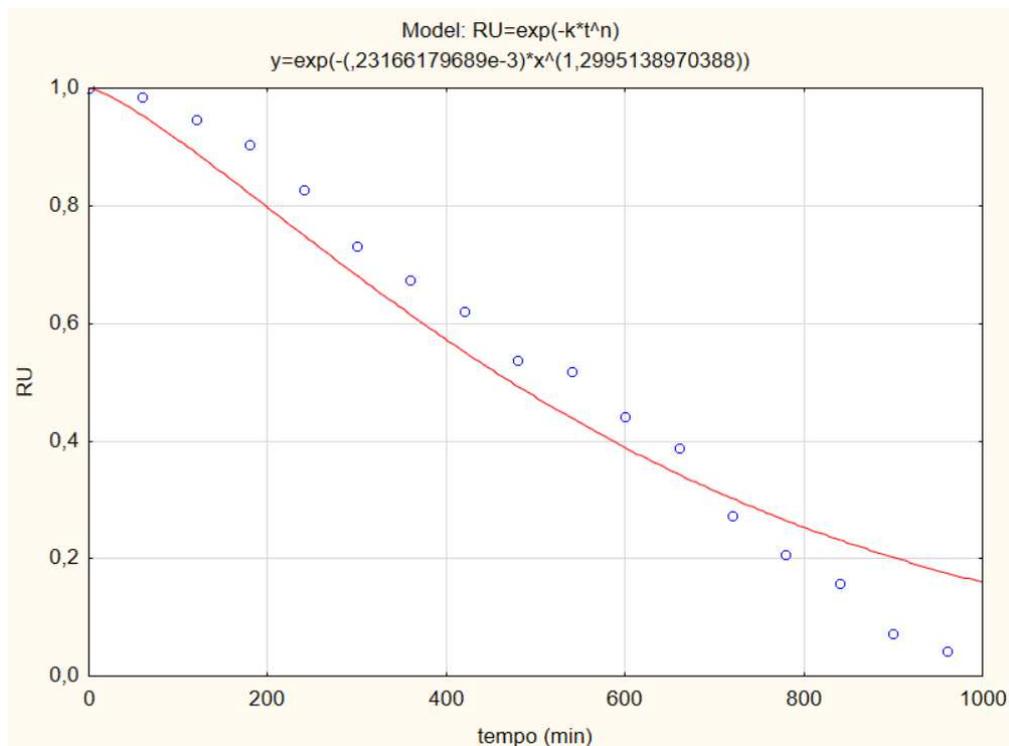
Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.41 - Cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page, secador com cobertura de polipropileno (EXP2).



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.42 - Cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page, secagem ao ar livre (EXP4).



Fonte: Próprio Autor.

Através do ajuste do ao modelo matemático de Page ao gráfico da cinética de secagem, chegou-se a um coeficiente de determinação de 99,16% para o processo de secagem com o secador com cobertura de policarbonato; 96,06% para o processo de secagem com o secador com cobertura de polipropileno e 97,20% para o processo de secagem ao ar livre.

Como realizado nos experimentos anteriores, novamente foi calculada também a velocidade de retirada de massa de água das amostras de caulim. Esse parâmetro é interessante para poder comparar os três experimentos, considerando que os mesmos estavam sob as mesmas condições de velocidade do ar, umidade relativa do ar e irradiação solar. Foi utilizada a Equação 3.12, onde se substituí os valores da massa inicial e final de caulim obtidos da Tabela 4.9.

Substituindo os valores para o processo de secagem no secador com cobertura de policarbonato, tem-se:

$$\Delta m / \Delta t = \frac{1000 \text{ g} - 727 \text{ g}}{16 \text{ h}} = 17,06 \text{ g/h}$$

Substituindo os valores para o processo de secagem no secador com cobertura de polipropileno, tem-se:

$$\Delta m/\Delta t = \frac{1000 \text{ g} - 749 \text{ g}}{16 \text{ h}} = 15,69 \text{ g/h}$$

Substituindo os valores para a secagem ao ar livre, tem-se:

$$\Delta m/\Delta t = \frac{1000 \text{ g} - 792 \text{ g}}{16 \text{ h}} = 13,00 \text{ g/h}$$

Mais uma vez a secagem com o secador com cobertura de Policarbonato se mostrou a mais eficiente do ponto de vista da taxa de retirada de água por tempo, durante o experimento.

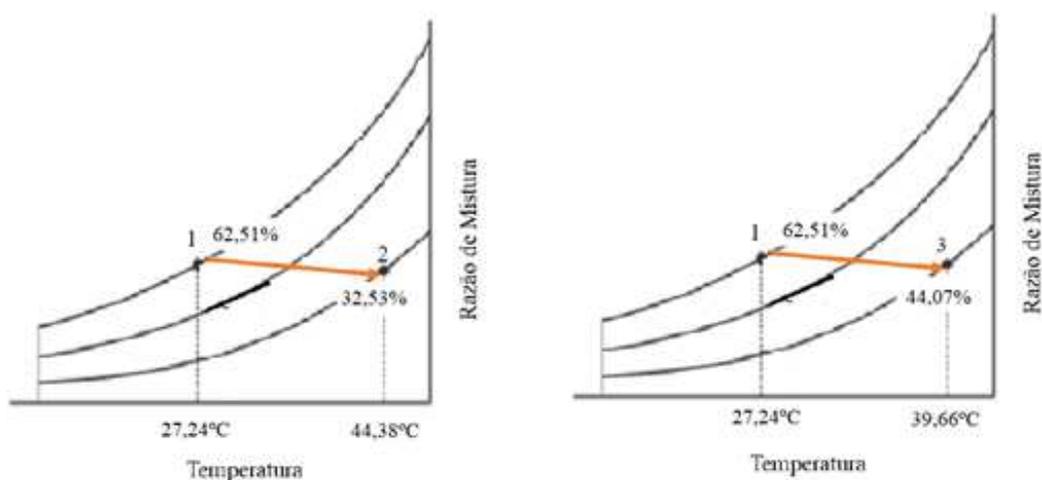
A Figura 4.43 apresenta, na carta psicrométrica, a média da temperatura e umidade relativa do ar durante a realização do Experimento 4.

✓ ponto 1 representa o estado termodinâmico 1, na entrada dos sistemas de secagem com secadores – que é a temperatura ambiente;

✓ ponto 2 representa o estado termodinâmico 2, na saída do secador com cobertura de policarbonato;

✓ ponto 3 representa o estado termodinâmico 3, na saída do secador com cobertura de polipropileno;

Figura 4.43 Condições psicrométricas do ar no experimento 4



Fonte: Próprio Autor.

1 → 2 representa o processo termodinâmico pelo qual o ar ambiente passa do estado 1 para o estado 2 no interior do secador com cobertura de policarbonato. O ar ambiente é aquecido por meio da energia transferida pelo capacitor térmico e, com esse aumento da temperatura do ar (de 27,24°C para 44,38°C), ocorre uma redução da umidade relativa (de 62,51% para 32,53%).

O ar aquecido e com uma umidade relativa menor, ao entrar em contato com as amostras de caulim, provoca uma transferência de calor do fluido de trabalho para o caulim e uma transferência de massa de vapor de água do caulim para o fluido de trabalho, resultando na secagem das amostras.

O processo 1 → 3 é análogo, porém com variações de temperatura e umidade relativa do ar menores, devido a menor eficiência da cobertura de polipropileno se comparada a cobertura de policarbonato.

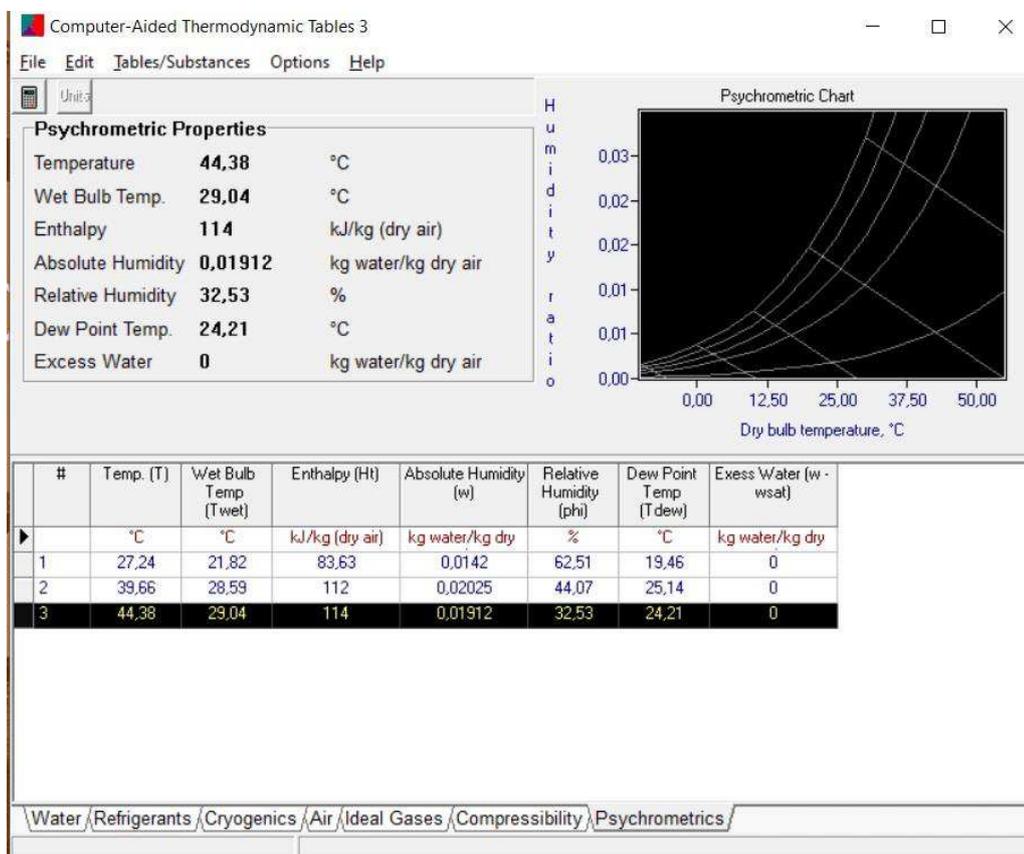
No cálculo do balanço energético, foram utilizados os dados obtidos para temperatura e umidade relativa do ar de secagem e, baseando-se na Primeira Lei da Termodinâmica, foi utilizada a Equação 3.10. Tais conceitos foram novamente aplicados apenas nos experimentos realizados nos secadores, comparando apenas o efeito das diferentes coberturas na eficiência termodinâmica (visto que são necessárias informações de entrada e saída, tendo um volume de controle bem definido). Na secagem ao ar livre, não há volume de controle.

Assim como realizado para medir o rendimento nos experimentos mostrados anteriormente, inicialmente foram determinados os dados de entalpias específicas, necessárias às equações termodinâmicas. Tais dados foram encontrados a partir das médias de temperatura e umidade relativa do ar ambiente e de ambos os secadores durante o Experimento 4, e inseridas no CATT. Para efeito de volume de controle, a temperatura e umidade de entrada utilizada foi a ambiente, e a de saída respectiva de cada secador (com suas características de cobertura diferentes).

Na Figura 4.43, o estado 1 representa as características termodinâmicas do ar ambiente - que é a mesma de entrada em ambos os secadores - e os estados 2 e 3 representam as características do ar na saída do secador com cobertura de polipropileno e policarbonato,

respectivamente. Tais informações são de suma importância para o cálculo da eficiência energética do secador.

Figura 4.44: Dados termodinâmicos do Experimento 4 obtidos pelo CATT.



Fonte: Próprio Autor.

Substituindo os valores para o secador com cobertura de policarbonato, tem-se:

$$\eta_{\text{secador}} = \frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{\dot{Q}_{\text{solar}}}$$

$$\frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{\dot{Q}_{\text{solar}}} = \frac{0,005949 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left(114 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 83,63 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + (0,00040416 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 114 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})}{1 \text{ m}^2 \cdot 0,605 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} = 37,48\%$$

Substituindo os valores para o secador com cobertura de polipropileno, tem-se:

$$\eta_{\text{secador}} = \frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{\dot{Q}_{\text{solar}}}$$

$$\frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{\dot{Q}_{\text{solar}}} = \frac{0,005949 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (112 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 83,63 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) + (0,00040416 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 112 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})}{1 \text{ m}^2 \cdot 0,605 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} = 35,38\%$$

Observou-se, mais uma vez, que o valor da eficiência do secador com cobertura de policarbonato foi levemente superior ao secador com cobertura de polipropileno. Este resultado está dentro do esperado, visto que, em testes preliminares, comparando as diferentes coberturas, observou-se valores de temperatura maiores no secador com cobertura de policarbonato em comparação ao polipropileno. Outra hipótese para a proximidade das eficiências está relacionada à baixa irradiação solar média e alta velocidade do ar, o que torna os valores bastante próximos.

Mais uma vez, foi realizada o cálculo do consumo específico de energia, sendo este mais um índice de comparação entre as três situações.

A energia térmica recebida durante a realização do Experimento 4, foi de 4600,99 Wh/m² no primeiro dia de experimento e 5080,11 Wh/m² no segundo dia, totalizando 9.680,12 Wh/m² nos dois dias de experimento. O sistema de secagem solar utilizado nesta pesquisa possui um coletor com área de incidência solar de 1 m².

Convertendo em kWh a energia térmica, o valor da energia utilizada para secagem solar foi de 9,680 kWh. Após a determinação da energia térmica utilizada no experimento, com o auxílio da equação 3.13, foi possível determinar o consumo específico de energia (CEE).

Assim, com os dados dos teores de umidade inicial e final do produto, considerando o valor total da amostra do produto utilizado no experimento e a energia térmica recebida pela irradiação solar durante o experimento, foi determinado o consumo específico de energia (CEE). Na Tabela 4.11 pode ser observado os valores de energia consumida, umidade inicial do produto, umidade final do produto, massa inicial do produto bem como o cálculo do consumo específico de energia para cada situação do experimento (Cobertura de policarbonato, Cobertura de Polipropileno e Secagem ao ar livre).

Tabela 4.12 - Valores de Energia consumida, teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia no Exp 4 para cada situação

Tipo de sistema de secagem	EC (kWh)	Ui (% bu)	Uf (% bu)	Mi (kg)	CEE (kWh/kg)
Secador de Policarbonato	9,68	30	4	1	35,74
Secador de Polipropileno	9,68	30	7	1	39,14
Secagem ao ar livre	9,68	30	13	1	49,53

Fonte: Próprio Autor.

Novamente, sintetizou-se os resultados do Experimento 4 na Tabela 4.12 e tornou-se possível a comparação dentre as três situações em que o caulim foi exposto, no ponto de vista de eficiência térmica do processo de secagem.

Tabela 4.13 - Resultados de rendimento térmico, quantidade de água retirada e CEE para o Experimento 4

	Rendimento térmico (%)	Quantidade de água ret. no intervalo de tempo (g/h)	CEE (kJ/kg)
Secador policarbonato	37,48	17,06	35,74
Secador polipropileno	35,38	15,69	39,14
Secagem natural	-	13,00	49,53

Fonte: Próprio Autor.

Por fim, a Tabela 4.14 sintetiza os experimentos, e a partir dela podemos comparar os diversos parâmetros observados.

TABELA 4.14 - Resumo dos principais resultados obtidos a partir dos experimentos

Experimento	Data	Local	Estação	Irradiação Solar (W/m ²)	Rendimento η_{secador} (%)	$\Delta m/\Delta t$ (g/h)	CEE (kWh/kg)	Sistema de Secagem testado
E1	04 a 05/11/2020	Assunção-PB INCONGEL	Verão	983,07	32,85	3,68	58,89	Policarbonato
					24,12	3,41	63,69	Polipropileno
					-	3,19	67,56	Natural (céu aberto)
E2	10 a 11/12/2020	Assunção-PB INCONGEL	Verão	964,94	33,51	3,71	56,83	Policarbonato
					25,03	3,51	61,25	Polipropileno
					-	3,35	62,95	Natural (céu aberto)
E3	14 a 19/07/2021	Campina Grande-PB UFCG	Inverno	446,87	38,24	17,63	23,8	Policarbonato
					35,39	16,19	25,65	Polipropileno
					-	12,88	26,36	Natural (céu aberto)
E4	03 a 04/08/2021	Assunção-PB INCONGEL	Inverno	604,51	37,48	17,06	35,74	Policarbonato
					35,38	15,69	39,14	Polipropileno
					-	13,00	49,53	Natural (céu aberto)

Fonte: Próprio Autor.

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Em todos os experimentos foram observadas condições meteorológicas semelhantes as observadas na região durante as estações da primavera e no início do verão. Tais condições propiciaram uma secagem ao ar livre de exposição direta do produto ao sol. Durante o inverno, a região encontra alguns problemas como muita nebulosidade e um ar mais úmido, o que resulta no aumento do tempo necessário para que o caulim atinja as condições necessárias para seguir para as próximas etapas de beneficiamento.

O tempo necessário para que o caulim atingisse a umidade inferior a 5%, em todos os experimentos, foi muito próximo, mas, pôde-se observar que este tempo sempre ocorreu primeiro nos secadores em comparação com a secagem ao ar livre. Isso mostra a relevância da inclusão de novas tecnologias para a secagem, de modo a acelerar esse processo e trazer maior sustentabilidade ambiental e econômico.

Os experimentos realizados mostraram que a etapa de secagem realizada no secador com cobertura de policarbonato foi a mais eficiente em todos os parâmetros analisados. O equipamento com cobertura de policarbonato obteve um rendimento térmico superior ao equipamento com cobertura de polipropileno. A quantidade retirada de água do produto também foi maior nessas condições em comparação, também, com a secagem ao ar livre, o que permite concluir que ambientes de secagem que utilizam tecnologias apropriadas podem tornar o processo mais eficiente.

O consumo específico de energia (CEE) também mostrou qual dos processos foi o que demandou menos energia para a realização da secagem. Vale ressaltar que, em todas as condições, o produto ficou em condições de seguir para a próxima etapa de beneficiamento (moagem).

4.6 PROPOSTAS E MODIFICAÇÕES JÁ IMPLEMENTADAS

A partir dos resultados obtidos e diálogos com os gestores da empresa, iniciou-se o projeto de implantação de um sistema de geração de energia fotovoltaica, visto que o potencial de radiação solar local é estratégico e os constantes aumentos nas tarifas de energia elétrica

impactam significativamente no beneficiamento de minério em virtude da grande quantidade de equipamentos elétricos em funcionamento para o beneficiamento do caulim como produto final.

Foi realizado um levantamento do consumo energético da empresa considerando os seus últimos 12 meses e dimensionado o número de painéis solares necessários para suprir as demandas de todos os equipamentos da empresa. O consumo médio registrado foi da ordem de 20000 kW/mês. A partir dessa informação, está em implementação um sistema de geração de energia solar elétrico fotovoltaico, com uma área de painéis de cerca de 750 m².

A Figura 4.45 mostra a fase atual no projeto (agosto de 2021), onde os painéis estão em fase de instalação.

Figura 4.45 - Instalação do Sistema fotovoltaico de energia



Fonte: Próprio Autor.

Outro ponto observado ao longo dos estudos e conversado com a gerência estava relacionado à disposição do material para a etapa de secagem. Não existia a preocupação de

deixar material com mais umidade próximo de material já seco, o que ocasionava a absorção de umidade por parte do produto já seco, diminuindo a produtividade e eficiência do processo.

Assim, ficou acordado que os galpões seriam separados com o objetivo de receber os materiais com umidade diferentes (vindos de outros fornecedores úmidos ou secos) para as etapas seguintes de *blend* e moagem. A Figura 4.46 mostra o pátio escolhido para a disposição do material mais úmido e oriundo de outras empresas

Figura 4.46 - Pátio para recebimento do caulim com umidade.



Fonte: Próprio Autor.

Outra sugestão estava relacionada ao uso de sopradores com consumo de energia elétrica mais baixo e em contato com uma quantidade maior de caulim. Após estudos e análise da viabilidade técnica e financeira, a empresa fez aquisição de novos equipamentos com melhor eficiência, o que proporcionou uma convecção melhor distribuída e uniforme do ar de secagem no produto durante o processo de desumidificação. Na Figura 4.47, é observado a utilização de novos sopradores. Os mesmos se mostraram mais eficientes na circulação de ar e aceleraram a secagem do caulim, devido à maior circulação de ar.

Figura 4.47: Novos sopradores de ar utilizados pela INCOMGEL.



Fonte: Próprio Autor.

Para melhor utilização da área com cobertura de polipropileno, uma sugestão dada foi a utilização de prateleiras que possibilitariam uma maior área de exposição do minério ao ar. Esta foi outra sugestão prontamente acatada pela gerência, que se mostrou bastante eficiente e com bons resultados.

A Figura 4.48 mostra a cobertura com polipropileno, já com prateleiras, aumentando consideravelmente a sua capacidade de secagem. A grande quantidade de caulim se dá também por causa da época do ano (inverno), quando a produção de caulim seco é impactada pelas condições meteorológica menos favoráveis ao processo de secagem, tornando o processo de secagem mais lento.

Figura 4.48 - Área de secagem com cobertura de polipropileno após a inclusão de prateleiras.



Fonte: Próprio Autor.

CONCLUSÕES

CONCLUSÕES

O principal problema associado a baixa eficiência do processo de secagem identificado foi o uso da lenha. A queima de lenha nesse setor tem contribuído para aumentar o desmatamento e a poluição ambiental. Também foi observado que o uso da lenha como energético está relacionado a problemas culturais, socioeconômicos e estruturais. Por isso foi sugerida uma gestão do negócio com foco na eficiência energética e no desenvolvimento sustentável. Também foi identificado que a solução para melhorar a eficiência energética passa pelo uso da energia solar, substituindo a lenha como fonte de energia, recurso que está disponível na região da PPB.

Os dados de recurso solar disponível na região da PPB, se mostraram muito favorável devido seu alto potencial energético. A média de irradiação solar no período de verão foi de 974,01 W/m² e de 604,51 W/m² no inverno. O número de horas de sol diário foi de cerca de 12 horas em ambas as estações, uma vez que a presença de chuvas e nuvens é muito pequena. A direção predominante do vento, observada, nessa pesquisa, foi vento Leste com variação para Nordeste e Sudeste.

O ar ambiente medido na região da PPB possuía temperatura média 34,94°C e umidade relativa de 53,86% no verão, e 29,45°C de temperatura e 65,06% de umidade relativa no inverno e velocidade de 2,0 m/s durante todo ano. Com essas condições foi proposta várias modificações no posicionamento, layout, tipo de cobertura dos galpões na empresa INCOMGEL, várias dessas já implementadas.

A partir de testes experimentais realizados, foi possível obter a cinética de secagem para o caulim, em diferentes configurações de sistemas de secagem solar. Os resultados mostraram uma aderência ao modelo de Page onde o coeficiente de determinação (R²) foi superior a 95% independente da estação do ano.

Os experimentos realizados para três sistemas de secagem solar (a céu aberto e em dois secadores idênticos, sendo um com cobertura de policarbonato e outro com cobertura de polipropileno) mostraram que o sistema de secagem com cobertura de policarbonato foi o mais eficiente em todos os parâmetros medidos, tanto no verão como no inverno.

Um sistema de energia solar fotovoltaico foi projetado para suprir a demanda energética do soprador industrial de 2,5 kW e resultou em 13 painéis com cerca de 1,6 m² cada. Foi proposta e implantada a substituição do soprador por ventiladores mais eficientes que se mostrou uma solução adequada, pois foi capaz de gerar uma maior circulação de ar nos ambientes de secagem e consumir menos energia elétrica. A partir dessa proposta, a empresa resolveu implantar um sistema de energia solar fotovoltaico capaz de atender toda a demanda de energia elétrica da empresa.

A empresa objeto do estudo instalou 750 m² de painéis solares e agora produz toda a energia elétrica necessária à sua operação, e assim não utiliza mais a lenha nos processos de secagem do caulim, tornando o processo de beneficiamento do minério mais sustentável. Atualmente é um modelo de gestão na área de eficiência energética na região da PPB.

Sugestões de trabalhos futuros

- Desenvolver tecnologias para secagem de outros minérios da PPB a partir de energias renováveis e disponibilidade de recursos;
- Desenvolver pesquisas voltadas para a compreensão da cinética de secagem tanto para o caulim como de outros minérios;
- Compreender o comportamento da cinética de secagem de outros minérios da PPB;
- Aplicar outros modelos de cinética de secagem no próprio minério de caulim da PPB, e verificar a sua aderência.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA F. F. M.; DE HASUI Y.; BRITO-NEVES B. B DE.; FUCK R. A. Brazilian: an introduction. **Earth-Sci. Rev.** vol.78, p. 1-29. 1981.

ANUNCIACÃO, E. B. B. **Utilização de um secador solar para a desintoxicação da torta de mamona.** 2007. 88p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN. Natal, RN. 2007.

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.

BARBOSA, J. R. P. **Estudo de viabilidade de uso de secadores solares fabricados com sucatas de luminárias.** 2011 69p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN. Natal, RN. 2011.

BRISTOW, C. M. World Kaolins: genesis, exploitation and application. **Industrial Minerals**, v. 3, p. 45-87. 1987.

BRITO NEVES, B.; SANTOS, E.; SCHMUS, W. **Tectonic history of the Borborema Province.** 31st International Geological Congress. p. 151-182. Rio de Janeiro, RJ. 2000.

CAVALCANTI-MATA, M. E. R. M.; DUARTE, M. E. M.; ALMEIDA, R. A. C. Secagem de Sementes. In, Francisco de Assis Cardoso Almeida; Maria Elita Martins Duarte; Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata. (Org.). **Tecnologia de Armazenagem em Sementes.** 1ª ed. Editado pela Área de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas, APPA, v.1, p. 271-370, Campina Grande, PB. 2006.

COSTA, Enio Cruz. **Secagem Industrial.** São Paulo: Edgar Blucher. 2007.

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

CRESESB. **Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Salvo Brito.**: Disponível no site www.cresesb.cepel.br. 2008.

DANTAS, H. J. **Secagem solar e convencional de amêndoas de jaca**. 2007. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Campina Grande, UFCG. Campina Grande, PB. 2007.

DA SILVA, Fernanda Arruda Nogueira Gomes. **Estudos de caracterização tecnológica e beneficiamento do caulim da Região Borborema-Seridó (RN)**. Rio de Janeiro: CETEM. 2008.

FERNANDES, Jonas. Fernando. De Souza. **Desenvolvimento experimental de um secador solar especial com sílica gel como dessecante do ar de secagem**. 2021, 137p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande - PB, 2021.

FERREIRA, A. G.; CHARBEL, A. L. T.; PIRES, R. L.; SILVA, J. G.; MAIA, C. B. Experimental analysis of a hybrid dryer. **Engenharia Térmica**. Vol. 1, p. 4-7. 2007.

FIGUEIREDO, Romeu. **Princípios de secagem de produtos biológicos**. João Pessoa: Editora Universitária, UFPB, 229p. 2004.

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.

GOMES, Ítalo de Andrade. **Desenvolvimento Experimental de um Secador Solar de Frutas com Aproveitamento Multienergético**. 2017. 121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Campina Grande, UFCG. Campina Grande, PB. 2017.

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 CBENS, 2014, Recife-PE. *Anais...* Vol. 1, p. 1-8, Recife, PE. 2015.

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.

GRILO, Marcelo Bezerra. **Fundamentos da energia solar. Radiação solar e coletor solar plano: conceitos básicos e aplicações**. 2007, 60p. ISBN 9788589674348. Campina Grande: EDUFCG. Editora Universitária da Universidade Federal de Campina Grande. 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.

GRILO, M. B.; LACERDA, A. F. **Secador Solar: Cartilha para produção de banana-passa**. Campina Grande, PB. Editora da EDUFCG, 10p, 2013.

JÚNIOR, A. O. P.; SOARES, J. B.; OLIVEIRA, R. G.; QUEIROZ, R. P. Indicadores energéticos para o desenvolvimento sustentável: uma análise a partir do Plano Nacional de Energia In: PEREIRA, T. C. G. **Energias Renováveis: políticas públicas e planejamento energético**, COPEL, Curitiba, PR. 2014.

LIMA, A. G. B.; SILVA, E. G.; SPAROVEK, G.; STURION, G. L.; PRECOPPE, M. F. M.; MEIRA M. L. R.; SPOTO, M. H. F.; MORAES, S. O. **Manual de desidratação solar de**

frutas, ervas e hortaliças. 50p. Série Produtor Rural. n.33. Piracicaba, SP: Universidade de São Paulo, USP. 2006.

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

LIMA, R. C. O. Diagnóstico dos impactos ambientais decorrentes do beneficiamento de caulim no município de Equador, RN. **Revista de Biologia e Ciências da Terra.** v.10, n. 02. 2010.

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

LUZ, A. B.; DAMASCENO, E. C. **Caulim: Um mineral industrial importante.** Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, Série Tecnologia Mineral. N. 65, Rio de Janeiro, RJ. 1993.

MIRANDA, M.; GONZAGA, R.; GUZZO, P.; BARRETO, S.; MELGAREJO, J. Estudo da suscetibilidade ao escurecimento por radiação gama de quartzo róseo-leitoso da província pegmatítica da Borborema. **Revista Brasileira de Geociências**, volume 42. p. 293-294. 2012.

MURRAY, H. H.; KELLER, W. **Kaolins, kaolins, and kaolins.** In: MURRAY, H. H.; BUNDY, W.; HARVEY, C. Kaolin Genesis and Utilization, The Clay Minerals Society: Boulder, p. 1-24. 1993.

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

NUNES, Antônio Gomes; GOMES, Ítalo de Andrade; GRILO, Marcelo Bezerra. **Testes Experimentais com Secador Solar de Exposição Direta para Desidratação de Abacaxi.** In:

VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2014, CONEM 2014, *Anais...* Vol. 8, p. 1-7, Uberlândia, MG. 2014.

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

ORIKASA, T.; KOIDE, S.; OKAMOTO, S.; IMAIZUMI, T.; MURAMATSU, Y.; TAKEDA, J. I.; SHIINA, T.; TAGAWA, A. **Impacts of hot air and vacuum drying on the quality attributes of kiwifruit slices**. *J. Food Eng.* v. 125, p. 51-58, 2014

PARK, K. J.; COLATO, G. A.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B. **Conceitos de processos e equipamentos de secagem**. Universidade Estadual de Campinas, Unicamp. Campinas, SP. 2007.

PENEIRO, J. C.; MELO, L. P.; CORADI, T. B. Construção de aquecedor solar de baixo custo sem cobertura: análise experimental da eficiência térmica para vários ensaios. **Revista de Ciência e Tecnologia**. V.10, n. (1), p. 18-34, Nova Iguaçu, RJ. 2010.

PEREIRA, T. C. G. **Energias Renováveis: políticas públicas e planejamento energético**, COPEL, Curitiba, PR: COPEL 2014.

PRAKASH, O.; ANILKUMAR. A. Solar greenhouse drying: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.29, p.905-910, 2013.

SANTANA, Vitor Leão. **Beneficiamento de caulim na região do Junco do Seridó/PB e Equador/RN através da classificação de partículas em hidrociclones**. 2017. 95p. Dissertação (Mestrado em Exploração Petrolífera e Mineral). Universidade Federal de Campina Grande, UFCG. Campina Grande, PB. 2017.

SANTOS, E. J.; MEDEIROS, V. C. Constraints from granitic plutonism on Proterozoic crustal growth of the Transverse Zone, Borborema Province, NE Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, p. 73-84, 1999.

SANTOS, L.; FUCK, R.; SANTOS, E.; DANTAS, E. Análise tectônica de terrenos: metodologia, aplicação em cinturões orogênicos e exemplo das províncias Tocantins e Borborema, Brasil. **Revista Geonomos**. 22. p. 51-63. 2015.

SILVA, M. R. R.; DANTAS, J. R. A. Província Pegmatítica da Borborema-Seridó, Paraíba e Rio Grande do Norte. In: **DNPM/CPRM. Principais Depósitos Minerais do Brasil**, 1 ed. v. 4b, Departamento Nacional de Produção Mineral, DNPM. Brasília, Brasil. 1997.

SILVA, J. S. **Secagem e Armazenamento de Produtos Agrícolas: Secagem e secadores**. Aprenda Fácil, p. 109-146, Viçosa, MG. 2008.

SOUZA, L. G. M.; DOÇBS, T. S.; VIEIRA, A. P. N. B.; BRITO, A. M. L.; MARQUES, M. S.; BATISTA, S. S. **Construção de um secador solar a partir de sucatas de tambor de lixo**. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. CONEM 2012, São Luís, MA. 2012.

TIEPOLO, G. M.; JÚNIOR, O. C. Tendências e Perspectivas para as Fontes Renováveis de Energia no Planejamento Energético Brasileiro. In: PEREIRA, T. C. G. **Energias Renováveis: políticas públicas e planejamento energético**, COPEL, Curitiba, PR. 2014.

WAEWSAK, J.; CHINDARUKSA, S.; PUNLEK, C. **A Mathematical Modeling Study of Hot Air Drying for some Agricultural Products**. Thammasat International Journal of Science and Technology, Vol. 11, n.01, p. 14-20, 2006.

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 – Dados de Temperatura, umidade relativa e irradiação solar durante os experimentos.

Tabela B1: Temperatura e umidade relativa do ar durante a realização do Experimento 1 nos dias 04 e 05/11/20 em Assunção.

HORA	TEMPERATURA AMBIENTE		SAÍDA POLICARBONATO		SAÍDA POLIPROPILENO	
	T (°C)	UR (%)	T (°C)	UR (%)	T (°C)	UR (%)
[08:00,09:00[	31,88	70,15	43,99	65,43	40,66	42,64
[09:00, 10:00[	36,72	55,19	55,32	59,12	48,79	32,35
[10:00, 11:00[	37,70	49,21	58,73	32,43	51,23	27,59
[11:00, 12:00[	39,17	43,24	63,57	28,58	55,55	23,13
[12:00, 13:00[	35,70	47,90	50,41	33,62	45,62	27,66
[13:00, 14:00[	37,12	46,06	51,78	31,95	46,99	26,64
[14:00, 15:00[	34,86	50,89	45,65	37,02	42,32	30,88
[15:00, 16:00[	33,03	53,49	40,60	41,28	38,36	35,60
[08:00, 09:00[	27,78	84,51	40,12	45,11	36,88	50,07
[09:00, 10:00[	30,02	72,44	49,02	33,21	45,23	35,43
[10:00, 11:00[	33,04	58,62	61,79	26,14	57,49	26,17
[11:00, 12:00[	35,37	50,50	69,51	22,55	62,82	21,94
[12:00, 13:00[	35,42	46,75	66,80	21,19	60,74	21,71
[13:00, 14:00[	36,44	44,19	69,04	19,63	60,39	19,10
[14:00, 15:00[	36,11	45,42	64,31	19,83	55,98	20,55
[15:00, 16:00[	35,17	45,46	54,46	22,90	48,61	25,17
MEDIA	34,25	54,95	53,67	29,75	48,45	31,49

Tabela B2: Temperatura e umidade relativa do ar durante a realização do Experimento 2 nos dias 09 e 10/12/20 em Assunção.

HORA	TEMPERATURA AMBIENTE		SAÍDA POLICARBONATO		SAÍDA POLIPROPILENO	
	T (°C)	UR (%)	T (°C)	UR (%)	T (°C)	UR (%)
[08:00,09:00[	32,23	68,16	46,11	40,22	41,47	42,35
[09:00, 10:00[	37,40	53,16	57,96	30,27	49,26	31,82
[10:00, 11:00[	38,20	47,55	60,13	25,05	53,03	26,89
[11:00, 12:00[	40,32	41,26	66,43	21,06	56,89	23,25
[12:00, 13:00[	39,56	46,78	52,87	25,88	48,36	27,13
[13:00, 14:00[	38,21	44,07	53,26	24,71	49,11	26,77
[14:00, 15:00[	35,13	48,21	47,65	28,55	44,07	30,88
[15:00, 16:00[	33,70	51,01	41,91	33,36	39,85	34,35
[08:00, 09:00[	28,36	79,22	42,36	46,11	38,44	43,26
[09:00, 10:00[	31,45	70,71	51,76	29,11	47,73	31,87
[10:00, 11:00[	34,98	56,57	64,12	24,12	60,01	25,13
[11:00, 12:00[	37,56	48,69	72,01	19,77	64,58	20,87
[12:00, 13:00[	37,89	44,16	68,10	18,33	62,24	19,15
[13:00, 14:00[	38,11	42,19	72,16	17,01	61,98	18,04
[14:00, 15:00[	37,98	43,56	66,75	17,55	57,36	17,88
[15:00, 16:00[	37,01	43,87	56,89	18,88	50,12	20,55
MEDIA	35,63	52,77	55,82	27,44	50,18	28,76

Tabela B3: Temperatura e umidade relativa do ar durante a realização do Experimento 3 nos dias 14 e 15/07/21 em Campina Grande.

HORA	TEMPERATURA AMBIENTE		SAÍDA POLICARBONATO		SAÍDA POLIPROPILENO	
	T (°C)	UR (%)	T (°C)	UR (%)	T (°C)	UR (%)
[08:00,09:00[	23,8	78,2	34,6	57,9	32,9	60,4
[09:00, 10:00[	26,0	70,0	52,6	28,2	45,9	42,4
[10:00, 11:00[	27,1	63,2	59,7	18,8	52,1	31,4
[11:00, 12:00[	27,9	60,2	58,6	18,5	52,4	30,1
[12:00, 13:00[	28,8	57,5	68,3	14,9	59,9	26,6
[13:00, 14:00[	29,2	55,3	72,8	12,3	60,3	24,9
[14:00, 15:00[	28,7	55,8	58,0	17,2	48,9	29,8
[15:00, 16:00[	28,3	56,4	50,8	21,1	43,7	34,0
[08:00, 09:00[	25,4	65,3	61,0	21,3	49,0	42,9
[09:00, 10:00[	27,7	59,2	76,5	12,4	60,5	28,4
[10:00, 11:00[	28,9	60,6	83,0	10,7	66,2	24,7
[11:00, 12:00[	28,0	64,5	64,7	15,3	53,9	28,9
[12:00, 13:00[	27,2	68,1	52,1	22,1	46,0	35,4
[13:00, 14:00[	28,5	64,9	59,7	18,1	51,3	31,4
[14:00, 15:00[	28,4	67,4	67,3	15,1	56,3	28,5
[15:00, 16:00[	26,1	74,2	51,1	23,4	43,5	38,7
MEDIA	27,31	64,72	58,02	22,47	49,43	35,60

Tabela B4: Temperatura e umidade relativa do ar durante a realização do Experimento 4 nos dias 03 e 04/08/21 em Assunção.

HORA	TEMPERATURA AMBIENTE		SAÍDA POLICARBONATO		SAÍDA POLIPROPILENO	
	T (°C)	UR (%)	T (°C)	UR (%)	T (°C)	UR (%)
[08:00,09:00[	22,76	86,29	30,68	57,95	27,17	62,25
[09:00, 10:00[	24,54	76,92	39,88	38,63	31,59	49,22
[10:00, 11:00[	25,81	70,93	43,97	32,23	33,95	45,33
[11:00, 12:00[	26,69	65,62	48,21	28,81	44,47	45,35
[12:00, 13:00[	27,45	60,48	53,76	26,01	45,20	41,60
[13:00, 14:00[	28,13	58,13	48,23	26,64	43,66	41,67
[14:00, 15:00[	28,63	57,22	52,32	21,80	45,56	40,45
[15:00, 16:00[	28,77	56,00	49,22	22,96	43,58	40,15
[08:00, 09:00[	23,04	78,54	30,96	55,33	33,00	56,41
[09:00, 10:00[	24,72	70,48	39,85	38,94	40,01	47,39
[10:00, 11:00[	27,59	59,28	48,58	27,46	46,28	38,90
[11:00, 12:00[	29,51	52,60	53,21	23,50	45,26	37,98
[12:00, 13:00[	29,50	52,85	48,29	26,33	42,82	38,72
[13:00, 14:00[	29,35	52,97	48,87	28,53	42,11	38,36
[14:00, 15:00[	31,61	49,45	46,96	26,19	43,40	38,33
[15:00, 16:00[	28,69	55,37	43,42	27,90	37,84	42,49
MEDIA	27,24	62,51	44,38	32,53	39,36	44,07

Tabela B5: Dados de irradiação solar durante a realização dos experimentos.

HORA	IRRADIAÇÃO SOLAR EXP1	IRRADIAÇÃO SOLAR EXP2	IRRADIAÇÃO SOLAR EXP 3	IRRADIAÇÃO SOLAR EXP 4
	W/m ²	W/m ²	W/m ²	W/m ²
[08:00,09:00[	863,00	796,52	252,20	158,33
[09:00, 10:00[	996,65	942,64	562,58	391,58
[10:00, 11:00[	964,36	1093,29	486,86	611,07
[11:00, 12:00[	922,78	1201,45	524,12	764,63
[12:00, 13:00[	1072,06	1148,25	670,07	762,34
[13:00, 14:00[	1284,00	1054,37	618,28	707,31
[14:00, 15:00[	974,75	835,60	374,31	705,36
[15:00, 16:00[	909,22	759,27	324,58	504,72
[08:00, 09:00[	872,81	841,09	558,91	400,91
[09:00, 10:00[	907,29	939,81	677,72	598,73
[10:00, 11:00[	1071,46	1074,58	647,36	782,37
[11:00, 12:00[	1058,81	1256,30	412,28	874,24
[12:00, 13:00[	1084,83	1228,17	386,60	889,66
[13:00, 14:00[	1296,00	1131,68	566,27	806,93
[14:00, 15:00[	970,03	966,59	510,53	525,81
[15:00, 16:00[	954,87	778,83	282,92	541,11
MEDIA	983,011	964,94	446,87	604,50