



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

TESE

Wellington Sousa Lima

**ANÁLISES DE SISTEMAS DE SECAGEM: SOLAR, ELÉTRICO E MISTO NA
PRODUÇÃO DE BANANA PASSA.**

CAMPINA GRANDE, PB

17 de março de 2017

WELLINGTON SOUSA LIMA

TESE

**ANÁLISES DE SISTEMAS DE SECAGEM: SOLAR, ELÉTRICO E MISTO NA
PRODUÇÃO DE BANANA PASSA.**

Tese submetida à Coordenação do Curso de Doutorado em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo

Campina Grande – PB, 17 de março de 2017.

FICHA CATOLOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

**ANÁLISES DE SISTEMAS DE SECAGEM: SOLAR, ELÉTRICO E MISTO NA
PRODUÇÃO DE BANANA PASSA.**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos

Tese apresentada no dia 17/03/2017

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo

Orientador – UAEM/PPGEP/CCT/UFCG

Prof. Dra. Vera Solange de Oliveira Farias

Membro– UAFM/CES/UFCG

Prof. Dr. Yoge Jerônimo Ramos da Costa

Membro – UAEM/CCT/UFCG

Prof. Dr. Jair Stefanini Pereira de Ataíde

Membro – UAFM/CES/UFCG

Prof. Dr. Antonio Gomes Nunes

Membro – DCEN/UFERSA

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai José Bernardo de Lima (*in memoriam*), a minha mãe Espedita de Sousa Lima, a minha avó Maria José Damião de Sousa (*in memoriam*) e a minha esposa Daisy Dayane Formiga de Souza Lima, pelo amor, pelo incentivo e pela compreensão.

Aos meus filhos, Ana Luiza, Yalle, Wellington Júnior e Yasmin, bençãos de Deus em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter me dado a vida e estar sempre presente em meu viver.

Um agradecimento especial a minha família, especialmente a minha mãe, por ter exercido o papel de mãe e pai, me conduzindo sempre pelo caminho do bem.

Ao meu orientador, Marcelo Bezerra Grilo, pelo empenho e dedicação, pois sempre pacientemente encorajou-me a desenvolver o senso investigativo necessário à realização desta pesquisa.

Um agradecimento especial a minha esposa, Daisy Formiga, pelo apoio incondicional e o incentivo constante, que me proporcionou o encorajamento necessário para a realização deste trabalho.

Aos professores que tive ao longo de minha vida de estudante que foram os pilares do conhecimento indispensável a minha formação acadêmica.

Aos amigos, Antonio, Brasileiro, Caio, Ítalo, Paulo, pelas contribuições indispensáveis na realização desta pesquisa.

À UFCG, por proporcionar condições ao desenvolvimento desta pesquisa.

“A vida sem ciência é uma espécie de morte.”

Sócrates

RESUMO

LIMA, Wellington Sousa, Análises de sistemas de secagem: solar, elétrico e misto na produção de banana passa. Campina Grande: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2017. 259p. Tese (Doutorado).

Este trabalho apresenta um estudo comparativo de sistemas de secagem para produção de banana passa. Foram utilizados um secador solar de exposição indireta com sistema de aquisição e controle das propriedades termodinâmicas do ar de secagem, e um secador elétrico automatizado com sistema de supervisão e controle embarcados. Os sistemas de secagem estudados neste trabalho foram: secagem solar, secagem elétrica e secagem mista (secagem solar seguida de secagem elétrica). Os testes experimentais foram realizados na UFCG em Campina Grande, PB, para secagem de banana prata (*Musa spp.*). O produto final obtido pelos três sistemas de secagem apresentou boa qualidade em relação ao aspecto visual, com um percentual de umidade em base úmida menor que 25%, compatível com o recomendado pela Resolução RDC nº 272/05 da ANVISA. O sistema de aquisição e controle de dados, como inovação no secador solar, utilizando a plataforma Arduino, garantiu a medição de temperatura e umidade relativa do ar de secagem nas entradas e saídas do coletor solar e da câmara de secagem, e também o acionamento e controle da convecção forçada no sistema de secagem para manter a temperatura no interior da câmara de secagem entre 40°C e 60°C. Como resultado, são apresentados os valores obtidos para rendimento do secador solar, consumo específico de energia (CEE), eficiência do processo de secagem e tempo de secagem. Por meio dos experimentos com o secador solar e com o secador elétrico foram obtidas as curvas de cinética de secagem da banana. Os resultados foram comparados e mostraram que o modelo matemático de Page é apropriado para prever o tempo de secagem. O coeficiente de determinação (R^2) obtido na secagem elétrica, na secagem mista e na secagem solar com controle, foram superiores ao obtido na secagem solar sem controle, isso demonstra a importância do controle das propriedades termodinâmicas nos processos de secagem. Com relação ao CEE, o processo de secagem elétrica apresentou um CEE de 379,33 kWh por ciclo com temperatura de 45°C e 225,54 kWh por ciclo com temperatura de 55°C. Por outro lado o processo de secagem mista apresentou um CEE de 295,87 kWh por ciclo, a uma temperatura de 45°C, e o processo de secagem solar apresentou um CEE médio de 45,83 kWh por ciclo. Isso mostra a grande vantagem comparativa do secador solar em relação ao secador elétrico. Com relação à eficiência mássica para os três processos de secagem, os mesmos apresentaram eficiências mássicas equivalentes em torno de 89%, o que já era esperado. Com relação aos rendimentos térmicos do secador solar, obtidos nos processos de secagem solar com controle e sem controle da temperatura, foram respectivamente 27,85% e 30,65%. Esses resultados são ligeiramente maiores que os reportados na literatura, o que indica que o secador solar desenvolvido na UFCG apresenta um elevado padrão na secagem de banana, além do fácil manuseio, construção e operacionalidade.

PALAVRAS-CHAVE: Secagem de banana. Sistema de controle. Consumo específico de energia.

ABSTRACT

LIMA, Wellington Sousa, Analysis of Drying Systems: Solar, Electric and Mixed on the production of dried banana. Campina Grande: Post-Graduation Program in Process Engineering, Federal University of Campina Grande, 2017. 259p. Thesis (Doctorate).

This paper presents a comparative study of drying systems for the production of dried bananas. An indirect solar exposure dryer with acquisition system and control of the thermodynamic properties of the drying air, and an automatized electric dryer with embedded control and supervision system were used. The drying systems studied in this paper were: solar drying, electrical drying and mixed drying (solar drying followed by electrical drying). The experimental tests were performed at the UFCG in Campina Grande, PB, for the drying of bananas (*Musa spp.*). The final product obtained by the three drying systems presented good visual aspect, scent and flavour, and moisture percentage at moist base less than 25%, compatible to the resolution RDC nº 272/05 of the ANVISA. The acquisition system and data control, added as innovation at the solar dryer, using the Arduino platform, granted the measurement of the temperature and air relative moisture of drying air, both in the entrance and exit of the solar collector of the drying chamber, and also the activation and control of the forced convection of the drying system to keep the temperature in the drying chamber between 40°C and 60°C. As results, the obtained values to the drying system efficiency are presented, specific consumption of energy (CEE), drying system efficiency and drying time. Through the experiments with the solar and the electric dryers, the curves that represent the drying kinetics of the banana were obtained. The results were compared and showed that Page's mathematical model is adequate to predict the drying time. The determination coefficient (R^2) obtained at the electric dryer was superior to the solar dryer, this shows that the control system of the thermodynamics properties of the drying air is more efficient on the electric dryer. In relation to the CEE, the electric drying showed a CEE of 379.33 kWh per cycle with a temperature of 45°C and 225.54 kWh per cycle at the temperature of 55°C. On the other hand, the mixed drying had a CEE of 295.87 kWh per cycle, at a temperature of 45 °C, and the solar drying a medium CEE of 45.83 kWh per cycle. This shows the great comparative advantage of the solar dryer when compared to the electric dryer. In relation to the massic efficiency to the 3 drying processes, they showed equivalent massic efficiency around 89%, which was expected. In relation to the thermic efficiencies of the solar dryer, obtained on the experiments with and without temperature control, were respectively 27.85%, 30.65%, these results show that the obtained results are slightly superior to the results reported on the literature, which indicates that the solar dryer under development in the UFCG shows high efficiency to perform the drying of bananas, although its easy to construct and operate.

KEYWORDS: Banana drying, Control system, Specific energy consumption.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Curva de secagem.....	39
Figura 2.2	Classificação dos secadores com base no método de operação.....	55
Figura 2.3	Efeito estufa no secador solar.....	57
Figura 2.4	Secador solar de exposição direta com convecção natural.....	58
Figura 2.5	Secador solar de exposição direta com convecção forçada.....	58
Figura 2.6	Secador convencional de bandejas.....	60
Figura 2.7	Esquema de distribuição das resistências na fonte externa do secador.....	61
Figura 2.8	Secador híbrido solar-elétrico com controle de temperatura do ar de secagem.....	64
Figura 2.9	Secador híbrido solar-gás com sistema de aquecimento auxiliar do ar de secagem.....	65
Figura 3.1	Instalações do LEMT e detalhe do solarium da UFCG.....	67
Figura 3.2	Banana prata in natura com casca(a), banana prata in natura cortada longitudinalmente (b) banana passa obtida após o processo de secagem (c).....	69
Figura 3.3	Estufa de secagem com circulação de ar forçada, mod. 320E.....	69
Figura 3.4	Secador solar de irradiação indireta.....	70
Figura 3.5	Vista superior do secador solar de irradiação indireta com indicação de seus componentes.....	70
Figura 3.6	Fotos do sistema de secagem solar utilizado neste trabalho instalado no LEMT/UFCG.....	71
Figura 3.7	Modelo físico da transferência de calor na placa absorvedora do coletor solar.....	74
Figura 3.8	Distribuição dos sensores de temperatura no coletor solar e na câmara de secagem.....	74
Figura 3.9	Desenho esquemático do coletor solar desenvolvido.....	76
Figura 3.10	Câmara de secagem em funcionamento no solarium.....	77
Figura 3.11	Desenho esquemático da câmara de secagem desenvolvida.....	78
Figura 3.12	Cooler e o mini painel fotovoltaico.....	79
Figura 3.13	Sistema de medição de temperatura do ar de secagem.....	79

Figura 3.14	Termômetro infravermelho modelo TI – 890 (a) e Termo Higrômetro (b)	80
Figura 3.15	Ambiente de desenvolvimento de software para Arduino.....	85
Figura 3.16	Ambiente de desenvolvimento para aplicações com Arduino.....	85
Figura 3.17	Esquema da placa em forma de blocos.....	86
Figura 3.18	Foto da placa do Arduino UNO.....	87
Figura 3.19	Sistema de aquisição de dados (Arduino), usado para medir umidade relativa do ar do processo e temperatura do ar de secagem.....	88
Figura 3.20	Secador elétrico com sistema de aquisição e supervisorio integrado.....	89
Figura 3.21	Câmara de condicionamento de ar do secador elétrico.....	90
Figura 3.22	Banco de resistência do secador elétrico.....	90
Figura 3.23	Sistema de refrigeração do secador elétrico.....	91
Figura 3.24	Compressor de ar do secador elétrico.....	91
Figura 3.25	Partes que compõem a balança integralizada do secador elétrico.....	92
Figura 3.26	Sensor de umidade e temperatura do secador elétrico.....	93
Figura 3.27	Sistema supervisorio do secador elétrico.....	93
Figura 3.28	Sistema de umidificação do ar de secagem do secador elétrico.....	94
Figura 3.29	Sistema de controle da velocidade do ar de secagem do secador elétrico	94
Figura 3.30	Triângulo retângulo que representa a relação entre as potências aparente (S), ativa (P) e reativa (Q).....	96
Figura 3.31	Característica resistiva da carga, a forma de ondas de tensão (V) e corrente (I) em fase (se senoidal perfeita, FP=1). Ângulo de fase $\varphi=0^\circ$	97
Figura 3.32	Característica indutiva da carga, a forma de onda de corrente (I) atrasada em relação à onda de tensão (V). FP atrasado.....	97
Figura 3.33	Característica capacitiva da carga, a forma de onda de corrente (I) adiantada em relação à onda de tensão (V). FP adiantado.....	98
Figura 3.34	Medidor de qualidade de energia SEL – 735.....	99
Figura 3.35	Estação meteorológica modelo HD32MT.1, SN 11031486 e FW 0714141114.....	100
Figura 3.36	Piranômetro instalado no LEIAM/UFCG.....	100
Figura 3.37	Variação da radiação solar incidente em função do tempo, do primeiro dia de um experimento.....	101
Figura 3.38	Variação da radiação solar incidente em função do tempo, do segundo dia de um experimento.....	101

Figura 3.39	Intensidade média de irradiação solar medida em dois dias de experimento na UFCG.....	102
Figura 3.40	Fluxograma para obtenção da Banana passa.....	104
Figura 3.41	Bananas cortadas longitudinalmente in natura (a) e banana passa (b).....	106
Figura 3.42	Equipamentos de medição da velocidade do ar (Anemômetro).....	108
Figura 3.43	Balança digital modelo KC 01, marca Western: banana in natura (a), banana passa (b) e massa seca da banana (c).....	109
Figura 3.44	Modelo de tabela usada para registrar e calcular valores obtidos em cada experimento.....	109
Figura 3.45	Representação do volume de controle para o coletor solar.....	115
Figura 3.46	Representação do volume de controle para câmara de secagem.....	117
Figura 3.47	Representação do volume de controle do secador solar.....	119
Figura 3.48	Valores da massa inicial, massa final, massa de água e eficiência mássica do processo de secagem elétrica.....	121
Figura 3.49	Valores da energia utilizada, umidade inicial do produto, umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia do processo de secagem solar.....	121
Figura 3.50	Valores da energia consumida, umidade inicial do produto, umidade final do produto massa do inicial produto e consumo específico de energia do processo de secagem elétrica.....	121
Figura 3.51	Valores da energia consumida, umidade inicial do produto, umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia do processo de secagem mista.....	121
Figura 3.52	Potência útil e rendimento do coletor solar para cada processo.....	121
Figura 3.53	Resumo das eficiências dos processos de secagem para cada experimento.....	121
Figura 3.54	Características construtivas e dimensionais do protótipo do sistema de secagem.....	122
Figura 4.1	Banana prata (<i>Musa spp.</i>) já desidratada obtido em um dos experimentos.....	126
Figura 4.2	Temperatura do processo de secagem elétrica e temperatura ambiente - experimento 1 (secagem elétrica).....	127
Figura 4.3	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, secagem elétrica.....	129

Figura 4.4	Taxa de secagem do experimento 1 (secagem elétrica).....	130
Figura 4.5	Perfil médio de carga do secador elétrico.....	131
Figura 4.6	Perfil de carga instantâneo do secador elétrico no período de uma hora....	131
Figura 4.7	Gráfico do consumo de energia do secador elétrico referente ao experimento 1 (EXP 1).....	132
Figura 4.8	Temperatura média do processo de secagem solar, temperatura de processo de secagem elétrico e temperatura ambiente – experimento 2 (secagem mista).....	135
Figura 4.9	Temperatura instantânea do processo de secagem solar, temperatura limite de controle inferior e temperatura limite de controle superior do experimento 2 (secagem mista) com estratégia de controle embarcada.....	135
Figura 4.10	Intensidade média de irradiação solar medida na UFCG em intervalos de 30 minuto durante a realização da primeira parte do experimento 2.....	137
Figura 4.11	Intensidade da irradiação solar média horária medida na UFCG durante a realização da primeira parte do experimento 2.....	137
Figura 4.12	Intensidade instantânea da irradiação solar medida na UFCG durante a realização da primeira parte do experimento 2.....	138
Figura 4.13	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, secagem mista.....	139
Figura 4.14	Taxa de secagem do experimento 2 (secagem solar-elétrica).....	141
Figura 4.15	Gráfico do consumo de energia do secador elétrico referente ao experimento 2 (EXP 2) (experimento misto) solar seguido de elétrico.....	143
Figura 4.16	Temperaturas médias do processo de secagem solar e temperatura ambiente medidas durante a realização do experimento 3 (secagem solar) com estratégia de controle embarcada.....	146
Figura 4.17	Temperatura instantânea do processo de secagem solar, temperatura limite de controle inferior e temperatura limite de controle superior do experimento 3 (secagem solar) com estratégia de controle embarcada.....	147
Figura 4.18	Intensidade média de irradiação solar medida na UFCG em intervalos de 30 minutos durante a realização do experimento 3 (secagem solar com controle).....	149
Figura 4.19	Intensidade média de irradiação solar medida na UFCG em intervalo de uma hora durante a realização do experimento 3 (secagem solar com controle).....	150

Figura 4.20	Intensidade instantânea da irradiação solar medida no primeiro dia de realização do experimento 3 (secagem solar com controle).....	150
Figura 4.21	Intensidade instantânea da irradiação solar medida no segundo dia de realização do experimento 3 (secagem solar com controle).....	151
Figura 4.22	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, secagem solar.....	153
Figura 4.23	Taxa de secagem do experimento 3 (secagem solar com controle).....	154
Figura 4.24	Temperaturas médias do processo de secagem solar e temperatura ambiente durante a realização do experimento 4 (secagem solar sem controle).....	157
Figura 4.25	Temperatura instantânea do processo de secagem solar do experimento 4	158
Figura 4.26	Intensidade média de irradiação solar medida na UFCG em intervalos de 30 minutos durante a realização do experimento 4.....	159
Figura 4.27	Intensidade média de irradiação solar medida na UFCG em intervalo de uma hora durante a realização do experimento 4.....	159
Figura 4.28	Intensidade instantânea da irradiação solar medida na UFCG durante o primeiro dia de realização do experimento 4.....	160
Figura 4.29	Intensidade instantânea da irradiação solar medida na UFCG durante o segundo dia de realização do experimento 4.....	160
Figura 4.30	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, secagem solar.....	162
Figura 4.31	Taxa de secagem do experimento 4 (secagem solar sem controle).....	163
Figura 4.32	Temperaturas médias do processo de secagem solar e temperatura ambiente durante a realização do experimento 5 (secagem solar) com estratégia de controle embarcada.....	166
Figura 4.33	Temperatura instantânea do processo de secagem solar, temperatura limite de controle inferior e temperatura limite de controle superior do experimento 5– secagem solar com estratégia de controle embarcada.....	168
Figura 4.34	Intensidade média de irradiação solar medida na UFCG em intervalos de 30 minutos durante a realização do experimento 5.....	170
Figura 4.35	Intensidade média de irradiação solar medida na UFCG em intervalo de uma hora durante a realização do experimento 5.....	170
Figura 4.36	Intensidade instantânea da irradiação solar medida na UFCG durante o primeiro dia de realização do experimento 5.....	171
Figura 4.37	Intensidade instantânea da irradiação solar medida na UFCG durante o	171

	segundo dia de realização do experimento 5.....	
Figura 4.38	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, secagem mista.....	13
Figura 4.39	Taxa de secagem do experimento 5 (secagem solar com controle).....	174
Figura 4.40	Temperatura do processo de secagem elétrica e temperatura ambiente - experimento 6 (secagem elétrica).....	176
Figura 4.41	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, secagem elétrica.....	178
Figura 4.42	Taxa de secagem do experimento 6 (secagem elétrica).....	179
Figura 4.43	Perfil médio de carga do secador elétrico.....	180
Figura 4.44	Perfil de carga instantâneo do secador elétrico no período de uma hora....	181
Figura 4.45	Gráfico do consumo de energia do secador elétrico referente ao experimento 6 (EXP6).....	181
Figura 4.46	Dados das propriedades termodinâmicas do ar de secagem, obtidos com uso do CATT, Experimento 3.....	184
Figura 4.47	Dados das propriedades termodinâmicas do ar de secagem, obtidos com uso do CATT, Experimento 4.....	186
Figura 4.48	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, secagem elétrica (EXP1), secagem mista (EXP2) e secagem solar com controle (EXP5)....	191
Figura 4.49	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, secagem solar com controle (EXP3), secagem solar sem controle (EXP4) e secagem solar com controle (EXP5).....	193
Figura 4.50	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, secagem elétrica (EXP1 e EXP6).....	195
Figura 4.51	Bananas passa, obtidas pelos processos de secagem elétrico, misto e solar.....	204

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1	Composição química centesimal da banana.....	52
Tabela 3.1	Principais características construtivas do coletor solar.....	75
Tabela 3.2	Principais características construtivas da câmara de secagem.....	78
Tabela 3.3	Modelo matemático empregado para ajustes das curvas de secagem.....	111
Tabela 4.1	Valores da massa inicial, massa final, massa de água e eficiência mássica do processo de secagem elétrica (experimento 1).....	130
Tabela 4.2	Valores da energia consumida, teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia do processo de secagem elétrica (EXP 1).....	134
Tabela 4.3	Representação do estado de controle do acionamento do sistema de convecção do secador solar durante a realização do experimento 2 (secagem mista) com estratégia de controle embarcada.....	136
Tabela 4.4	Valores da massa inicial, massa final, massa de água e eficiência mássica do processo de secagem mista (experimento 2).....	141
Tabela 4.5	Valores da energia utilizada, teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia do processo de secagem mista (EXP 2).....	145
Tabela 4.6	Representação do estado de controle do acionamento do sistema de convecção do secador solar durante a realização do experimento 3 nos dias (secagem solar) com estratégia de controle embarcada.....	149
Tabela 4.7	Dados obtidos do processo de secagem do experimento 3- (secagem solar com controle): vasão mássica, variação de temperatura, potencia útil, média da irradiação solar, rendimento térmico do secador.....	154
Tabela 4.8	Valores da massa inicial, massa final, massa de água e eficiência mássica do processo de secagem solar (experimento 3).....	155
Tabela 4.9	Valores da energia consumida, teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia do processo de secagem mista (EXP3).....	156
Tabela 4.10	Dados obtidos do processo de secagem do experimento 4 (secagem solar com controle): vasão mássica, variação de temperatura, potencia útil, média da irradiação solar, rendimento térmico do secador.....	164

Tabela 4.11	Valores da massa inicial, massa final, massa de água e eficiência mássica do processo de secagem solar (experimento 4).....	164
Tabela 4.12	Valores da energia consumida, teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia do processo de secagem mista (EXP4).....	165
Tabela 4.13	Representação do estado de controle do acionamento do sistema de convecção do secador solar durante a realização do experimento 5 (secagem solar) com estratégia de controle embarcada.....	169
Tabela 4.14	Valores da massa inicial, massa final, massa de água e eficiência mássica do processo de secagem solar (experimento 5).....	174
Tabela 4.15	Valores da energia consumida, teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto massa do inicial produto e consumo específico de energia do processo de secagem mista (EXP 5).....	176
Tabela 4.16	Valores da massa inicial, massa final, massa de água e eficiência mássica do processo de secagem elétrica (experimento 6).....	179
Tabela 4.17	Valores da energia consumida, teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia do processo de secagem elétrica (EXP 6).....	183
Tabela 4.18	Dados obtidos do processo de secagem do experimento 3- (secagem solar com controle): vasão mássica, média da irradiação solar, entalpias de entrada e saída do coletor, área de incidência do coletor solar, rendimento térmico do coletor.....	184
Tabela 4.19	Dados obtidos do processo de secagem do experimento 3- (secagem solar com controle): vasão mássica, entalpias de entrada e saída da câmara, massa de água retirada, rendimento térmico da câmara.....	185
Tabela 4.20	Dados obtidos do processo de secagem do experimento 4 (secagem solar sem controle): vasão mássica, média da irradiação solar, entalpias de entrada e saída do coletor, área de incidência do coletor solar, rendimento térmico do coletor.....	185
Tabela 4.21	Dados obtidos do processo de secagem do experimento 4 (secagem solar sem controle): vasão mássica, entalpias de entrada e saída da câmara, massa de água retirada, rendimento térmico da câmara.....	186
Tabela 4.22	Parâmetros de secagem.....	1187

Tabela 4.23	Propriedade do ar de secagem.....	187
Tabela 4.24	Potência útil e rendimento do coletor solar para cada processo.....	188
Tabela 4.25	Eficiências térmicas do coletor solar, da câmara de secagem e do secador solar.....	188
Tabela 4.26	Resumo do consumo específico de energia dos processos de secagem.....	198
Tabela 4.27	Resumo dos tempos de processos de secagem.....	201
Tabela 4.28	Resumo das eficiências mássica dos processos de secagem.....	202
Tabela 4.29	Resumo dos parâmetros e coeficientes de correlação obtidos para cada experimento, ajustado pelo modelo de Page.....	203
Tabela 4.30	Resumo dos parâmetros dos processos de secagem.....	203

NOMENCLATURA

A_1	Área de cobertura transparente	[m ²]
A_2	Área da secção transversal da chaminé	[m ²]
CEE	Consumo específico total de energia	[kJ/kg]
cp	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]
$h_{va} = h_v$	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 secado	[kg]
\dot{m}	Vazão mássica do fluido de trabalho	[kg/s]

\dot{m}_e	Vazão mássica instantânea na entrada do volume de controle	[kg/s]
\dot{m}_s	Vazão mássica instantânea 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)	
P_u	Potência transferida ao fluido de trabalho	[W]
\dot{Q}_{vc}	Taxa de transferência de calor ao longo da fronteira (superfície de controle) do volume de controle	[J]
q	Fluxo de calor na placa (telha)	[W/m ²]
[R ²]	Coeficiente de determinação	[%]
\overline{Rad}	Irradiação solar média	[W/m ²]
RU	Razão de umidade	[adim]
RH	Umidade relativa	[%]
$T_{t+\Delta t}$	Temperatura num instante $t + \Delta t$	[K]
ΔT	Diferença de temperatura	[K]
T	Temperatura	[°C]
Tp1	Termopar localizado abaixo do coletor, temperatura ambiente	
Tp2	Termopar localizado na posição de entrada do coletor	
Tp3	Termopar localizado a 20 cm da entrada do coletor	
Tp4	Termopar localizado na posição central do coletor 63 cm da entrada	
Tp5	Termopar localizado na posição 84 cm da entrada do coletor	
Tp6	Termopar localizado na saída do coletor.	
Tp7	Termopar localizado na entrada de ar da câmara de secagem	
Tp8	Termopar localizado na primeira bandeja da câmara de secagem	
Tp9	Termopar localizado na segunda bandeja da câmara de secagem.	
Tp10	Termopar localizado na saída da câmara de secagem	
\bar{T}	Temperatura média (parâmetros concentrados)	[°C]
T_t	Temperatura num instante t	[°C]
t	Tempo	[s]
ti	Tempo inicial	[h]
tf	Tempo final	[h]

v_c	Volume de controle	
X	Teor de água (base seca)	[decimal]
Xe	Teor de água de equilíbrio (base seca)	[decimal]
X0	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, em base úmida	[decimal]
X_{bs}	Teor de umidade, em base seca	[decimal]
V	Volume	[m ³]
X, Y	Coordenada cartesiana.	[m]
\dot{W}_{vc}	Taxa de transferência por trabalho ao longo da fronteira (superfície de controle) do volume de controle	[J/s]

Símbolos

ε	Espessura da placa (telha)	[mm]
α_s	Absortividade solar para o policarbonato	
φ	Ângulo de inclinação da placa (telha) (em relação à horizontal)	
k	Constante de Stefan-Boltzmann, $5,6697 \cdot 10^{-8}$	[W/m ² °C]
$\bar{\sigma}$	Desvio padrão médio	[%]
v_{ar}	Velocidade do ar	[m/s]
η_p	Eficiência do processo de secagem	[%]
η_t	Rendimento do secador solar	[%]
ρ	Massa específica do ar	[kg/m ³]

LISTA DE SIGLAS

CATT	Computer Aided Thermodynamic Table
CCT	Centro de Ciências e Tecnologia.
CEE	Consumo Específico de Energia.
CEEI	Centro de Engenharia Elétrica e Informática
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CPU	Unidade Central de Processamento
EXP	Experimento
IBRAF	Instituto Brasileiro de Frutas
ICSP	In-Circuit Serial Programming
JTANG	Joint Test Access Group
LCD	Liquid Crystal Display
LEIAM	Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas
LEMT	Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas
MCU	Multipoint Control Unit
MDF	Medium DensityFiberboard (Painel de Fibra de Média Densidade)
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Memória de Acesso Randômico
UAEE	Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
UAEM	Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UFS	Universidade Federal de Sergipe
USB	Universal Serial Bus- Porta universal

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	28
1 INTRODUÇÃO.....	29
1.1 Objetivos.....	29
1.1.1 Objetivo geral.....	32
1.1.2 Objetivos específicos.....	32
CAPÍTULO 2.....	34
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	35
2.1 Secagem.....	36
2.2 Estado da arte para sistemas de secagem.....	40
2.3 Modelos matemáticos.....	44
2.4 Banana.....	50
2.5 Tipos de sistemas utilizados para secagem da banana.....	54
2.5.1 Secagem solar.....	55
2.5.2 Secagem em bandeja	60
2.5.3 Secagem mista (solar - elétrico).....	63
2.5.3.1 Secadores híbridos.....	63
CAPÍTULO 3.....	66
3 MATERIAIS E MÉTODOS	67
3.1 Materiais e métodos experimentais.....	67
3.2 O produto utilizado nos experimentos.....	68
3.3 Descrição dos sistemas de secagem solar.....	69
3.3.1 Coletor solar.....	70
3.3.2 Materiais utilizados no sistema de secagem do secador solar.....	71
3.3.3 Características do coletor solar.....	75
3.3.4 Características da câmara de secagem.....	76
3.3.5 Dados construtivos e materiais utilizados na câmara de secagem.....	77
3.3.6 Dimensionamento da câmara de secagem.....	77
3.3.7 Utilização do sistema de medição de temperatura de processo e ambiente	79

3.3.8	Desenvolvimento do sistema de medição e controle de temperatura e umidade.....	80
3.3.8.1	Controle automático.....	81
3.3.8.2	Ações de controle.....	82
3.3.8.3	Plataforma e ambiente desenvolvedor de programação.....	84
3.4	Secador elétrico utilizado para a secagem de frutas.....	88
3.5	Avaliação energética dos sistemas de secagem e cálculo do consumo específico de energia na produção da banana passa.....	95
3.5.1	Cálculo do consumo de energia elétrica.....	95
3.5.1.1	Potência aparente.....	96
3.5.1.2	Fator de potência.....	96
3.5.1.3	Potência ativa.....	98
3.5.1.4	Potência reativa.....	98
3.5.1.5	Medição do consumo de energia elétrica.....	99
3.5.1.6	Medição da energia solar.....	100
3.5.2	Cálculo do consumo específico de energia na produção da banana passa.	102
3.5.2.1	Avaliação do consumo específico de energia no processo de secagem elétrica.....	102
3.5.2.2	Avaliação do consumo específico de energia no processo de secagem solar.....	102
3.5.2.3	Avaliação do consumo específico de energia no processo de secagem mista (solar-elétrica).....	102
3.5.2.4	Cálculo do consumo específico de energia (CEE) dos processos de secagem.....	103
3.6	Produção da banana passa.....	104
3.6.1	Descrição do fluxograma.....	105
3.6.2	Fruta (matéria prima).....	105
3.6.3	Seleção.....	105
3.6.4	Lavagem e sanitização.....	105
3.6.5	Descascamento e corte.....	105
3.6.6	Embandejamento.....	105
3.6.7	Secagem.....	105
3.6.4	Armazenamento.....	106

3.7	Cálculo da eficiência do sistema de secagem solar.....	106
3.8	O Processo de secagem.....	108
3.8.1	Determinação das curvas de secagem.....	108
3.9	Análise energética do processo de secagem solar.....	111
3.9.1	Conceitos termodinâmicos.....	111
3.9.2	Conservação da massa.....	112
3.9.3	Primeira lei da termodinâmica.....	112
3.9.4	Cálculo do rendimento térmico do sistema de secagem solar.....	113
3.9.5	Rendimento termodinâmico do equipamento.....	114
3.9.5.1	Cálculo das eficiências.....	115
3.9.6	Eficiência mássica dos processos de secagem.....	119
3.9.7	Rendimento médio do secador solar.....	120
3.9.8	Apresentação de dados dos experimentos.....	120
3.9.9	Características construtivas do sistema de secagem solar.....	122
3.9.10	Valores atribuídos as propriedades termodinâmicas e estratégia de controle.....	123
CAPÍTULO 4.....		125
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	126
4.1	Análises dos testes experimentais.....	126
4.1.1	Experimento 1 (EXP1), (secagem elétrica).....	126
4.1.2	Experimento 2 (EXP2), (secagem mista).....	134
4.1.3	Experimento 3 (EXP3), (secagem solar com controle).....	145
4.1.4	Experimento 4 (EXP4), (secagem solar sem controle).....	156
4.1.5	Experimento 5 (EXP5), (secagem solar com controle).....	165
4.1.6	Experimento 6 (EXP6), (secagem elétrica).....	176
4.2	Análise energética do sistema de secagem solar.....	183
4.2.1	Eficiência do sistema de secagem solar no EXP3.....	183
4.2.1.1	Eficiência térmica do coletor solar.....	183
4.2.1.2	Eficiência térmica da câmara de secagem.....	184
4.2.1.3	Eficiência térmica do secador solar no EXP3.....	185
4.2.2	Eficiência do sistema de secagem solar no EXP4.....	185
4.2.2.1	Eficiência térmica do coletor solar.....	185

4.2.2.2	Eficiência térmica da câmara de secagem.....	186
4.2.2.3	Eficiência térmica do secador solar no EXP4.....	186
4.2.3	Rendimento médio do secador solar.....	187
4.3	Análises dos resultados dos experimentos EXP1, EXP2, EXP3, EXP4, EXP5 e EXP6.....	188
4.3.1	Análise comparativa dos gráficos que representam a cinética de secagem	188
4.3.1.1	Análise comparativa dos gráficos de temperatura e irradiação solar.....	195
4.3.2	Análise comparativa do consumo específico de energia (CEE).....	196
4.3.3	Tempo de processo.....	198
4.3.4	Eficiência mássica do processo de secagem.....	201
4.3.5	Correlação estatística para os ajustes das cinéticas de secagem.....	202
4.3.6	Aspecto visual do produto ao final dos três processos de secagem.....	203
CAPÍTULO 5.....		205
5	CONCLUSÕES	206
REFERÊNCIAS.....		209
APÊNDICES.....		220
Apêndice I	Tabelas com os valores medidos das: grandezas elétricas, temperatura e umidade relativa do ar de secagem, obtidos dos experimentos EXP1, EXP2 e temperatura, umidade relativa do ar de secagem, Intensidade da irradiação solar e cinética de secagem, obtidos dos experimentos EX1, EX2, EXP3, EXP4, EXP5.....	221
Apêndice II	Projeto do secador solar.....	255

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Com o crescimento da população mundial o grande desafio do mundo é procurar alternativas para suprir e amenizar a falta de alimentos para uma população que já ultrapassou 7,3 bilhões de habitantes em 2016 e tem uma perspectiva de alcançar a marca de 8,5 bilhões até 2030, e de 9,7 bilhões em 2050. Com esse ritmo, o planeta deve chegar a 2100 com mais de 11,2 bilhões de seres humanos, um crescimento de aproximadamente 53% em relação ao presente. Essas previsões estão no relatório "Perspectivas da População Mundial: a revisão de 2015", segundo dados divulgados pelo Fundo de População das Nações Unidas (FNUAP - ONU). Com as mudanças do clima, muitos problemas na produção mundial de alimentos estão sendo evidenciados. Em muitos casos, ocorrem a redução das áreas agricultáveis, a escassez de água para irrigação, e em outros, verifica-se a falta de tecnologias para redução do desperdício no processo de produção de alimentos. A tal produção já não consegue dar mais saltos de produtividade. Alguns especialistas acreditam que, até nas próximas décadas, a oferta de alimentos no mundo crescerá menos que a população.

As frutas tem um papel fundamental na cadeia produtiva de alimentos, sendo de grande importância em todo o mundo, no que se refere aos aspectos social, econômico e alimentar. A fruticultura possibilita a exploração intensiva de áreas produtivas, tornando-as lucrativas, gerando grande quantidade de postos de trabalho com uma grande quantidade de mão de obra aplicadas, não só na produção direta, mas também no processamento, armazenamento e comercialização (FIOREZE, 2004). A falta de técnicas adequadas no período de pós-colheita, transporte e armazenamento desses produtos, ocasiona grandes perdas de produção de frutas. Nos países emergentes, as perdas de produção chegam a 50% (LIMA et al., 2000). Segundo Nachtigal et al. (2015), no Brasil a realidade não é diferente, cerca de 40% das frutas produzidas são desperdiçadas entre etapas de produção e comercialização.

Apesar das altas taxas de desperdício no processo produtivo, o Brasil surge como uma das grandes forças produtoras no 3º milênio. A base agrícola da cadeia produtiva de frutas já ultrapassou 2,2 milhões de hectares cultivados, sendo responsável pela geração de cerca de cinco milhões de empregos diretos. Com um volume de 43,6 milhões de toneladas produzidas, a fruticultura movimenta um valor bruto de cerca de R\$ 20 bilhões (IBRAF, 2015). Segundo Nunes et al. (2015), por ser um dos maiores produtores mundiais de frutas, o Brasil necessita investir na formação de pesquisadores modernos, que busquem empregar o conhecimento científico a serviço do desenvolvimento sustentável, respeitando os recursos naturais e privilegiando a eficiência energética.

Por ser geograficamente bem posicionado, o Brasil possui uma zona de excepcional disponibilidade de energia solar, tem grande potencial energético disponível, e a necessidade de desenvolver novas tecnologias que fomente e promova a mobilidade social na busca de um maior desenvolvimento regional. Esta necessidade é particularmente importante em países como o Brasil, que tem o desafio de promover o desenvolvimento tecnológico, na busca de novas técnicas para os processos de produção e conservação de alimentos. Ambiciona-se que esse crescimento socioeconômico ocorra em sintonia com o mundo globalizado de avançadas tecnologias, porém, com ações localizadas que priorizem a pesquisa e o desenvolvimento de equipamentos simples, de fácil construção, manutenção, operação e baixo custo, que respondam pelas demandas típicas de cada região do país. A escolha do setor frutífero decorre da sua importância no cenário econômico brasileiro. A utilização de sistemas de secagem tem como finalidade diminuir o desperdício de alimentos, aumentando o tempo de conservação, viabilizando a produção de um produto de boa qualidade, e a comercialização com elevado poder econômico agregado.

Segundo Fioreze (2004), a banana é uma das frutas mais consumidas no mundo, sendo cultivada na maioria dos países tropicais, além de constituir-se em uma fonte importante na alimentação humana pelo valor calorífico, energético e, principalmente, pelo conteúdo mineral e vitamínico que ela apresenta.

A banana madura, em geral, apresenta 19% de açúcares e 1% de amido. O fruto é basicamente composto de: água (70%); proteína (1,2%); carboidrato rico em fósforo (27%), apresentando regular teor de cálcio, ferro, cobre, zinco, iodo, manganês e cobalto, vitamina A, tiamina, riboflavina, niacina e vitamina C (LIMA et al., 2000).

As qualidades alimentícias e comerciais da banana são influenciadas pelas condições de amadurecimento e armazenamento. Isso porque a banana é um fruto climatérico que apresenta alta taxa respiratória e alta produção de etileno após a colheita, o que a torna altamente perecível. Devido ao rápido amadurecimento da banana, a sua vida de prateleira é muito curta, sendo este processo percebido pelas manchas escuras que aparecem na casca da fruta (FIOREZE, 2004).

Lima et al. (2000) ressaltam o valor comercial que a banana tem, sendo aproveitada para consumo “*in natura*” e industrial, uma vez que apresenta grande variedade de nutrientes e vitaminas, com a produção de produtos elaborados, voltada para a farinha de banana verde e madura, cremes, flocos, passas, purê, banana passa e doces em geral. A banana madura seca pode ser armazenada, satisfatoriamente, por alguns anos sem adição de conservantes, presume-se ser devido ao elevado teor de açúcares, que excede 50%. A utilização de técnicas adequadas de secagem pode levar à obtenção de um produto de coloração clara, consistência macia e de sabor e aroma agradáveis.

A banana passa é o resultado da banana *in natura* que sofreu um processo de secagem, até atingir um teor de umidade adequado. Segundo RDC, nº 272 da ANVISA (2005), o percentual de umidade da banana passa para ser comercializada deve ser igual ou inferior a 25% em base úmida.

A conservação de frutas através da desidratação ou secagem é um dos processos comerciais mais usados na conservação de produtos agropecuários, sem que percam suas propriedades biológicas e nutritivas. A redução do teor de umidade do produto e, conseqüentemente, de sua atividade de água, tem por objetivo evitar o desenvolvimento de micro-organismos e de reações químicas indesejáveis, que podem deteriorar o produto, tornando-o impróprio para o consumo (MADAMBA, 2007).

Segundo Nunes et al. (2015), uma das principais vantagens obtidas com a secagem de frutas é a concentração dos nutrientes. Proporciona condições de armazenamento, com sabor inalterado, por maior período de tempo, podendo chegar a anos (LIMA et al., 2000). Isto ocorre devido à minimização da proliferação de micro-organismos causada pela redução da

atividade de água do produto. A secagem é atualmente empregada, não apenas com o objetivo de conservação dos alimentos, mas, também, para elaboração de produtos diferenciados, como por exemplo, as massas, biscoitos, iogurtes, sorvetes, entre outros.

Na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) foram desenvolvidos secadores solares de exposição direta, que já são empregados na região. Estes secadores não atendem ao processo de secagem quando a quantidade do recurso solar é insuficiente para promover a secagem de produtos agrícolas de forma satisfatória. Recentemente, outros tipos de secadores solares de exposição indireta passaram a ser pesquisados. Os estudos vêm mostrando que a eficiência energética desses secadores é comparativamente maior, possibilitando um maior controle das propriedades termodinâmicas do ar de secagem frente ao de exposição direta, mas que para produção comercial de larga escala é necessário o emprego de secadores híbridos, ou sistemas de secagem mistos (NUNES et al., 2015).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar secagem experimental da banana em secador solar, secador elétrico e secagem mista (secagem solar complementada pela secagem elétrica) e analisar os resultados obtidos e a viabilidade técnica e operacional de cada sistema de secagem.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Utilizar um secador solar, com inovações em relação aos secadores solares já desenvolvidos na UFCG, que atenda a demanda necessária ao processo de secagem de banana, para as condições meteorológicas típicas do Nordeste brasileiro;
- Implementar no secador solar um sistema de aquisição de dados que permita medir e controlar as propriedades termodinâmicas do ar de secagem, tais como: temperatura, umidade relativa e velocidade do ar;

- Testar experimentalmente o secador solar para obter e avaliar a cinética de secagem de banana, analisar os valores obtidos e comparar com os da cinética de secagem de banana obtidos no secador elétrico e na secagem mista;
- Calcular a eficiência mássica dos processos de secagem da banana e analisar as vantagens e desvantagens decorrentes do uso de cada fonte;
- Comparar os resultados obtidos durante a secagem de banana, com cada fonte energética quanto a sua competitividade técnica, ressaltando suas vantagens e desvantagens;
- Determinar e analisar o consumo específico de energia (CEE) para uma mesma carga de banana passa produzida (em gramas) para cada processo de secagem e comparar os resultados obtidos.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

A globalização é um processo que se acentuou ao longo da segunda metade do século XX, tendo como características marcantes a instantaneidade das informações, das comunicações, a padronização dos meios técnicos e a interconexão das economias de diferentes países. Embora a globalização econômica seja responsável pelo desenvolvimento das relações internacionais, por agir sob a égide de forças livres, acaba, muitas vezes, comprometendo os recursos naturais e o meio ambiente como um todo.

O processo de "desenvolvimento" econômico, nos moldes como vem sendo gerenciado, no mundo globalizado, amplia as desigualdades sociais entre os "incluídos" e os "excluídos". Isto tem favorecido um aumento no processo de degradação ambiental nas regiões mais pobres, onde as populações têm sido impelidas a utilizar os recursos naturais de forma extremamente desordenada.

O desenvolvimento sustentável deve ser entendido sob a ótica de um mundo globalizado, pois os efeitos da degradação não conhecem fronteiras e a degradação de um Estado compromete a vida de todo o mundo. Por outro lado, a globalização pode ser essencial para a preservação dos recursos naturais, através do intercâmbio de mecanismos de desenvolvimento limpo.

O reconhecimento da importância da questão ambiental tem determinado uma discussão cada vez maior sobre os padrões de desenvolvimento sustentável. Longe de serem incompatíveis, como já se cogitou antigamente, os interesses econômicos e a preservação ambiental são fundamentais para a sociedade e devem conviver em harmonia para, que haja um maior equilíbrio e justiça social entre os povos (PISKE, 2011).

Neste contexto, busca-se desenvolver pesquisas que possam contribuir para um desenvolvimento sustentável, que promovam o desenvolvimento de tecnologias de baixo

custo, diminuindo o custo de produção, que seja viável economicamente e que agregue valor aos processos produtivos. A rentabilidade de um processo de secagem de um produto, seja ele agrícola ou não, deve ser levado em consideração, dentre outros parâmetros, a qualidade final do produto seco, a quantidade de energia gasta e o tempo utilizado neste processo (NUNES, 2016).

Nesse capítulo, serão apresentados os conceitos mais relevantes dos processos de secagem, o estado da arte, modelos matemáticos, o produto utilizado na pesquisa (banana passa), as fontes de energias utilizadas e os sistemas de secagem.

2.1 Secagem

A secagem é uma técnica antiga de conservação de alimentos, que consiste na remoção de água ou qualquer outro líquido do alimento na forma de vapor para o ar não saturado. Esta técnica vem sendo constantemente estudada e aperfeiçoada para obtenção de produtos com maior qualidade e menor tempo de processamento (FIOREZE, 2004). A secagem de produtos, como grãos, sementes e frutos, é um processo simultâneo de transferência de calor e massa utilizados para evitar o desenvolvimento de fungos, microorganismos e insetos que, normalmente, são as causas da deterioração desses produtos (SILVA, 2008).

Muitos alimentos passam pelo processo de secagem por necessidade de conservação. Por outro lado, existem os alimentos que passam pelo processo para adquirirem sabores refinados, como é o caso do tomate seco, vendido por altos preços no mercado (NAYAK et al., 2007).

Como um dos fluidos de trabalho utilizado nos processos de secagem solar pode ser o ar aquecido, a avaliação das suas propriedades termodinâmicas (temperatura, umidade relativa, velocidade, dentre outras) é de extrema importância, de tal modo que, sob determinadas condições operacionais, seja possível proporcionar uma secagem uniforme do produto e reduzir o tempo de secagem do mesmo (GRILO et al., 2009).

A remoção de água de alimentos sólidos surgiu como uma forma de reduzir a atividade de água, inibindo o crescimento microbiano, evitando assim sua deterioração. Esta

remoção passou a ter grande importância na redução dos custos energéticos, de transporte, embalagem e armazenagem destes alimentos. Por outro lado, sabe-se o que método mais antigo de processamento de frutas é a secagem natural ou solar. Com o passar dos séculos, os conhecimentos foram tornando-se maiores e a indústria passou a apresentar produtos com melhor qualidade (AMER e HADID, 2001). A secagem por meio natural é realizada em decorrência da ação do ar, que promove a secagem do produto proveniente da ação dos ventos e a energia utilizada na secagem é decorrente da irradiação solar.

A secagem de produtos agrícolas consiste em remover grande parte da água inicialmente contida no produto, a nível máximo de umidade no qual possa ser armazenado em condições ambientais durante anos, sem perdas de suas propriedades nutricionais e organolépticas (sabor e aroma). Tal efeito é conseguido pela criação de condições desfavoráveis ao desenvolvimento de micro-organismos no produto e pela quase total eliminação de suas atividades metabólicas (FIOREZE, 2004).

De acordo com Brooker et al. (1992), quando as condições de secagem são ideais, ou seja, temperatura, umidade relativa e teor de água controlado, os produtos apresentam aparência adequada e qualidades nutritivas dentro dos padrões. Mas, quando estas condições não são respeitadas, ou seja, a temperatura utilizada é muito elevada, ocorre um percentual bastante elevado de grãos trincados, que dificulta a estocagem e compromete a qualidade do produto.

A desidratação é um termo amplo referente à remoção de água de um produto por um processo qualquer, exceto pela operação unitária de evaporação. A secagem, por sua vez é um termo mais restrito utilizado para designar a desidratação por meio do emprego de ar aquecido, ou seja, um caso particular de desidratação (LIMA et al, 2000). Já Fioreze (2004) define o processo de desidratação do alimento como um processo que através do uso do calor ou métodos físicos leva a redução da fração de água, a atividade de água diminui, impedindo a contaminação microbiana e as reações químicas em geral, com exceção da oxidação lipídica. Sokhansanj e Jayas (2006); e Grilo (2007) afirmam que a desidratação tem como principal objetivo preservar os alimentos por meio da redução de seu teor de umidade, minimizando as perdas causadas por micro-organismos, por reações de oxidação, reações

químicas e enzimáticas. Afirmam também, que os produtos com atividade de água na faixa de 0,2 a 0,4 não sofrem reações degradantes e crescimento microbiano.

Os métodos de desidratação podem utilizar o calor para a redução da massa de água, levando a redução de peso e volume do alimento; como também pode utilizar a adição de solutos como açúcar e sal para diminuir a disponibilidade da água. A diminuição da deterioração do alimento através de ações por micro-organismos faz desta técnica uma das mais comuns e antigas como conservante de alimentos.

A ação química e enzimática também pode ser reduzida dependendo do nível de mobilidade da água que o processo de desidratação promove. Park et al. (2007), por sua vez dizem que é um processo de transferência simultânea de calor e massa, onde é requerida energia para evaporar a umidade da superfície do produto para o meio externo convencionalmente o ar. A remoção de água reduz o desenvolvimento de micro-organismos e, no caso de grãos, também a infestação por insetos, fatores que normalmente levam à perda dos produtos.

A secagem de frutas é um dos processos mais antigos para sua preservação. No passado, era realizado exclusivamente por processos naturais, porém somente nas regiões onde as condições climáticas o permitissem, destacando-se a região do Mediterrâneo na produção de uva passa (FIOREZE, 2004).

A velocidade de remoção da água na superfície do material a ser seco não pode exceder em muito a velocidade de difusão da água no interior do produto. Um estudo detalhado do problema para fins de dimensionamento e projeto de equipamentos de secagem de alimentos, requer o desenvolvimento e solução de um modelo matemático representativo do material a secar, acoplado ao modelo matemático da câmara de secagem no secador (SANTOS et al., 2010).

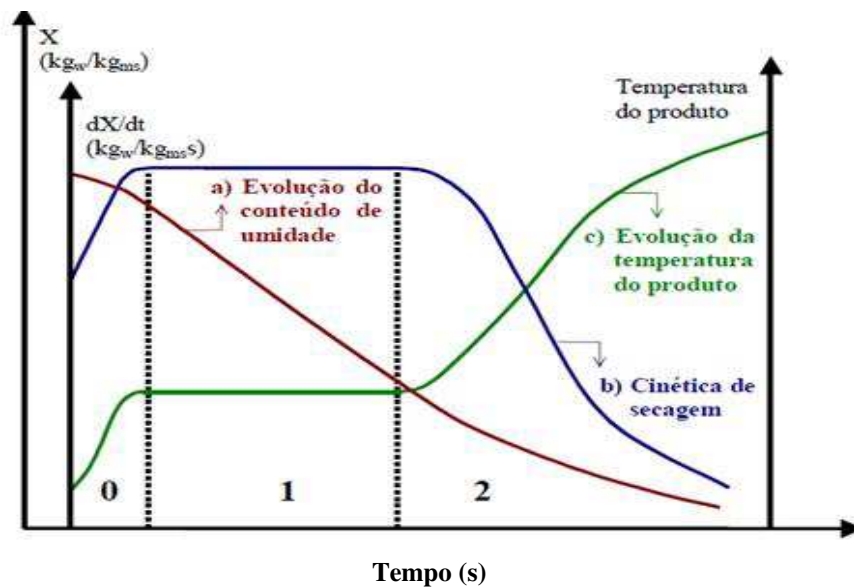
Segundo Gouveia (2003), existem diversos métodos de secagem, mas a sua escolha vai ser determinada pela natureza do alimento, pela forma e qualidade que se deseja dar ao produto processado, pelo valor econômico e pelas condições de operação.

Durante muito tempo, o tradicional método de secagem agrícola era deixar o produto no campo, sob a ação do sol e do vento, para perder parte de sua umidade. Atualmente ainda

se aplica, pois se sabe que a secagem artificial é uma operação relativamente cara. Entretanto, a secagem mecânica apresenta uma série de vantagens em relação à secagem natural, como: Não depender das condições climáticas, possibilidade de se estabelecer uma programação de secagem com mais facilidade; diminuição dos riscos de deterioração e contaminação dos alimentos em função do tempo menor de secagem e exposição dos alimentos (LIMA et al., 2000).

Segundo Alonso (2001) as transferências simultâneas de calor e de massa no decorrer da operação de secagem faz com que esta seja dividida esquematicamente em três períodos, mostrados na Figura 2.1, onde são apresentadas 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, ao longo do tempo, para um experimento utilizando ar de propriedades constantes.

Figura 2.1. Curva de Secagem. Fonte: (Alonso 2001).



A curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem (umidade do produto, X , em base seca, em relação à evolução do tempo de secagem, t). É a curva obtida pesando o produto a cada intervalo de tempo pré-fixado durante a secagem sob determinadas condições. A curva (b) representa a cinética de secagem do produto, dX/dt , obtida diferenciando a curva (a). A curva (c) representa a temperatura do produto durante a secagem.

Diversos produtos biológicos quando estão sendo secos individualmente ou em camada delgada, apresentam perda de água a uma taxa constante durante o período inicial de secagem, seguida por um período de secagem a uma taxa decrescente (LIMA et al., 2000; FIOREZE, 2004).

Segundo Cano-Chauca et al. (2004), as curvas de secagem permitem prever o momento do processo no qual se atinge o teor de umidade desejado e desta forma obter produto de boa qualidade.

2.2 Estado da arte para sistemas de secagem

O estado da arte em teses acadêmicas, se destina a documentar o que está sendo feito atualmente no campo em estudo específico. Este item é fundamental para apresentar as inovações em desenvolvimento, permitindo observar e comparar as inovações propostas com as de outras pesquisas.

Foram realizadas pesquisas sobre sistemas de secagem utilizando secadores solares e secadores convencionais nos endereços mais recomendados e no portal periódico CAPES. Foram selecionados dezenas de artigos. Ao estudá-los, são apresentados, em ordem decrescente de data de publicação, um resumo com as principais características e conclusões dos artigos que guardam maior identidade com a pesquisa desenvolvida neste trabalho.

Fudholi et al. (2014) testaram experimentalmente e analisaram o desempenho de um secador solar usado na secagem de pimentão vermelho durante 33 horas. Neste estudo a primeira lei da termodinâmica foi usada para estimar a energia útil obtida pelos coletores. As eficiências do coletor solar e do secador solar foram de 28% e 13%, respectivamente, para uma irradiação solar média de 420 W/m^2 e uma taxa de fluxo de massa de ar de $0,07 \text{ kg/s}$.

Mustapha et al. (2014) construíram e testaram 5 secadores solares, usados na secagem de peixe e concluíram que os secadores solares estão entre os melhores dispositivos, quanto à qualidade do produto, economia do processo e do ponto de vista ambiental. Concluíram também que, devido ao baixo custo e menor tempo de retorno, os secadores solares são

importantes para a economia de países em desenvolvimento, particularmente nas áreas rurais, onde o acesso à energia elétrica ainda é insipiente.

Hubackova et al. (2014) construíram um secador solar para investigar a secagem de peixe no Camboja. A secagem solar foi comparada com a secagem convencional em forno elétrico. Foram selecionadas cinco espécies típicas de peixes do Camboja para este estudo. As médias de temperatura do ar de secagem e da umidade relativa do ar foram de 55,6°C e 19,9%, respectivamente. A eficiência global do secador solar foi de 12,37%, o que é típico para secadores solares de convecção natural.

Ricci et al. (2012) fizeram um estudo comparativo com secagem solar e secagem combinada utilizando a secagem solar combinada com o tratamento osmótico na secagem de banana (*musa spp.*). Foi utilizado diferentes tratamentos osmóticos, contendo água e sacarose, diferenciados com adições de cloreto de sódio. O produto após a secagem solar sem a combinação osmótica apresentou uma perda de massa, superior a 50% do valor inicial, enquanto que o processo de secagem solar combinado com o tratamento osmótico teve uma redução de 29% da massa inicial. Quanto ao aspecto visual, a banana seca pelo processo solar-osmótico apresentou uma melhor aparência.

Stiling et al. (2012). fizeram uma comparação de desempenho entre dois secadores solares de modo misto na secagem do tomate Roma. Os secadores foram identicamente construídos, sendo um dos secadores com superfície plana móvel e facilmente ajustável, concentrando painéis solares fotovoltaico para maximizar a energia solar incidente sobre o secador. Observaram que as temperaturas no interior do secador que utilizaram os painéis solares fotovoltaico de concentração foram aproximadamente 10°C mais elevada do que no secador normal, durante a maior parte dos testes em dia ensolarado. Este aumento da temperatura levou a menores tempos de secagem do tomate Roma no secador com concentração de painéis solares. Também observaram um aumento considerável da velocidade de secagem em dias de sol, com uma diminuição de 27% do tempo total de secagem, em comparação com o normal, para o tomate atingir o teor de umidade em torno de 20% em base úmida.

Parikh e Agrawal (2011) projetaram, construíram e testaram um secador solar de exposição indireta usado na secagem de pimentões verdes e batatas fritas e, em seguida, analisaram seu processo de secagem, o design, temperatura de secagem, eficiência, utilização de materiais simples e de baixo custo e período de retorno. Concluíram que a maior temperatura do ar e uma pequena melhora na eficiência foi observado no secador solar com a cobertura de vidro, em comparação com o secador solar com cobertura de policarbonato.

Borges et al. (2010) estudaram a secagem convectiva de banana com uso de modelos matemáticos e fizeram análises da influência de variáveis como cultivar nos formatos (cilíndricos e discos), branqueamento e condições do ar aquecido nas temperaturas de 50°C e 70°C e velocidades de 0,14 e 0,42 m/s. As bananas foram secadas em secador de bandejas e pesadas em intervalos pré-definidos. O modelo foi bem ajustado às curvas de secagem apresentando coeficientes de determinação elevado ($R^2 = 98\%$ e 99%), mostrou que os fatores que mais influenciaram sobre a taxa de secagem foram a temperatura, a velocidade do ar e o branqueamento. De acordo com as constantes cinéticas apresentadas pelo modelo matemático, recomendou-se a secagem de banana em qualquer dos formatos estudados, nas seguintes condições: para banana prata, uso do branqueamento e secagem a 50°C/0,42 m/s; e para banana d'água sem uso de branqueamento e secagem a 70°C / 0,42 m/s.

Fudholi et al. (2010) estudando os secadores solares, classificaram-no basicamente em quatro tipos: (1) secadores solares diretos, (2) secadores solares indiretos, (3) secadores de modo misto e (4) secadores solares híbridos. Mostraram que os secadores 1 e 2 têm a vantagem de serem simples e de baixo custo, sendo a desvantagem sua total dependência do Sol. Já os secadores 3 e 4 têm as vantagens de operarem com e sem sol e a secagem ser realizada de forma mais rápida, porém a desvantagem é que depende de outra fonte de energia que, em geral, tem custo elevado. Também construíram e testaram experimentalmente um secador solar de túnel, composto de um coletor de secagem em formato de túnel, uma placa plana coberta de plástico e três ventiladores alimentados por um módulo de células fotovoltaica de 53 W para secar bananas (cerca de 300 kg), a fim de investigar o seu desempenho. Verificaram que a eficiência média diária do processo de secagem foi de 44%, com um fluxo de ar de 0,16 kg/s e irradiação solar média de aproximadamente, 800 W/m². Para esta irradiação, a temperatura média do ar de secagem que entra na câmara foi de 46°C. Verificaram também que a temperatura do ar de secagem aumenta com o aumento da intensidade de irradiação solar. Mas quando funciona com convecção natural, a eficiência

instantânea diminuiu mesmo com o aumento da irradiação solar. Neste caso, a eficiência instantânea foi de 35% e 27%, respectivamente, para 570 W/m² e 745 W/m² de irradiação solar.

Machado et al. (2010), fizeram uma análise comparativa com secador convencional de bandejas e secadores solar de exposição direta e indireta, para a secagem do pedúnculo de caju cortados em fatias de 1,0; 1,5 e 2,0 cm de espessura. Os testes experimentais foram realizados para as temperaturas de 55°C, 65°C e 75°C e para cada uma das condições foram construídas curvas de secagem. O produto obtido com o secador solar apresentou uma maior concentração de vitamina C quando comparado com o convencional de bandejas. As curvas de secagem apresentaram o mesmo comportamento para os dois sistemas e segundo o critério de eficiência, o secador solar de exposição indireta mostrou-se mais eficiente. A avaliação econômica para a secagem do pedúnculo de caju foi feita com os dois sistemas de secagem, sendo que o sistema convencional de bandejas apresentou um menor tempo de processo, porém com o custo de produção muito elevado.

Juamily et al. (2007) construíram e testaram um secador solar (coletor solar com cobertura de vidro, câmara de secagem solar, e um soprador de ar), para dois tipos de frutas (uva e damasco) e um tipo de vegetal (feijão). Observaram que o fator mais eficaz na taxa de secagem é a temperatura do ar no interior da câmara de secagem. Mediram o efeito da variação da velocidade do ar de secagem no interior da câmara de secagem e concluíram que esta característica pode ser desprezada, quando a umidade relativa do ar de saída da câmara estiver entre 25 e 30%, portanto, não há necessidade de ar a alta velocidade no interior da câmara de secagem. Perceberam ainda que a câmara de secagem opera com uma eficiência de 20% durante a secagem de 10 kg de uvas a 65°C e 30% de umidade relativa do ar de secagem no interior da câmara de secagem, e opera com uma eficiência de 33% para a secagem de 10 kg de damasco a 60°C e 25% de umidade relativa do ar de secagem no interior câmara, ambos em camada fina.

Madhlopa e Ngwalo (2007) construíram, com materiais simples, e testaram em três modos de operação (solar, híbrido e fóssil), um secador solar de exposição indireta, na secagem de 20 kg abacaxi fresco (*Ananas comosus*). Os valores médios da eficiência foram 15%, 11% e 13% nos modos de operação, solar, híbrido e fóssil, respectivamente. E assim,

concluíram que o secador solar é adequado para a preservação dos abacaxis e outros alimentos frescos.

Almeida et al. (2006) estudaram a cinética de secagem de acerola em secador de leito fixo com temperatura de 50, 60 e 70°C e velocidade de 1,0 e 1,5 m/s. De acordo com as análises dos dados, a cinética de secagem ocorreu no período de taxa decrescente, verificando-se influência das variáveis velocidade do ar de secagem e temperatura, no entanto a temperatura foi o fator que apresentou maior influência.

Gouveia et al. (2003) estudaram, experimentalmente, a cinética de secagem do cajá (*Spondias lutea L*), em secador de leito fixo, utilizando temperaturas de 50, 60, 70 e 80°C e velocidade do ar de secagem de 1,0 e 1,5 m/s. Foram utilizados frutos no estágio maduro proveniente do comércio local. De acordo com a análise dos dados, a cinética de secagem do cajá ocorreu no período de taxa decrescente sendo fortemente influenciada pela temperatura em relação a velocidade do ar de processo. As equações polinomiais encontradas ajustaram-se eficientemente para valores dentro da faixa de temperatura e velocidade estudada.

2.3. Modelos matemáticos

Como a secagem de produtos alimentícios é um processo que envolve simultaneamente os mecanismos de transferência de calor e massa, deve-se partir desses princípios para se obter um modelo matemático que represente bem os dados experimentais. Entretanto, isso às vezes torna-se difícil devido à complexa estrutura do alimento e às mudanças químicas e físicas que ocorrem durante a sua secagem, provocando muitas vezes uma redução na qualidade organoléptica e valor nutritivo.

Um dos fatores importantes que devem ser levados em consideração nas equações de transferência de calor e massa durante a modelagem é o encolhimento que os alimentos sofrem com a remoção de umidade durante o processo de secagem. Embora o conhecimento dessa alteração física seja essencial para o melhor entendimento da secagem, a função desse efeito nas equações de transferência ainda não é bem conhecida para a maioria dos alimentos.

Uma aproximação empírica foi sugerida por Lozano et al. (1983) que mediram o coeficiente de encolhimento de vários produtos alimentícios. O efeito do encolhimento na

remoção de umidade de alimentos também foi analisado por Misra & Young (1980), que assumiram a difusividade como dependente da concentração. Anos mais tarde, Viollaz & Suarez (1985) estudaram a difusão isotérmica não estacionária em placas planas porosas que encolhiam ou expandiam em função da variação de umidade, e descobriram que não é necessário assumir a difusividade como dependente da concentração para uma modelagem dos dados experimentais.

A variação da umidade durante o processo de secagem influencia fortemente a velocidade das reações que ocorrem no interior do produto. Com isso, inúmeros estudos têm sido realizados para representar o período à taxa decrescente de secagem através de modelos matemáticos. Uma das formas é construir a curva de secagem do produto e ajustar os modelos já existentes a essa curva.

A teoria que tem apresentado mais aceitação é a teoria da migração de água por difusão, que se apoia exclusivamente na 2ª lei de Fick, expressa em termos de gradiente de umidade.

Lewis (1921) e Sherwood (1929) foram os primeiros que fizeram referências a esta lei, interpretando a secagem como um fenômeno de difusão de água líquida. A relação fundamental é apresentada na forma geral a seguir:

$$\frac{dU}{dt} = -\nabla \cdot (D\nabla U) \quad (2.1)$$

Onde:

U = teor de umidade no tempo t, base seca.

t = tempo de secagem, segundos.

D = coeficiente de difusão m²/s.

∇ = operador nabla.

Assume-se volume constante, o que é uma abstração, pois a água que evapora, na maioria dos casos de produtos alimentícios, é parte integrante da matriz estrutural.

Diversas soluções analíticas da equação de difusão para diferentes condições iniciais e de contorno, considerando a difusividade constante ou variando com a concentração de água, foram obtidas por Crank (1975). Ele utilizou a difusividade aparente que engloba os diversos efeitos que possam intervir no mecanismo de migração.

Os modelos empíricos e semi-empíricos são usados para descrever a cinética de secagem de uma partícula ou de uma camada fina de partículas.

Os modelos empíricos consistem numa correlação direta entre o teor de água e o tempo de secagem, enquanto os semi-empíricos baseiam-se na hipótese da validade da Lei do resfriamento de Newton aplicada à transferência de massa. Assumindo que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre o teor de água do produto e seu respectivo teor de água de equilíbrio, para as condições de secagem especificada, presumindo-se que, durante a secagem, as condições sejam isotérmicas e que a transferência de umidade se restrinja à superfície do produto (LIMA et al., 2000).

O modelo exponencial ou logarítmico foi usado por Lewis (1921) sugerindo que, durante o processo de secagem de materiais higroscópicos porosos no período de taxa de secagem decrescente, a mudança da umidade fosse proporcional à diferença instantânea entre o teor de umidade do material e o teor de umidade do material quando em condições de equilíbrio com o ar de secagem, ou seja:

$$\frac{dU}{dt} = -k(U - U_e) \quad (2.2)$$

ou

$$\frac{(U-U_e)}{(U_0-U_e)} = UR = \exp(-kt) \quad (2.3)$$

Onde:

UR = teor de umidade adimensional.

Ue= teor de umidade de equilíbrio, base seca.

U₀ = teor de umidade inicial, base seca.

k = constante de secagem.

t = tempo.

Esse modelo é análogo à lei de resfriamento de Newton na transferência de calor, sendo muito utilizado para descrever a secagem de produtos agrícolas. Considera-se que a resistência à difusão ocorre, principalmente, nas camadas mais externas do material.

Levantamentos mais precisos de dados indicaram, entretanto, que a equação (2.3) não se aplica a toda a curva de secagem a taxa decrescente. Um expoente de ajuste n no termo tempo, foi proposto por Page (1949), para ampliar a validade do modelo para toda a curva.

$$\frac{(U-U_e)}{(U_0-U_e)} = UR = \exp(-kt^n) \quad (2.4)$$

Onde k e n são constantes de secagem que acabam não tendo um significado físico definido, embora Misra & Brooker (1980) relacionem n com as condições internas do material, enquanto que k representa os efeitos das condições externas.

Segundo Farias (2011), para verificação da cinética de secagem, foi observado que a equação de Fick apresenta grandes limitações, quer seja pela necessidade de um grande número de termos, quer seja por não representar os dados experimentais em trechos das curvas. Dessa forma, para os processos de secagem de frutas, é melhor usar o modelo semi-teórico simplificado do modelo de Fick, o modelo de Page.

Uma correlação generalizada que representa as curvas de secagem correspondentes a várias temperaturas foi proposta por Brunello (1976). Obtêm-se uma curva de secagem única, independente da temperatura do ar e da massa do material. A correlação é denominada modelo de duas resistências, onde o teor de umidade adimensional UR é plotado em função do tempo reduzido tr , dados a seguir:

$$UR = \frac{U}{U_0} \quad (2.5)$$

$$tr = \frac{kt}{U_0} \quad (2.6)$$

Onde:

t_r = tempo reduzido.

k = coeficiente angular da parte inicial da curva de secagem, ou seja, a taxa inicial de secagem.

U_0 = teor de umidade inicial, base seca.

De acordo com o modelo, substâncias solúveis presentes nos alimentos conferem uma baixa pressão de vapor no seu interior. Como durante a secagem a água sai do produto, é de se esperar que a pressão de vapor no seu exterior seja menor. Para que isso aconteça, conclui-se que na região externa a água se encontre no estado vapor, ou seja, que a evaporação se dê junto à face interna da superfície, constituindo-se numa primeira resistência à secagem. Com a saída de umidade através da membrana, o soluto se concentra no lado interno agindo como uma segunda resistência ao movimento de umidade. Baseado nessas considerações, o valor de K é calculado analiticamente como segue:

$$K = \frac{1}{\{[R/(Prs-Pr)]+F\}} \quad (2.7)$$

Onde:

Prs = pressão de vapor d'água na temperatura de bulbo seco do ar de secagem, N/m²

R = resistência do transporte de massa, Ns/m²

F = fator de correção, s.

Esse modelo tem apresentado bons resultados quando aplicado a cereais com umidade inicial superior a 25% (base seca), onde o modelo da difusão não representa bem o mecanismo de migração da água através do grão (BECKER, 1959).

Uma simplificação no modelo foi proposta por Brunello & Nascimento (1979).

$$K = (P_w - P_r)/R_t \quad (2.8)$$

Onde:

P_w = pressão de vapor d'água na temperatura de bulbo úmido do ar de secagem, N/m².

R_t = resistência ao transporte de massa, Ns/m².

Eles obtiveram bons resultados utilizando esse modelo na secagem de sorgo, milho, malte e trigo. A partir do valor de K , calculado experimentalmente, utiliza-se a equação (2.7) ou (2.8) para prever o comportamento de secagem sob outras condições.

A velocidade das transformações no interior dos alimentos também é fortemente influenciada pela temperatura durante a secagem. O conhecimento da distribuição de temperatura como função do tempo de secagem, portanto, torna-se importante.

Alzamora et al. (1979) utilizaram um modelo simplificado de transferência de calor para prever a temperatura de pedaços de frutas e hortaliças durante a desidratação. A principal vantagem do modelo utilizado é a sua simplicidade, uma vez que a solução é analítica, e requer apenas o conhecimento da curva de secagem do alimento e de estimativas não muito precisas dos valores da difusividade térmica. Eles obtiveram bons resultados para abacate, maçã, batata e beterraba.

De acordo com Sun & Meunier (1987), os modelos difusionais podem ser classificados em duas categorias: "isotérmicos" e "com perfil de temperatura uniforme".

No primeiro caso é assumido uma rápida transferência de calor e relativamente lenta difusão de umidade, e a secagem ocorre praticamente na temperatura de bulbo seco do ar. Essa hipótese tem sido largamente utilizada na literatura para estimar o coeficiente de difusão de umidade de vários materiais alimentícios. Em particular, a secagem de alimentos com relativamente baixo teor de umidade inicial, como sementes e grãos, tem apresentado bons resultados (BECKER & SALLANS, 1955; CHU & HUSTRULID, 1968; SUAREZ et al., 1980; LI & MOREY, 1984; TOLABA & SUAREZ, 1988). A evidência experimental da rápida aproximação da temperatura do grão para a temperatura do ar e a pequena mudança no volume do produto durante a secagem são as principais razões dos bons resultados.

Por outro lado, o modelo "com perfil de temperatura uniforme" assume uma condutividade térmica infinita do produto, de maneira que a temperatura seja uniforme através da amostra que está sendo seca mas varia com o tempo. Resultados obtidos por Vaccarezza et al. (1974) durante a secagem de fatias de beterraba confirmaram essa hipótese. Os

pesquisadores assumiram a simplificação de condutividade térmica infinita para formular os balanços de calor e massa e resolveram numericamente as equações diferenciais resultantes.

Nestes próximos tópicos serão apresentados o produto utilizado na pesquisa (banana passa), as fontes de energias utilizadas e os sistemas de secagem.

2.4 Banana

Segundo Vieira (2015), a banana é cultivada em mais de 125 países no mundo. Em alguns deles, a atividade se destaca como uma das principais fontes de arrecadação e geração de emprego e renda. O continente asiático lidera a produção dessa fruta, com 58% do volume produzido; o americano vem em segundo lugar, com 26% (América do Sul, com 17% e a América Central, com 8%); e o africano, em terceiro lugar, com 14%.

A banana destaca-se na primeira posição no ranking mundial das frutas, com uma produção de 106,5 milhões de toneladas. O Brasil produz sete milhões de toneladas, com participação de 6,9% nesse total .

Nesse sentido, a bananicultura tem se expandido bastante na maioria dos países nas três últimas décadas, passando de 35 milhões de toneladas na safra 1978 para 107 milhões de toneladas na safra 2011. Isso foi possível graças ao uso mais intensivo de tecnologia, proporcionando melhores produtividades.

A Índia lidera a produção de banana no ranking mundial, sendo responsável por 28,1%. A China, com 10,1%, vem em segundo lugar, seguida pelas Filipinas, com 8,6%; Equador, com 7%; Brasil, com 6,9%; e Indonésia, com 5,8%.

Nas últimas cinco safras, o maior rendimento médio por área colhida pertence à Nicarágua, perfazendo um total de 55,6 t/ha, praticamente três vezes maior que a média mundial, de 19,3 t/ha. Os maiores produtores, portanto, não são necessariamente os que obtêm os maiores ganhos por área cultivada.

No contexto regional, a bananicultura é uma atividade de grande importância socioeconômica para o nordeste brasileiro e é um dos produtos agrícolas mais cultivados nos

países de clima tropical, devido ao seu grande valor calorífico, energético, elevado teor de vitaminas e conteúdo mineral, é uma das frutas mais consumidas no mundo (CEPEA, 2007).

A maioria das cultivares de banana originou-se no continente asiático, tendo evoluído a partir das espécies diploides selvagens *M. acuminata* e *M. balbisiana*. A banana desenvolve-se e produz fartamente em regiões que possuem o clima quente e úmido. Essas condições favoráveis são registradas na faixa compreendida entre os paralelos 30° de Latitude Norte e Sul, nas regiões onde as temperaturas se situam entre os limites de 10 e 40°C. Existe a possibilidade de seu cultivo em latitude acima de 30° (até 45°), desde que a temperatura seja adequada. Devido a sua adaptação, é cultivada em quase todos os países tropicais (GUERRA, 2004).

A bananicultura tem evoluído consideravelmente nas décadas de 70, 80 e 90, por ser um dos cultivos perenes de mais rápido retorno do capital investido. Além disso, ela apresenta um fluxo contínuo de produção a partir do primeiro ano, o que a torna muito atraente para os agricultores. As bananeiras produtoras de frutos comestíveis são da classe das Monocotiledôneas (ALVES, 1999).

As bananas, que constituem as frutas mais populares do mundo, são membros do gênero *Musa* (parte da família *Musaceae*) e considera-se que elas são derivadas das espécies selvagens *Musa acuminata* (AA) e *Musa balbisiana* (BB). Acredita-se que quase 1000 variedades de banana estão espalhadas pelo planeta, as quais estão subdivididas em 50 subgrupos (UNCTAD, 2007).

Embora exista um número expressivo de variedades de banana no Brasil, quando se consideram aspectos como preferência de consumidores, produtividade, tolerância a pragas e doenças, resistência à seca, porte e resistência ao frio, restam poucos cultivares com potencial agrônomico para serem usados comercialmente. Os cultivares mais difundidos no Brasil são: Prata, Pacovan, Prata Anã, Maçã, Mysore, Terra e D'Ângola, Nanica, Nanicão e Grande Naine, sendo que a Prata e a Pacovan são responsáveis por mais de 60% da área cultivada com banana no território brasileiro (ALVES, 1999).

Uma grande dificuldade enfrentada pelos fruticultores é a conservação dos frutos maduros, pois grande parte da colheita é desperdiçada, é estimada uma perda de 40% entre a colheita no campo até o consumidor final (NUNES, 2016).

Segundo Fioreze (2004) o principal componente das frutas é a água, de 75 a 95%. Dos macro nutrientes, os carboidratos são os predominantes, geralmente na forma de açúcares (sacarose, glicose e frutose). Seu teor varia de 5 a 25% nas frutas frescas e as bebidas delas preparadas possuem, em média, teor de açúcares de 12%.

Segundo Lima et al. (2000), a banana é composta basicamente de água, proteínas e carboidratos, rica em potássio, além de vários outros componentes químicos tais como fósforo, cálcio, ferro, cobre, zinco, iodo, manganês e cobalto, em menor teor. Na Tabela 2.1, é apresentada a composição centesimal da banana *in natura*.

Tabela 2.1. Composição centesimal da banana.

Composição	Valor centesimal (100 g ⁻¹)
Umidade	78 g
Matéria seca	7,12 g
Carboidratos	6,42 g
Extrato etéreo	71 mg
Fibras	136 mg
Proteínas	371 mg
Cinzas,	121 mg
Vitamina C	6,91 mg
Betacaroteno	0,6 µg
Calorias	27,84 cal
PH	5,00
P	7,19 mg
K	52,19 mg
Ca	4,16 mg
Mg	3,40 mg
Cu	0,10 mg
Fe	0,16 mg
Mn	0,02 mg
Zn	0,08 mg
B	0,03 mg
SS	30,2 °Brix

As qualidades alimentícias e comerciais da banana são influenciadas pelas condições de amadurecimento e armazenamento. A banana por ser um fruto climatérico (fruto sensível

ao etileno, ou seja, amadurece pela a ação do etileno) apresenta alta taxa respiratória e alta produção de etileno após a colheita, o que a torna altamente perecível (NUNES et al., 2013).

A banana apresenta uma alta higroscopicidade, ou seja, tem a propriedade de realizar trocas de água por meio de vapor ou líquido com o ar ambiente que a envolve através de adsorção ou dessorção (GRILLO et al., 2009). O conhecimento das isotermas de sorção é essencial para um projeto adequado de embalagens permeáveis e para estabelecer o teor de água que possibilite aumentar o tempo de armazenamento do produto (LIMA et al., 2000).

A banana apresenta teores de água inicial de, aproximadamente, 70% b.u., favorecendo o crescimento microbiano, o que causa a degradação das suas características organolépticas, levando a perda do valor nutricional e, por conseguinte, perda no valor comercial. A fim de evitar essa degradação, almeja-se que a fruta destinada a um tempo de armazenamento maior esteja com teores de água reduzido, em torno de 25-30% b.u.. Para isso, faz-se necessário que esse produto seja submetido a um processo de secagem (NUNES, et al., 2013).

A técnica de processamento mais simples para banana é a obtenção da banana passa, a típica banana seca brasileira. Assim é importante saber a influência dos parâmetros de secagem da banana para as condições ótimas do processo. Trata-se da banana que sofre um processo de secagem, até atingir um teor de umidade adequado, que, segundo Lima et al. (2000), deve ser de 15% em base úmida.

Bananas secas são estáveis à ação de micro-organismos, se o teor de umidade for menor que 25% (base úmida). Industrialmente, a secagem de banana é conduzida até que o teor de água em base úmida atinja o valor de 20 a 25%, sendo o seu controle realizado de maneira prática, pela observação da cor, consistência e teor de água do produto final (Nunes, 2016).

Segundo Borges et al. (2010) o branqueamento da banana prata cortada em formato cilíndrico sempre conduz a menores taxas de secagem, já quando cortada em forma de disco sua influência é mais acentuada a menores velocidades do ar.

A temperatura e o tempo de secagem são parâmetros importantes para alterar a cor dos produtos agrícolas durante a secagem, principalmente das frutas. Devido a esta importância vários pesquisadores vêm estudando os fenômenos de alteração de cor e textura da banana durante o processo de secagem (JIANG et al., 2010; PAN et al., 2008; NGUYEN e PRICE 2007; LEITE et al., 2007).

Segundo Phooungchandag e Woods (2000) a curva de secagem convectiva da banana descascada é mais eficaz quando se utiliza o modelo de Newton (exponencial), provavelmente devido a uma resistência de superfície que se desenvolve durante o processo de secagem.

A escolha da banana como matéria-prima a ser seca para o estudo comparativo neste trabalho é decorrente das análises de trabalhos anteriores utilizando este produto para fins de desenvolvimento dos secadores solares, que busca contribuir para o beneficiamento da banana, tendo em vista a importância que essa fruta representa para a economia do estado da Paraíba (NUNES et al., 2015).

2.5 Tipos de sistemas utilizados para secagem de banana

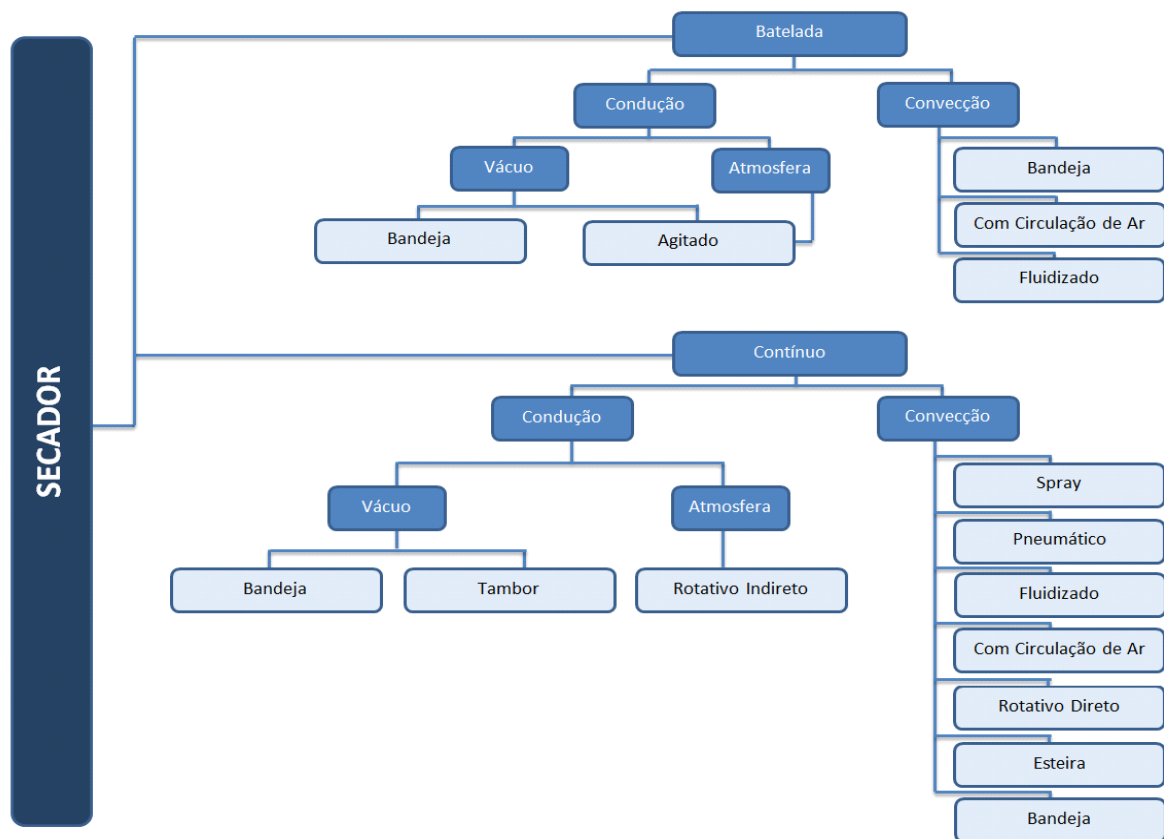
Uma das maiores dificuldades na seleção de secadores é a grande variedade de equipamentos e processos de secagem para se obter um produto de qualidade. Muitos métodos são apresentados na literatura, os baseados em conceitos fenomenológicos e os que dizem respeito aos aspectos de custo.

Segundo Park et al. (2007), os secadores podem ser classificados conforme mostrado na Figura 2.2. Nos secadores mecânicos e elétricos, a energia utilizada para o aquecimento do fluido de secagem é proveniente da queima de lenha, combustíveis fósseis ou pelo uso da eletricidade. No secador solar por sua vez, o fluido de secagem é aquecido por meio da energia solar (PARK et al., 2007).

Os secadores variam de acordo com diversos fatores dentre os quais destacam-se o tipo de produto a ser seco, a capacidade de secagem, fonte de energia utilizada, etc. (FIOREZE, 2004).

Entre os secadores, podem-se citar os de cabine ou bandejas, os quais são comumente usados em operações descontínuas, em uma ou mais unidades. São bastante eficientes, mais econômicos, baixo custo de construção e manutenção. Esses secadores são basicamente utilizados em operações de pequena escala e em usinas piloto, onde consiste de uma cabine ou câmara que recebe as bandejas com o produto a ser processado (ARAGÃO, 2007). O ar impulsionado por um soprador ou ventilador passa por um sistema de aquecimento e entra na câmara passando pelo material que está sendo processado.

Figura 2.2. Classificação dos secadores com base no método de operação (Park, 2007)



2.5.1 Secagem solar

A energia solar apresenta-se como alternativa de grande interesse pelas suas qualidades e características de grande potencial, largamente disponível em todo Brasil e principalmente no Nordeste.

Os secadores solares podem ser classificados de dois tipos: secador de exposição direta ou indireta, sob convecção natural ou forçada. O secador de exposição direta é assim

chamado em virtude do produto receber diretamente a radiação solar e o secador de exposição indireta é, normalmente, um coletor solar adicionado a uma câmara de secagem com bandejas, onde o produto será distribuído, e ainda se pode ter uma chaminé para que haja uma melhor circulação na câmara e conseqüentemente no produto (JUAMILY et al., 2007). O secador pode ser construído de diversos materiais como: chapas metálicas, madeira, alvenaria, perfil de alumínio e muitos outros materiais reciclados. A placa ou chapa para absorção da irradiação incidente pode, simplesmente, ser uma folha metálica de zinco pintada de preto fosco ou usar um material mais seletivo para aumentar a temperatura da placa. A escolha do material passa a ser função da eficiência do secador, da qualidade do produto final, dos custos e tempo de vida útil do mesmo. O sistema é isolado termicamente por um material de baixa condutividade térmica para evitar perdas de calor e na cobertura pode-se usar tanto vidro quanto plástico transparente com espessura definida no projeto (PLOTTER et al., 2006).

Segundo Nijmeh et al. (2006), dentre as tecnologias existentes para o aproveitamento de energia solar, destaca-se o secador solar multiuso para produtos naturais (frutos, grãos, sementes, castanhas e ervas medicinais, entre outros), desenvolvido e testado pelo Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia. No processo de secagem é importante observar a posição que permite uma máxima insolação, ou seja, radiação aproximadamente perpendicular durante todo o ano (NIJMEH et al., 2006). Segundo Nunes et al. (2015), no caso de Campina Grande a melhor inclinação deve ser de 17°, podendo variar de 15° a 22° em direção do Norte geográfico.

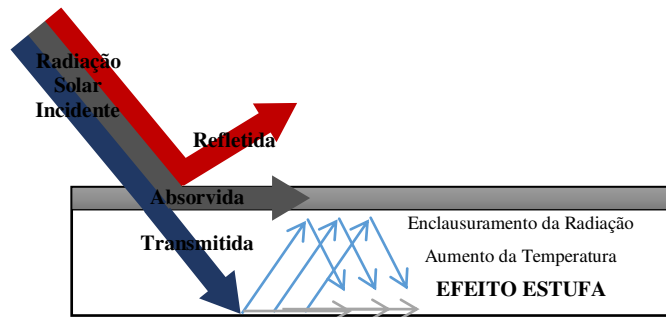
Segundo Fioreze (2004), a propagação da radiação solar é do tipo eletromagnética e a Terra recebe essa radiação em pequenos comprimentos de onda e emite com comprimento de onda do tipo grande (infra vermelho). Quando a radiação solar incidente atinge a cobertura do secador, parte é absorvida e causa uma elevação da temperatura no interior do secador, conseqüentemente provoca a elevação da energia térmica, resultando em uma radiação com um grande comprimento de onda de baixa frequência. Essa radiação é retida no interior do secador, provocando o efeito estufa (Figura 2.3).

Segundo Gomes (2007), quando a superfície absorvedora do secador é pintada de preto fosco, favorece o efeito estufa no interior do coletor solar.

Na Figura 2.4, é apresentado um clássico secador solar de exposição direta, onde o produto a ser seco é colocado no interior do secador constituído de uma caixa, uma superfície

translúcida que pode ser de vidro ou policarbonato, uma entrada de ar com temperatura ambiente e uma saída de ar aquecido, onde o ar que circula da entrada para saída pode ser movido por convecção natural ou forçada.

Figura 2.3. Efeito estufa no secador solar.



De acordo com Nunes (2016), é necessário o fornecimento de energia na forma de calor para a retirada da umidade do produto e um agente de transporte para remover o vapor de água formado na superfície do produto a ser seco. A circulação de ar, na câmara de secagem, tem como finalidade transportar a umidade removida do produto para o ambiente. A retirada da umidade do produto pode ser obtida por convecção natural ou com a utilização de sistemas de exaustão ou ventilação com soprador aumentando a velocidade de circulação do ar no interior do secador, promovendo desta forma à convecção forçada. A Figura 2.4 apresenta um esquema de um secador solar com convecção natural. Na Figura 2.5, mostra-se um outro esquema de secagem solar sob convecção forçada com radiação incidente com exposição direta do material (GOMES, 2007).

Figura 2.4. Esquema de secador solar de exposição direta com convecção natural (GOMES, 2007).

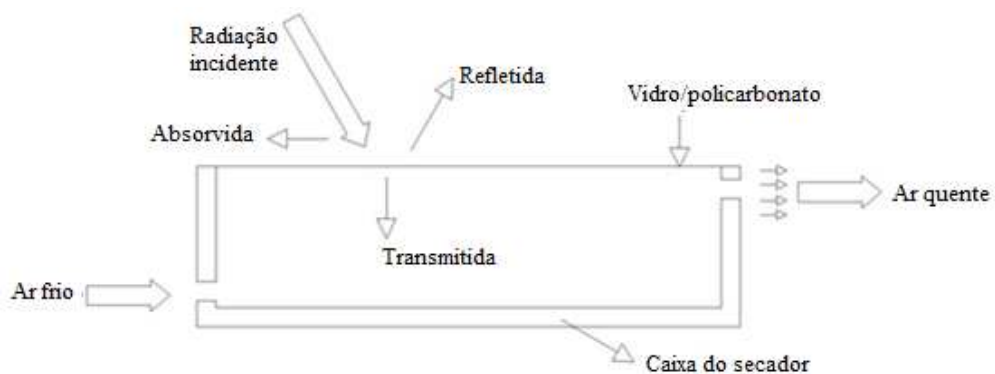
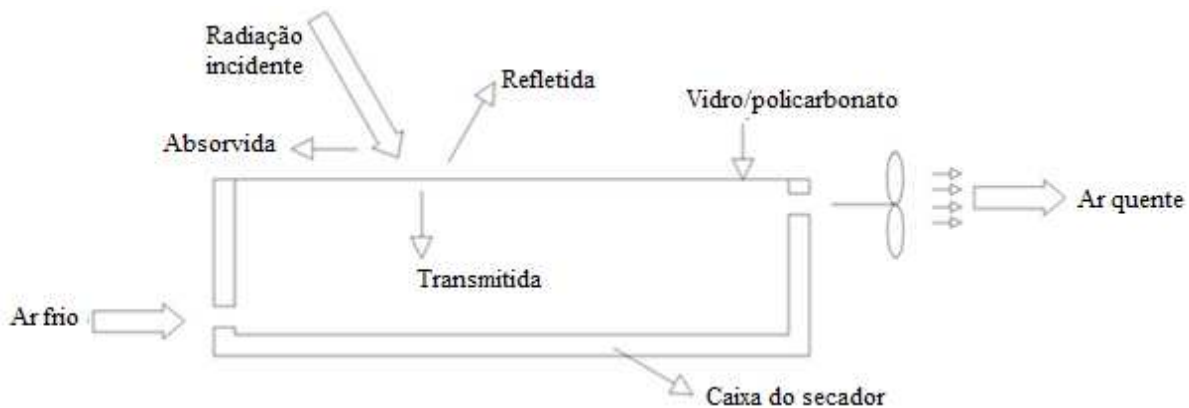


Figura 2.5. Esquema de secador solar de exposição direta com convecção forçada (GOMES, 2007).



Smitabhindu et al. (2008) desenvolveram um modelo matemático para um sistema otimizado que melhora a secagem de banana, assistido por energia solar. A literatura apresenta vários resultados positivos decorrentes da utilização da convecção forçada nos sistemas de secagem solar; entretanto poucos trabalhos têm utilizado essa estratégia, na otimização dos sistemas de secagem alimentados por energia solar para frutas tropicais.

Segundo Grilo (2013) a principal fonte de energia no nosso planeta é o sol: diretamente pela luz e pelo calor; indiretamente porque é a energia solar que alimenta parte da vida na Terra, ela é responsável pela chuva, pelo vento e até pela formação dos combustíveis fósseis que são energia solar transformada em energia química. Neste século XXI, a utilização combinada dos vários tipos e fontes de energia, com ênfase nas energias renováveis é o caminho para construção de uma sociedade equilibrada que utiliza de forma eficiente os recursos energéticos proporcionando qualidade de vida elevada e promovendo o desenvolvimento sustentável.

O Brasil é uma potência energética. A natureza forneceu fartos territórios com elevada incidência do recurso solar, terras agriculturáveis para produção de biomassa energética, recursos hídricos com elevado potencial energético e agora, com as recentes descobertas do pré-sal, colocou o Brasil definitivamente como líder mundial na área dos recursos energéticos. Precisamos estar atentos e preparados para fazer as escolhas corretas e desenvolver as tecnologias mais eficientes para consolidar nossa liderança e ser exemplo para o mundo. A grande importância da energia solar vem despertando o interesse de muitos pesquisadores (GRILO, 2007; PRAKASH e KUMAR, 2013; SAVICKI, 2007).

O Nordeste tem uma grande incidência de irradiação solar e praticamente toda essa energia é desperdiçada, energia limpa e gratuita. Em busca de uma solução e também de expandir a matriz energética brasileira, o governo está investindo cerca de R\$ 228,63 por MWh, o que resulta na contratação de 122 MW de energia solar com a construção de 6 parques de geração de energia solar, a maioria no interior do estado de Pernambuco, o que demandará um investimento de 597 milhões de Reais (GRILO, 2007).

Segundo Savicki (2007), pesquisadores de várias universidades brasileiras, utilizam a energia solar em diversas aplicações como: processos de secagem de frutas e grãos, aquecimento de água, calefação de ambiente, refrigeração por ciclo de absorção e adsorção, destiladores solares por efeito térmico, entre outras.

A energia solar em si não custa nada e é imune às flutuações nos preços das 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; sem contar que a maioria dos métodos usados gera poucos problemas ambientais. A desvantagem da energia solar está no fato de não ser de fluxo contínuo, embora seja possível coletar e armazenar. Trata-se de uma energia intermitente, com fluxo interrompido pelas noites e pelos dias nevoentos; podendo ser supridos com outros investimentos (PENEIRO et al., 2010).

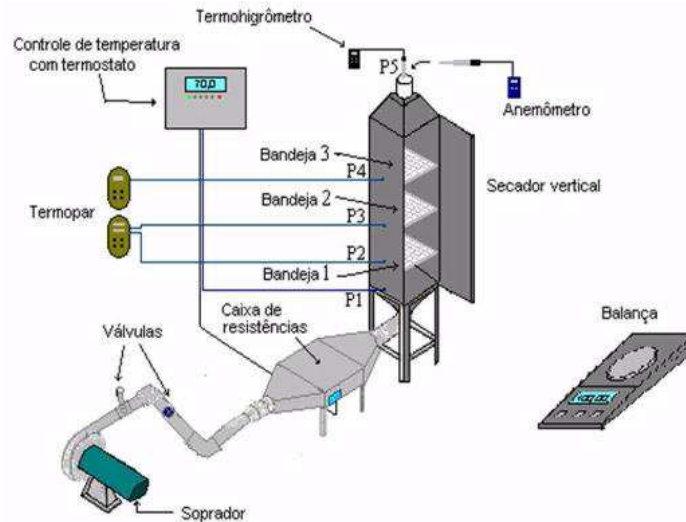
A eficiência do sistema de secagem com energia solar é afetada pelas propriedades dos materiais de secagem, por exemplo, teor de água, tamanho, forma e geometria, bem como as condições ambientais, radiação solar, temperatura, umidade relativa, velocidade e pressão atmosférica do ar ambiente. Testando 12 secadores diferentes, a eficiência térmica máxima encontrada foi 22,1% para o secador de gabinete, 21,4% para o secador de rack e 21,7% para o secador de túnel (JOSHI et al., 2005).

2.5.2 Secagem em bandeja

Um dos equipamentos mais versáteis para a secagem de alimentos é o secador de bandejas (Figura 2.6), onde o produto é disposto em bandejas e submetido a uma corrente de ar aquecido. Após seu surgimento no mercado, o secador de bandejas passou a ser utilizado

por pequenas e médias indústrias de alimentos. A partir do momento que o mercado passar a disponibilizar mais equipamentos com as características citadas acima, certamente haverá um aumento na implantação de indústrias de secagem, por parte de pequenos, médios e grandes produtores, associações e cooperativas de produtores e redução de perdas do excedente da produção dos produtos agropecuários (GOUVEIA et al., 2003; MACHADO et al., 2008).

Figura 2.6. Secador convencional de bandejas (Gouveia et al., 2003)

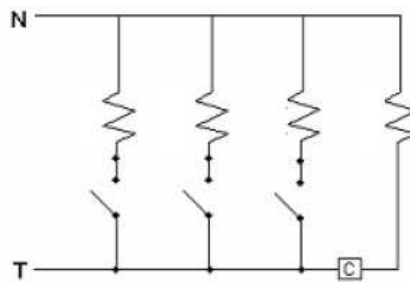


Os secadores de cabine ou bandejas podem operar sob duas circunstâncias: na primeira, a câmara do aquecedor está cheia e o ar só será movimentado após a temperatura atingir o grau desejado: na segunda, os produtos só deverão ser introduzidos no secador depois que a temperatura e a circulação de ar estiverem nas condições ideais. Uma das características inconveniente dos secadores de cabine é que, muitas vezes, a distribuição de ar não é inteiramente uniforme e, por esta razão, o produto pode ser desidratado desigualmente: para evitar este transtorno, se recorre à prática anti-funcional de constantemente mudar os produtos de lugar e de proceder a troca de posição das bandejas (GOUVEIA et al., 2003).

Nos secadores de cabine ou bandejas (Figura 2.6), o ar ambiente é impulsionado por um soprador centrífugo com potência superior a 5 cv e rotação superior a 3000 rpm, que forma uma corrente de ar através de um compartimento onde está instalado um banco de resistências elétricas com potências elevadas podendo chegar a 5 kW (Figura 2.7), onde o ar é aquecido e entra no secador com melhor condição de secagem. A temperatura de secagem é monitorada na maioria das vezes por sensores do tipo termoresistivos (PT100) ou por termopares, conectados a um controlador de temperatura que aciona o banco de resistência em

função da leitura do sensor e do *set-point* pré-definido, mantendo o controle da temperatura em função da necessidade do processo. Neste secador, o fluxo de ar passa perpendicular à bandeja, com velocidade previamente definida através da regulação da válvula tipo gaveta instalada no sistema de admissão do ar. Para monitorar a temperatura interna ao longo da câmara de secagem são utilizados neste secador cinco sensores, como podem se observados na Figura 2.6. Um sensor denominado de P1 posicionado na entrada do fluxo de ar na câmara, P2 posicionado imediatamente após a primeira bandeja, P3 após a segunda bandeja, P4 após a terceira bandeja e P5 na saída de ar da câmara.

Figura 2.7. Esquema de distribuição das resistências na fonte externa do secador



A umidade relativa do ar ambiente na saída da secagem é medida através de um termo higrômetro. A perda de massa no decorrer do tempo de processamento deve ser determinada por uma balança de precisão, em intervalos regulares pré-determinados no início do processo. O procedimento de verificação da massa deve durar o menor tempo possível, para evitar a influência do ambiente e alterações das propriedades termodinâmicas do processo. Este procedimento deve ser repetido até a massa atingir o equilíbrio de umidade. O objetivo destes procedimentos é determinar a curva da cinética de secagem e a eficiência do processo de secagem.

Segundo Nunes (2016), a eficiência do secador solar está relacionada com seu rendimento térmico, enquanto que a eficiência do processo de secagem pode ser avaliada pela diferença entre a massa inicial e a massa final da banana, em relação à massa inicial de água presente no produto.

Lima et al. (2000), relata que, no sistema produtivo atual, além da qualidade dos alimentos, o custo do processo de secagem é uma das parcelas mais importantes, podendo atingir até 20% do custo total das atividades relativas à pós-colheita.

Segundo Lima et al. (2000), para que o produtor ou gerente de uma unidade comercial possa administrar um sistema de secagem é indispensável conhecer as características do secador, como sua eficiência e o consumo de energia. A umidade do alimento ao ser inserido no secador pode influenciar o custo da secagem, visto que quando maior a umidade, maior será o tempo e o esforço do secador. Quanto maior a umidade, maior será o esforço do conjunto para a secagem, portanto maior o custo. Segundo Parti et al. (1990), para obter a avaliação econômica de um sistema de secagem, deve-se considerar a quantidade de água a ser retirada do produto, a temperatura de operação, o tempo de secagem, o desempenho do secador e o consumo específico de energia (CEE).

O consumo específico de energia (CEE) de um sistema de secagem pode ser obtido através da equação:

$$CEE = \frac{\text{Consumo de energia}}{\text{Água evaporada}} \quad (2.9)$$

O resultado do cálculo do consumo específico de energia é um dos principais indicadores de rendimento de um sistema de secagem. Para uma avaliação econômica simplificada destes sistemas na produção de banana passa pode ser usado o cálculo do consumo específico de energia multiplicando pelo valor do kWh, cobrado na região.

O valor do consumo energético do secador elétrico pode ser determinado considerando o tempo total de operação, calculado, ou medido, para um período de uma hora e em seguida multiplicado pelo tempo total da secagem em horas.

2.5.3 Secagem mista (solar - elétrico)

A secagem mista é um sistema de secagem muito comum, através da utilização combinada da secagem solar com outros tipos de secagem, com o objetivo de proporcionar uma maior uniformidade na secagem para obtenção da banana passa como também, redução do tempo de secagem e economia de energia elétrica. Segundo Isquierdo (2011), na secagem mista, geralmente se faz uma pré-secagem solar e posteriormente uma secagem elétrica. Desta forma, permite-se a redução dos gastos com energia elétrica em relação ao sistema totalmente elétrico.

2.5.3.1 Secadores híbridos

Dois dos problemas característicos referentes à aplicação da energia solar como uma energia alternativa às fontes convencionais são a sua intermitência e baixa densidade. Estes fatores tornam difícil a obtenção de um sistema de secagem confiável, ou seja, capaz de operar a temperaturas razoavelmente constantes. Uma maneira de atenuar estes problemas é a utilização de secadores solares híbridos, nos quais se utiliza outra fonte energética para suplementar a energia solar.

Neste tipo de secador, além da energia solar, como fonte de energia para secagem do produto, outras fontes energéticas são empregadas tais como: energia elétrica, biomassa, GLP, geotérmica, fotovoltaica.

O secador solar híbrido dispõe sempre de uma unidade auxiliar, que pode ser uma unidade de armazenamento térmico, um sistema de bomba de calor ou um sistema de aquecimento.

Na Figura 2.8 pode ser visto o secador construído por Basílio et al. (2016). Este secador é do tipo solar-elétrico, foi construído de material de baixo custo, sendo constituído por um coletor solar e uma câmara de secagem.

Figura 2.8. Secador híbrido solar-elétrico com controle de temperatura do ar de secagem.



O coletor solar é feito de chapa galvanizada, com parte interna na cor preta, o isolamento térmico de lã de vidro e apresenta cobertura de vidro. A câmara de secagem também é feita de chapa galvanizada isolada com lã de vidro e possui telhado de zinco.

No coletor, o ar de entrada sofre uma elevação da temperatura, que pode variar de 5°C a 40 °C. Na câmara de secagem fica instalado o sistema de aquecimento auxiliar, o mesmo é composto por um banco de resistências elétricas, que quando acionadas fazem a complementação do aquecimento do ar de secagem. O controle da temperatura é feito por meio de um termostato, que tem por finalidade controlar o acionamento do banco de resistências, mantendo a temperatura do interior da câmara de secagem dentro dos valores pré-definidos pelo processo.

Na Figura 2.9 pode ser visto o secador híbrido do tipo solar-gás desenvolvido na UFCG. Este secador é constituído por um coletor solar, uma câmara de secagem e um sistema de aquecimento por meio da combustão do gás GLP.

Figura 2.9. Secador híbrido solar-gás com sistema de aquecimento auxiliar do ar de secagem.



O secador foi construído de material de baixo custo, a câmara e o coletor foram construídos de madeirite de 10mm, sendo que o coletor possui cobertura de policarbonato. Na câmara de secagem fica instalado o sistema auxiliar de aquecimento, constituído de uma chapa metálica de alumínio que recobre o fundo da câmara de secagem, que é aquecida pela queima do GLP e um queimador com dois bicos instalados no interior da câmara abaixo da chapa de alumínio. A ignição do sistema auxiliar é feita de forma automática de acordo com os valores de temperatura pré-definidas pelo processo.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo a metodologia utilizada e a descrição dos materiais empregados foram apresentados separadamente utilizando-se a sequência:

- O produto a ser seco (banana);
- O equipamento (um sistema de secagem elétrico e um sistema de secagem solar constituído por um coletor solar e uma câmara de secagem)
- A fonte de energia utilizada (energia elétrica, energia solar térmica e solar fotovoltaica);
- O processo de secagem da banana.

Os estudos foram realizados no Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas (LEMT) e no Laboratório de Secagem da UAEM/CCT/UFCG do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) em Campina Grande, PB. Na Figura 3.1 observa-se um *solarium*, no pavimento superior do LEMT, que foi usado para testes dos equipamentos solares.

Figura 3.1. Instalações do LEMT e detalhe do *solarium* da UFCG.



Neste trabalho foram apresentados os resultados dos testes experimentais das secagens realizadas pelos processos solar, elétrico e misto (solar seguido do elétrico), tendo como objetivo avaliar a eficiência de cada processo. Dentre os resultados obtidos, foram escolhidos seis experimentos, nomeados como: Experimento secagem elétrica (EXP1), Experimento secagem mista (EXP2), Experimento secagem solar com controle (EXP3 e EXP5), Experimento secagem solar sem controle (EXP4) e Experimento de secagem elétrica (EXP6), que foram realizados nos dias a seguir.

- EXP1/Elétrico a 45°C dia 24 e 25 de março de 2016, outono de 2016;
- EXP2/Misto a 45°C dia 30 de junho de 2016, inverno de 2016;
- EXP3/Solar Com Controle dias 15 e 16 de junho de 2016, outono de 2016;
- EXP4/Solar Sem Controle dias 07 e 08 de julho de 2016, inverno de 2016;
- EXP5/Solar Com Controle dias 03 e 04 de outubro de 2016, primavera de 2016.
- EXP6/Elétrico a 55°C dia 17 de janeiro de 2017, verão de 2017.

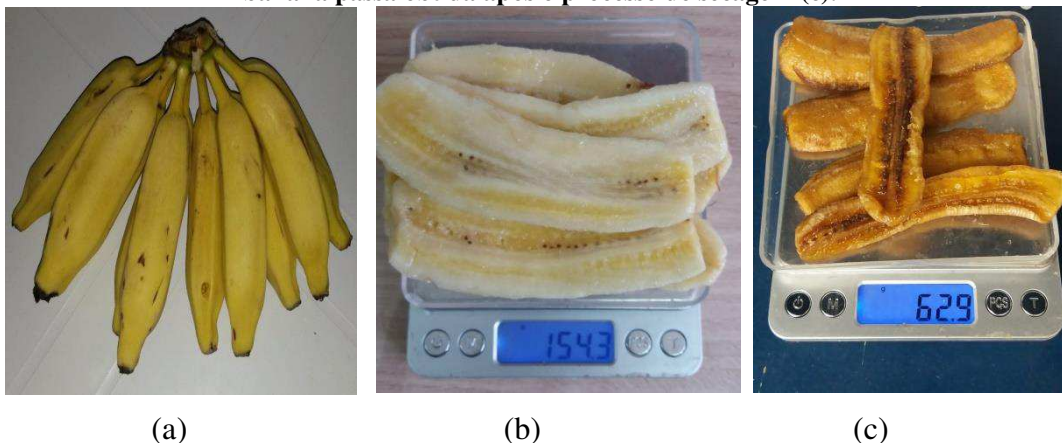
3.2 O produto utilizado nos experimentos

O produto utilizado nos experimentos foi a banana tipo prata (*Musa spp.*). Esta variedade foi selecionada para o experimento por ter uma grande aceitação na região.

Os experimentos foram realizados com as bananas em grau elevado de maturação, apresentando aspectos de textura, sabor e coloração ideais para o consumo humano; as mesmas apresentaram um teor de umidade inicial em torno de 70% em base úmida.

O procedimento para preparação da banana passa, seguiu o cronograma apresentado na Figura 3.4. Inicialmente foi feita a seleção seguindo os critérios de maturação, textura, coloração e aparência da casca, lavagem, descasque e corte. Neste trabalho as bananas foram cortadas longitudinalmente. Na Figura 3.2 são apresentadas algumas bananas antes do experimento e banana passa obtida após o procedimento de secagem.

Figura 3.2. Banana prata *in natura* com casca(a), banana prata *in natura* cortada longitudinalmente (b) banana passa obtida após o processo de secagem (c).



Para determinar a massa seca da banana foi utilizada a estufa da UAEM/UFCG com circulação mecânica, fabricada pela FANEM modelo 320E, com controlador digital de temperatura como pode ser vista na Figura 3.3. Os valores de massa seca obtidos em cada experimento estão apresentados nas Tabelas do Capítulo 4.

Figura 3.3. Estufa de secagem com circulação de ar forçada, mod. 320E.



3.3 Descrição dos sistemas de secagem solar

Para descrever os materiais e a metodologia utilizada no desenvolvimento da pesquisa, foi adotado um procedimento de descrição individual para cada sistema de secagem utilizado neste trabalho. No sistema de secagem solar serão relatadas separadamente as características do coletor solar, da câmara de secagem, do sistema de aquisição de dados e dos parâmetros construtivos do secador. No sistema de secagem elétrica foi feito uma descrição dos principais sistemas que compõem o secador elétrico utilizado na pesquisa.

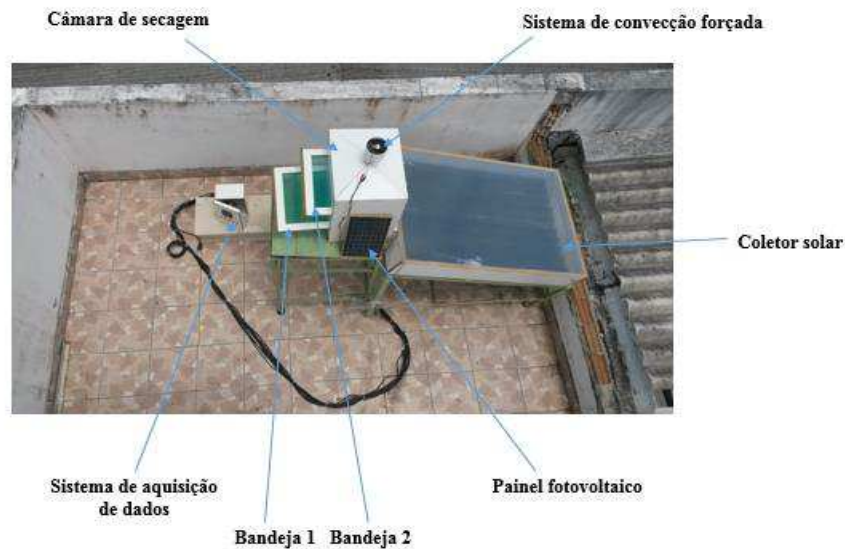
Nas Figuras 3.4 e 3.5 são mostradas duas fotos do sistema de secagem solar utilizado no trabalho, que possibilita uma visão geral do conjunto do secador solar e de suas partes individualmente.

Figura 3.4. Secador solar de irradiação indireta.



Fonte: Nunes (2016)

Figura 3.5. Vista superior do secador solar de irradiação indireta com indicação de seus componentes.



Fonte: Nunes (2016)

3.3.1 Coletor solar

O coletor solar de um sistema de secagem de exposição indireta tem por função aquecer o ar de secagem, e também manter a temperatura no interior do coletor elevada, sem

grandes oscilações, mantendo a temperatura o mais estável possível, disponibilizando e entregando à câmara de secagem um ar de secagem com volume e qualidade térmica capaz de promover o processo de secagem da banana.

Na Figura 3.6, mostra o coletor solar com e sem cobertura e a câmara de secagem em teste no *solarium* do LEMT/UFCG. Nesta mesma figura pode ser vista uma telha de fibrocimento pintado de preto fosco, que tem a função de um capacitor térmico no coletor solar. A introdução deste capacitor permitiu um melhor desempenho do secador. Esta inovação foi incorporada no coletor solar na pesquisa realizada por Nunes (2016).

Figura 3.6. Fotos do sistema de secagem solar utilizado neste trabalho instalado no LEMT/UFCG.



Fonte: Nunes (2016)

3.3.2 Materiais utilizados no sistema de secagem do secador solar

Os materiais empregados na construção do secador solar foram:

- **Base 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 em toda a estrutura do secador solar, MDF Ultra apresenta dupla proteção contra umidade e cupins, o que lhe garante um prolongamento de vida útil, principalmente quando o equipamento está exposto às ações de intempéries;

- **Cobertura de policarbonato alveolar:** material elaborado à base de resina, que oferece transmissividade elevada à radiação solar incidente e 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 facilitador da visualização do processo de secagem; o uso do policarbonato é uma inovação dos secadores desenvolvidos na UFCG;
- **Velcro:** dispositivo de fixação composto por duas tiras de tecido composta de ganchos e loops. Empregado para conectar o policarbonato ao MDF, bem como, na fixação de MDF com MDF. O velcro permite o desmonte de alguns componentes removíveis, o que facilita a locomoção e limpeza do equipamento de forma simples;
- **Tela de nylon:** material de fibra têxtil sintética que apresenta ótima resistência ao desgaste e à tração. Usada nas bandejas 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, entre dois 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 coletor 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 e melhora o efeito estufa.

Além desses, ainda foram utilizados na construção do equipamento de secagem alguns componentes eletrônicos, que viabilizaram o sistema de exaustão do ar de secagem, tais como:

- **Coolers:** ventoinha, equipamento largamente empregado no sistema de resfriamento por exaustão de equipamentos elétrico-eletrônicos como gabinetes de computadores, fontes de tensão, inversores de frequência, entre outros. No sistema de secagem o *cooler* foi utilizado como exaustor criando uma pressão negativa provocando assim uma circulação do ar aquecido para o interior da câmara de secagem proveniente do

coletor solar. Seu acionamento ocorre através do uso da energia solar fotovoltaica, o uso da estratégia de controle da convecção do ar de secagem por intermédio do acionamento do cooler, consiste em inibir o fluxo de ar no interior da câmara de secagem quando a temperatura está abaixo das condições consideradas adequadas ao processo;

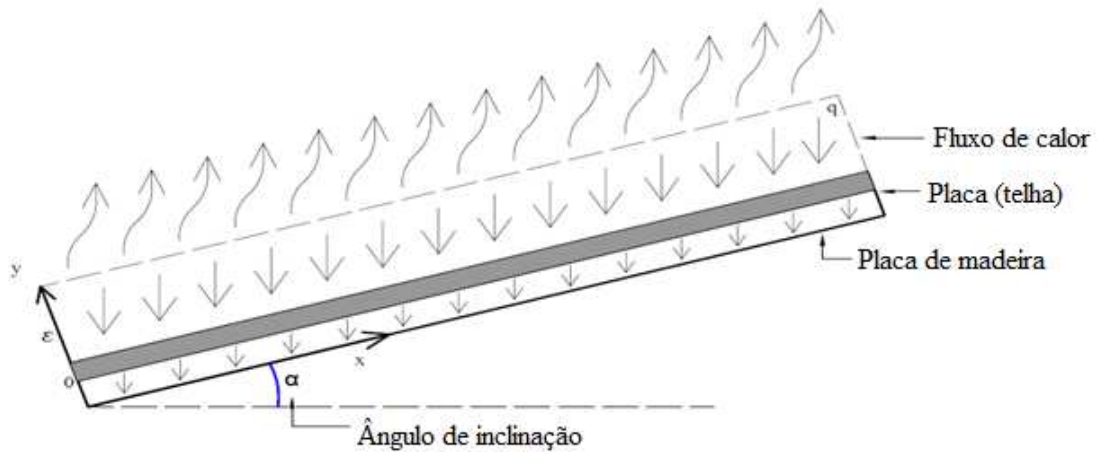
- **Mini painel solar fotovoltaico:** módulo de conversão direta da energia solar em energia elétrica através de células fotovoltaicas, utilizado para fornecimento de eletricidade aos *cooler*. Neste caso o sistema fotovoltaico utilizado não tem bateria/acumulador, ou seja, seu funcionamento é contínuo em tempo real;

- **Termopares tipo K:** sensores de temperatura simples, robustos e de baixo custo, amplamente utilizados nos mais variados processos de medição de temperatura. Seu princípio de funcionamento consiste da junção de duas ligas de metais unidas em uma de suas extremidades chamada de junta quente e outra extremidade denominada junta fria. A junta quente fica em contato com a superfície ou ambiente em que se deseja medir a temperatura, na outra junção se tem o sinal correspondente à temperatura em forma de tensão da ordem de mV, ou seja, 10^{-3} V, que é diretamente proporcional à temperatura.

Além desses materiais utilizados, o sistema de secagem solar tem as seguintes características: possui uma câmara de secagem, duas bandejas de secagem onde são posicionadas as bananas, base de apoio e uma chaminé por onde saí o ar do interior da câmara. A área de entrada do ar de secagem no coletor solar é de 60.000 mm² (com dimensões de 600 mm por 100 mm) e a área de saída do ar de secagem de 24.000 mm² (com dimensões de 400 mm por 60 mm) acoplada à câmara de secagem.

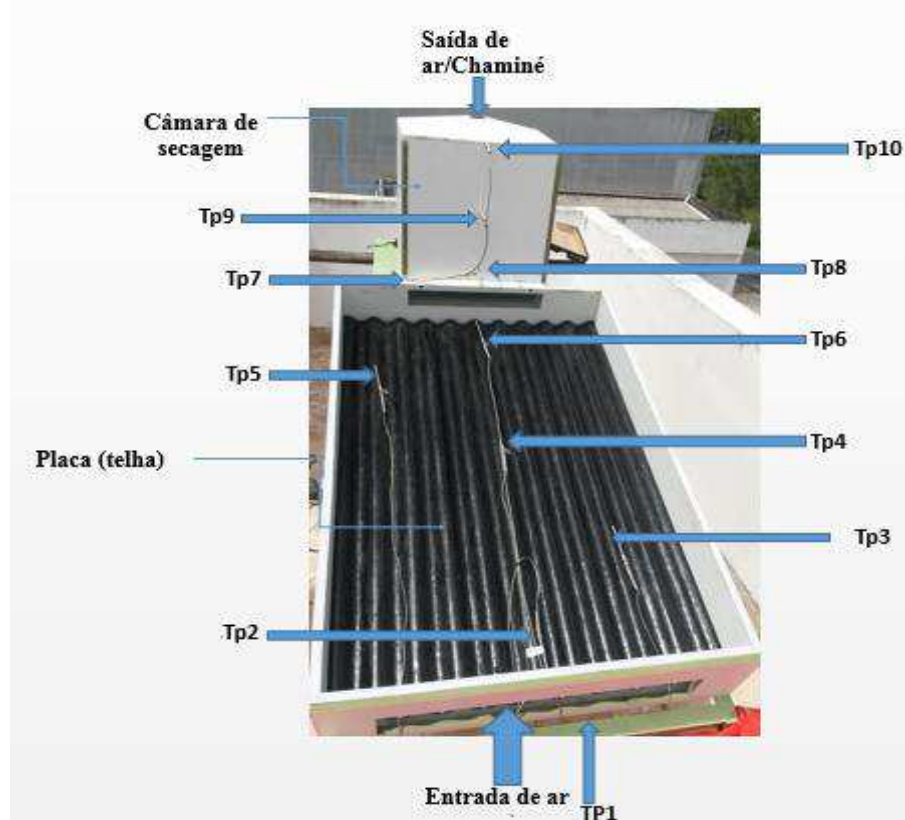
A Figura 3.7 representa o modelo físico da transferência de calor na placa absorvedora do coletor solar. A placa absorve a radiação solar que atravessa a cobertura de policarbonato, mantendo a temperatura no interior do coletor acima da temperatura ambiente e transferindo, esse calor ao ar de secagem, que escoar ao longo do seu comprimento.

Figura 3.7. Modelo físico da transferência de calor na placa absorvedora do coletor solar.



A Figura 3.8 mostra a localização dos 10 termopares distribuídos no coletor solar e na câmara de secagem. Cada termopar será representado por Tp seguido do número.

Figura 3.8. Distribuição dos sensores de temperatura no coletor solar e na câmara de secagem.



Fonte: Nunes (2016)

Onde,

Tp1 mede a temperatura do ar ambiente;

- Tp2 mede a temperatura do ar na entrada do coletor solar;
- Tp3 mede a temperatura do ar no interior do coletor solar;
- Tp4 mede a temperatura do ar no centro do coletor solar;
- Tp5 mede a temperatura do ar no interior do coletor solar;
- Tp6 mede a temperatura do ar na saída do coletor solar;
- Tp7 mede a temperatura do ar na entrada da câmara de secagem;
- Tp8 mede a temperatura do ar na bandeja 01 da câmara de secagem;
- Tp9 mede a temperatura do ar na bandeja 02 da câmara de secagem;
- Tp10 mede a temperatura do ar na saída da câmara de secagem .

A velocidade do ar de secagem foi medida na saída do *cooler* e a umidade relativa do ar de secagem foi medida na entrada do coletor solar, na junção entre o coletor e a câmara e na saída da câmara de secagem.

3.3.3 Características do coletor solar

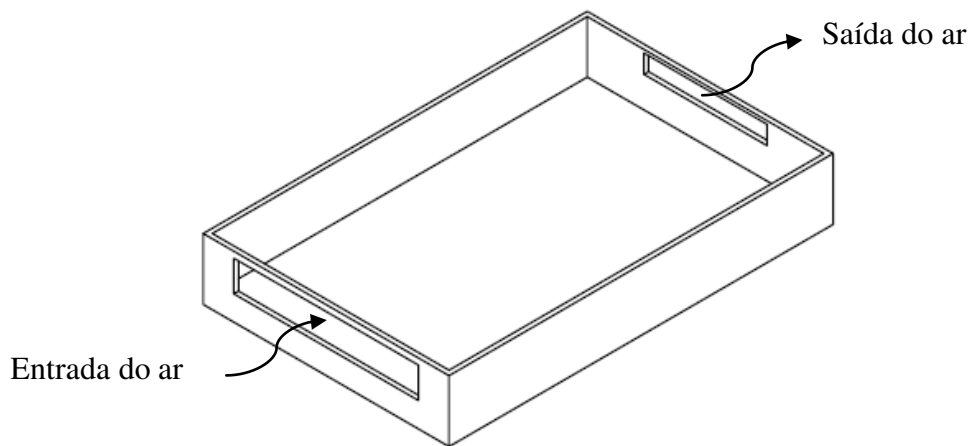
O coletor solar possui um dimensionamento que teve como parâmetro construtivo a necessidade de seu volume interno ser maior do que o volume interno da câmara de secagem (aproximadamente 3 vezes maior). Este parâmetro é vital para a garantia de um volume de ar de secagem com as propriedades termodinâmicas mais estáveis que provoque as menores variações possíveis destas propriedades na câmara de secagem. Na Tabela 3.1 são apresentadas as dimensões construtivas do coletor solar:

Tabela 3.1. Principais características construtivas do coletor solar.

Componente	Observação	Volume [L]	Área [m ²]
Coletor solar	Interior	176	---
Entrada do ar	Interna	---	0,06
Saída do ar	Interna	---	0,024
Superfície transparente	---	---	1

Na Figura 3.9 é mostrado um desenho esquemático do projeto do coletor solar desenvolvido com suas devidas características.

Figura 3.9. Desenho esquemático do coletor solar desenvolvido.



3.3.4 Características da câmara de secagem

A câmara de secagem do sistema é uma das partes mais importantes no conjunto do secador solar de irradiação indireta. O Projeto e o dimensionamento desta parte do secador seguiram critérios construtivos que possibilitou uma maior estabilidade da temperatura em seu interior, uma vez que a fonte de energia utilizada é fortemente variável ao longo do dia e ao longo do ano. Em função desta variação da fonte de energia, a câmara de secagem com uma estratégia de controle associada deve manter os valores de temperatura os mais estáveis possível, com pequenas variações no interior da câmara ao longo do processo.

O desenvolvimento de uma estratégia para controlar e manter as propriedades termodinâmicas do ar de secagem no interior da câmara de secagem, com valores adequados ao processo de secagem é imprescindível para o bom desempenho de um secador solar que tem uma fonte de energia intermitente que oscila durante o processo de secagem. Para tanto, foi fundamental o conhecimento de outras áreas da engenharia no desenvolvimento desta pesquisa.

A Figura 3.10, mostra uma foto da câmara de secagem, indicando a posição das bandejas 1 e 2 e do mini painel fotovoltaicos.

Figura 3.10. Câmara de secagem em funcionamento no solarium.



Fonte: Nunes (2016)

3.3.5 Dados construtivos e materiais utilizados na câmara de secagem

Os materiais empregados na construção da câmara de secagem foram os seguintes (NUNES, 2016): A câmara de secagem é composta por uma cabine que mede 430 mm x 335 mm na base, altura de 500 mm na parte de trás e de 500 mm na frente mais uma pirâmide de 430 mm x 335 mm de base e altura de 40 mm, além de um *cooler* (micro ventilador, tem a função de exaustor em muitas aplicações). No sistema de secagem o *cooler* foi utilizado para forçar a circulação de ar no interior da câmara de secagem por meio da exaustão, seu acionamento ocorre por meio da energia solar fotovoltaica fornecida através de um mini painel solar fotovoltaico de 12 volts e 6 watts. O sistema de exaustão fica posicionado na chaminé da câmara.

No interior da câmara são dispostas duas bandejas numeradas de 1 e 2 (Figura 3.11), na ordem da mais baixa a mais alta onde são colocados os materiais a serem desidratados, além dos sensores de temperatura e umidade relativa, usados para coletar as informações das propriedades termodinâmicas no interior da câmara de secagem.

3.3.6 Dimensionamento da câmara de secagem

Na elaboração do projeto, o dimensionamento da câmara de secagem solar levou em consideração a necessidade de seu volume interno ser menor do que o volume interno do coletor solar. Isto é importante para garantir que as características termodinâmicas do ar de

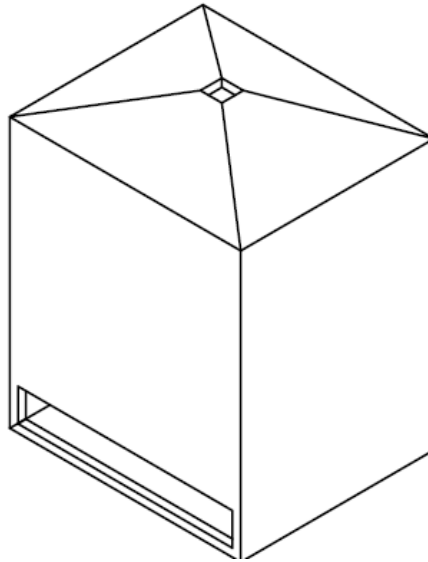
secagem sejam adequadas ao processo de retirada da água das frutas, promovendo a sua desidratação nos níveis desejados. Para isto, as dimensões características da câmara de secagem são mostradas na Tabela 3.2:

Tabela 3.2. Principais características construtivas da câmara de secagem.

Componente	Observação	Volume [L]	Área [m ²]
Câmara de secagem	Interior	67	---
Entrada do ar vindo do coletor	Interna	---	0,024
Saída do ar quente	Interna	---	0,016

A Figura 3.11 mostra um desenho esquemático da câmara de secagem desenvolvida. No Apêndice II, estão os desenhos com as dimensões reais e os cortes necessários a visualização da câmara.

Figura 3.11. Desenho esquemático da câmara de secagem desenvolvida.



A chaminé consiste num dispositivo de exaustão onde é promovida a retirada forçada do ar de secagem, por meio de um *cooler* *MUHUA FAN-TECH* de 12 volts e 0,23 ampères do tipo usado em computador, acionado por um painel fotovoltaico, mostrado na Figura 3.12.

Figura 3.12. Cooler e o mini painel fotovoltaico.



3.3.7 Utilização do sistema de medição de temperatura de processo e ambiente

A medição da temperatura do ar de secagem é fundamental para observar sua variação ao longo do dia e se ter um mapeamento térmico do secador solar no decorrer do experimento, possibilitando desenvolver um controle das propriedades termodinâmicas para as condições ótimas do processo de secagem. Para isto é necessário medi-la em vários pontos do sistema de secagem, como por exemplo: na entrada, no interior e na saída do coletor solar. No interior da câmara de secagem e no meio ambiente.

Para realizar estas medições e permitir um controle da variável ar de secagem foi utilizado um sistema de medição de temperatura e de umidade relativa do ar, desenvolvido especificamente para este sistema de secagem e que é parte dos objetivos desta Tese. O sistema auxiliar de medição de temperatura é constituído por dez (10) termopares do tipo K e um painel de observação e registro das medições efetuadas, mostrado na Figura 3.13.

Figura 3.13. Sistema de medição de temperatura do ar.



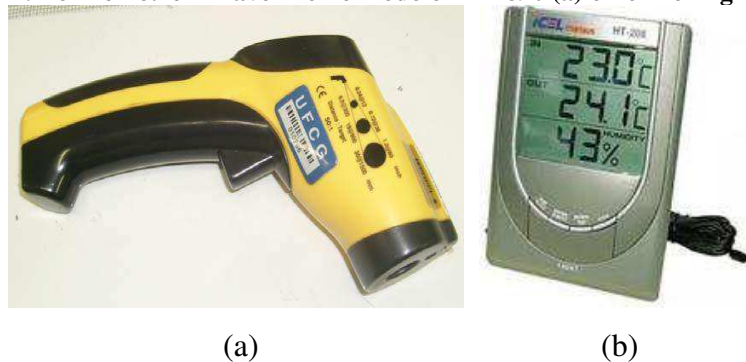
Fonte: Nunes (2016)

Segundo Nunes (2016), este sistema de medição de temperatura foi concebido inicialmente no projeto do secador solar, com o objetivo de fazer o mapeamento da temperatura em diversos pontos do secador solar para fins de verificação do comportamento térmico do mesmo ao longo do dia.

Para aferição da temperatura nos experimentos eventualmente foi realizado medições das temperaturas no produto ou em partes do secador utilizando o termômetro infravermelho, como o apresentado na Figura 3.14 (a) ou com uso de um multímetro digital, modelo ET 1400 – Minipa, onde é possível efetuar a leitura do sinal de tensão do termopar em sua junta fria e fazer uma correlação com a tabela do sensor para fins de aferição da temperatura registrada pelo indicador de temperatura digital.

A aferição da medição da umidade do ar de secagem na entrada do secador foi realizada com uso de um termo-higrômetro, como o mostrado na Figura 3.14 (b), um Termo-higrômetro de fabricação da ICEL. Modelo HT 208. Os dados da temperatura ambiente local foram fornecidos pelo termo-higrômetro (Figura 3.14b) e os dados da temperatura ambiente atmosférica foram fornecidos pela estação meteorológica instalada no LEIAM/CEEI/ UFCG apresentada na Figura 3.35. Os dados fornecidos pelos dois instrumentos foram compatíveis.

Figura 3.14. Termômetro infravermelho modelo TI – 890 (a) e Termo Higrômetro (b).



3.3.8 Desenvolvimento do sistema de medição e controle de temperatura e umidade.

Um dos objetivos desta pesquisa foi implementar uma estratégia de controle para o sistema de secagem solar, que permita o controle das propriedades do ar de secagem e que mantenha um maior equilíbrio da temperatura de operação dentro da câmara de secagem na faixa de 40°C a 60°C, ao longo do período de secagem e no decorrer de todas as estações do

ano (primavera, verão, outono, inverno). Para tanto é imprescindível avaliar os tipos de controles existentes que melhor respondam às necessidades do processo.

3.3.8.1 Controle automático

O controle automático é estudado desde o século XVIII, quando James Watt construiu um controlador centrífugo para o controle de velocidade de uma máquina a vapor. Desde então, as teorias de controle evoluíram e hoje representam grande importância no avanço das engenharias e da ciência. As aplicações dessas teorias são vitais, nos dias de hoje, para o funcionamento de sistemas de pilotagem de aviões, veículos espaciais, para processos industriais e outros processos presente no dia a dia (OGATA, 1985).

As principais vantagens da aplicação do controle automático dos processos são: qualidade e quantidade dos produtos durante os mesmos. A adição do controle possibilita resultados como produtos fabricados com segurança, subprodutos menos nocivos, e economia na produção. O controle automático possibilita o uso de processos complexos, que apenas com o controle manual, provavelmente seriam impossíveis de existirem (RIBEIRO, 2001).

De acordo com Ogata (1985), um sistema de controle de um processo é um sistema regulador automático que tem como saída uma variável do processo. Segundo Lourenço (1997), a seleção de qual tipo de ação de controle deve-se usar depende das condições de operação do sistema em questão e de especificações de desempenho, tais como o erro em regime permanente aceitável, sobressinal máximo e tempo de estabilização desejado. Idealmente o controlador mais indicado é o controlador mais simples que satisfaça essas condições.

Existem várias formas de implantar ações de controle. A forma mais simples de controle é a malha aberta com controle manual. Um operador aplica energia no processo por meio de um atuador. O ajuste de calibração do atuador determina, com precisão, quanta energia é aplicada. O processo usa esta energia para produzir sua saída. Mudando o ajuste do atuador, se altera a energia no sistema e a saída resultante do processo (RIBEIRO, 2001).

Segundo Ogata (1985) um sistema de controle em malha aberta utiliza um controlador inserido no processo a ser controlado. Nessa configuração a entrada do processo deve ser

projetada para que sua saída se comporte como desejado. Sua característica predominante é que a ação de controle não depende da saída do processo.

Controle realimentado é a aquele que tende a manter uma relação prescrita entre a saída e a entrada de referência comparando-as e utilizando a diferença como meio de controle (OGATA, 1985).

3.3.8.2 Ações de controle

Os controladores automáticos podem ser classificados de acordo a ação de controle que exercem sobre os processos. Segundo Ogata (1985) essa ação pode ser do tipo:

- Liga-Desliga;
- Proporcional;
- Integral;
- Proporcional mais integral;
- Proporcional mais derivativo;
- Proporcional mais integral mais derivativo.

Dentre os tipos de ação de controle automático o mais simples é o de duas posições, conhecido como controle liga-desliga. Nesse tipo de ação o atuador pode assumir as posições de 0 ou 100%. É um modo descontínuo, muito utilizado para controle de sistemas simples com dinâmicas lentas, como o controle de temperatura (FACCIN, 2004). Apesar de não poder ser representado por uma equação analítica, estabelecendo-se o erro como a diferença entre a saída e o *setpoint* do processo, pode-se representá-la por:

$$u(t) = 100, \text{ se } (\text{erro}) > 0 \quad (3.1)$$

$$u(t) = 0, \text{ se } (\text{erro}) < 0 \quad (3.2)$$

Já na ação proporcional a relação entre a sua saída e o sinal de erro, é dada por:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (3.3)$$

Onde K_p é denominado sensibilidade proporcional ou ganho. Independente da forma de uso, o controlador proporcional é essencialmente um amplificador com ganho ajustável. Uma característica importante desta ação de controle é a existência de um erro residual permanente. Esse erro depende de K_p e da carga, podendo ser minimizado por um aumento do valor de K_p . Em contrapartida aumentando o valor deste parâmetro aumenta o tempo de estabilização do controle, podendo conduzir eventualmente, até à instabilidade do sistema (LOURENÇO, 1997).

De acordo com Faccin (2004) na ação de controle integral é gerada uma ação proporcional à integral do erro no tempo, como descrito na equação 3.4. O grande benefício da sua utilização é a eliminação do erro em regime permanente.

$$u(t) = T_i \cdot \int_0^t e(t) dt + u_0 \quad (3.4)$$

Já a ação de controle derivativa é proporcional à taxa de variação do erro. Ela é representada pela derivada do erro no tempo, descrita na equação 3.5, e estima a tendência do aumento ou diminuição deste. Sua principal característica é aumentar a velocidade de correção do processo.

$$u(t) = T_D \frac{d}{dt} [e(t)] + u_0 \quad (3.5)$$

A combinação entre estes três modos básico de controle produz um dos mais eficientes algoritmos de controle já desenvolvidos, o controlador PID. Isso proporciona simplicidade e atende às necessidades de controle da grande maioria dos processos. Esta ação combinada de métodos de controle possui as vantagens individuais de cada uma das três ações de controle individuais (OGATA, 1985).

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + T_D \frac{d}{dt} [e(t)] - T_i \cdot \int_0^t e(t) dt + u_0 \quad (3.6)$$

Neste tipo de controlador, o modo integral é usado para eliminar o erro estacionário causado por grandes variações de carga. O modo derivativo, com o seu efeito estabilizador, permite um aumento do ganho e reduz a tendência para as oscilações, o que conduz a uma resposta mais rápida (LOURENÇO, 1997).

O tipo de controle adotado neste trabalho foi o de duas posições, conhecido como controle liga-desliga. Nesse tipo de ação o atuador assume as posições de 0 ou 100% de acordo com a necessidade do processo. A escolha deste tipo de controle se deu principalmente pela característica lenta da dinâmica do processo.

3.3.8.3 Plataforma e ambiente desenvolvedor de programação

A plataforma utilizada para a implementação do sistema de controle e aquisição de dados foi a do Arduino, por ser uma plataforma eletrônica de código aberto baseado em hardware e software de fácil utilização e possui baixo custo. A linguagem utilizada na programação foi o C++. Neste trabalho o sistema de aquisição fez a coleta dos dados de temperatura e umidade relativa do ar de secagem, e, o sistema de controle foi projetado para controlar a temperatura da câmara de secagem, por meio do controle da convecção do ar de secagem. A plataforma é composta de duas partes: o hardware, que é a placa de circuito contendo o microcontrolador, e o software que é o ambiente de programação.

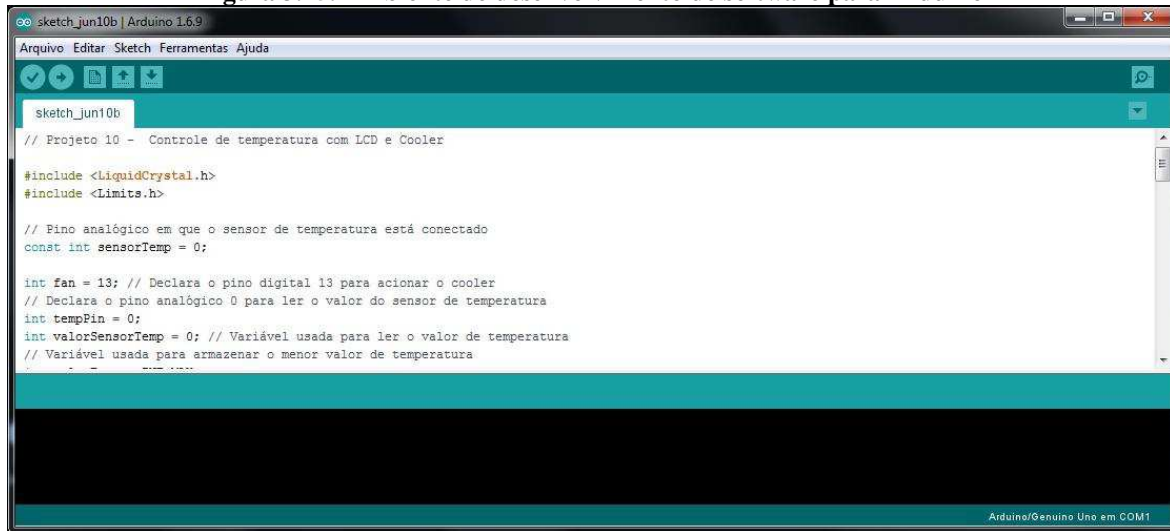
Um microcontrolador, também denominado MCU (Multipoint Control Unit) é um computador on-chip, que contém processador, memória e periféricos de entrada/saída. É um computador que pode ser programado para funções específicas, em contraste com outros microprocessadores de propósito geral (como os utilizados nos computadores). Eles são embarcados no interior de algum outro dispositivo, no caso do Arduino, para que possam controlar suas funções ou ações.

Pela própria definição de computador como um dispositivo capaz de receber um sinal de entrada, processar e gerar um sinal de saída, um microcontrolador é um dispositivo que, associado a determinado tipo de sensor consegue interpretar uma grandeza física, processá-la e acionar algum dispositivo na saída.

Um ambiente de programação, mais conhecido como IDE (*Integrated Development Environment*) é uma aplicação que engloba um editor de texto capaz de identificar a sintaxe de uma determinada linguagem de programação, um compilador que transforma o texto em linguagem de máquina (zeros e uns) e um *debugger* que é um software que auxilia o desenvolvedor a avaliar o programa que ele está escrevendo.

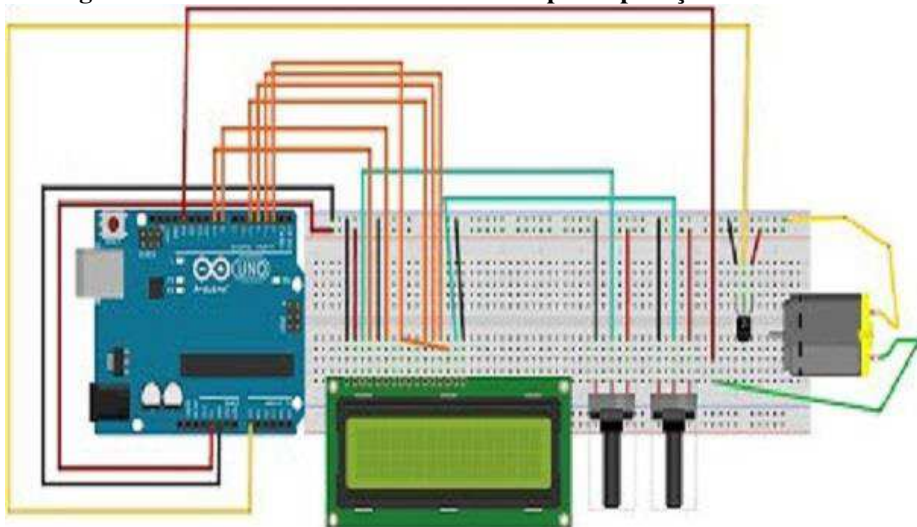
Além do hardware, a comunidade Arduino desenvolveu uma IDE para facilitar o desenvolvimento das aplicações usando uma versão própria de C/C++ e com um grande acervo de bibliotecas de funções para diversos sensores e aplicações específicas. Na Figura 3.15 pode ser visto um ambiente de desenvolvimento do software utilizado na programação do Arduino.

Figura 3.15. Ambiente de desenvolvimento de software para Arduino



Na Figura 3.16, pode ser observado um ambiente de desenvolvimento de aplicações para o Arduino. Especificamente neste caso, a aplicação em desenvolvimento é o controle de temperatura através do acionamento de um micro ventilador, utilizado neste trabalho para o controle da temperatura da câmara de secagem.

Figura 3.16. Ambiente de desenvolvimento para aplicações com Arduino

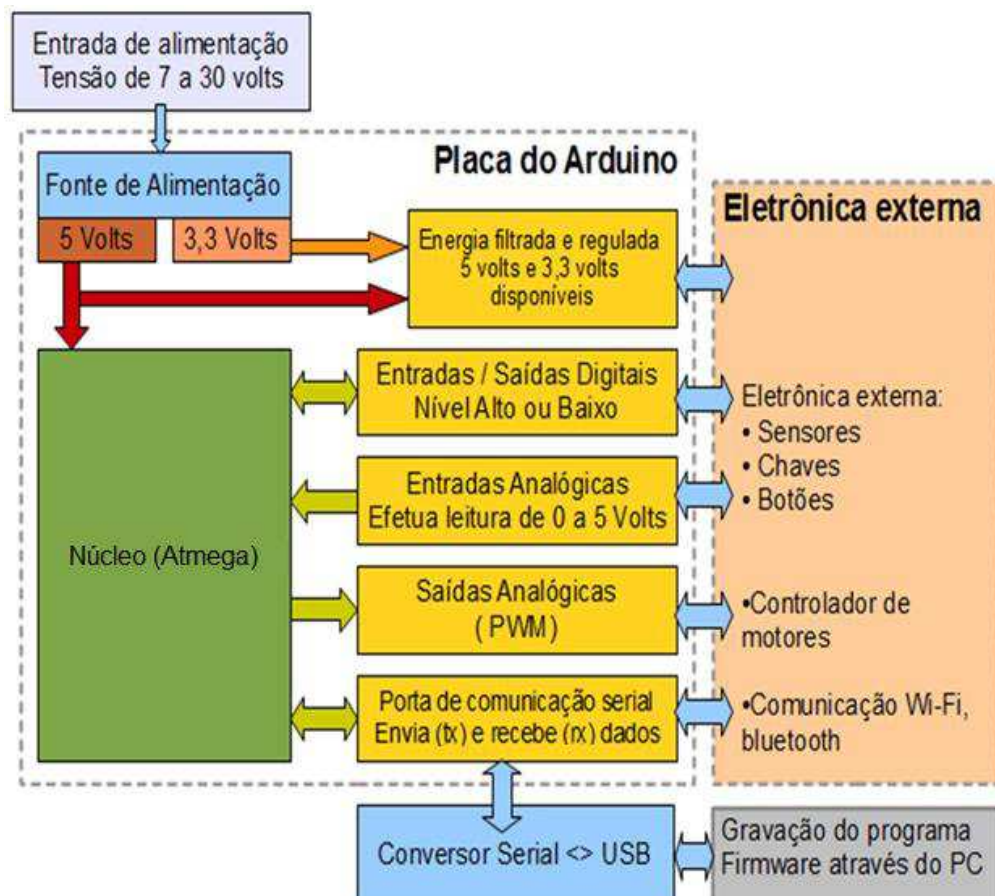


Existem diversas versões do Arduino para múltiplas aplicações. No caso proposto foi empregada a versão do Arduino UNO (arduino de uma única placa), que é uma das versões mais populares da plataforma e é dotada de um ATmega328 como processador.

Na placa existem 14 pinos de E/S digitais (6 destas capazes de funcionar como PWM (*Pulse Width Modulation*)), 6 pinos de E/S analógicas, um oscilador de 16 MHz, 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 e boa parte dos sensores que podem ser conectados às portas.

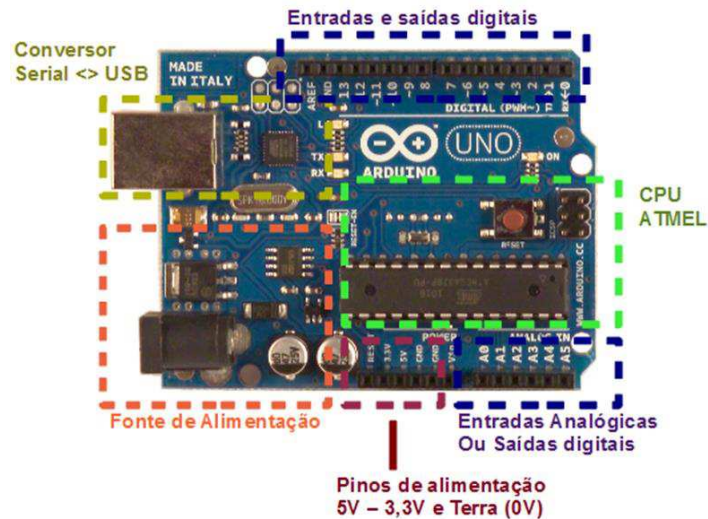
Ao contrário de outras plataformas, o Arduino pode ser programado diretamente pela interface USB. Em outros dispositivos é necessária a utilização de um programador conectado a interface JTAG (*Joint Test Access Group*). A Figura 3.17 apresenta a forma esquematizada de alguns blocos na placa. Em seguida são apresentadas características de cada um desses blocos e algumas de suas características individuais mais relevantes.

Figura 3.17. Esquema da placa em forma de blocos.



A Figura 3.18 mostra uma foto com a localização de alguns dos blocos na placa

Figura 3.18. Foto da placa do Arduino UNO



a) Fonte de alimentação: Como o próprio nome sugere, essa parte da placa de prototipagem é responsável por receber tensões de alimentação entre 5 V e 12 V e através de dispositivos reguladores de tensão, prover as tensões de entrada para a alimentação dos dispositivos da placa.

b) CPU (Unidade Central de Processamento): Parte responsável pelo processamento das entradas e geração das saídas do circuito. É o controlador propriamente dito, possuindo as partes componentes de um computador. A especificação dos controladores varia de acordo com a versão da placa. No Arduino UNO, a CPU funciona a 16 MHz com 2 kB de memória RAM (Memória de Acesso Randômico) e 32 kB de memória flash (memória secundária).

c) Entradas e saídas: De acordo com o bloco apresentado, o Arduino UNO apresenta dezenove pinos de entrada e saída de dados. Todos podem ser configurados como entrada e saída de acordo com a vontade do desenvolvedor. Os pinos nomeados de A0 a A5 são pinos de entrada analógica/saída digital, ou seja, são pinos capazes de ler valores de tensão entre 0-5 V. Como uma saída digital é um valor entre 0 V e 5 V, essas entradas também podem ser usadas como entrada/saída digital.

Os pinos de 0 a 13 são pinos de E/S digitais que assim como os pinos analógicos podem ser configurados tanto para leitura como para escrita digitais. Vale lembrar que os

pinos 0 e 1 são usados para comunicação serial e que, caso esteja usando esse recurso, as portas não estarão disponíveis.

Para este trabalho, optou-se por um periférico de armazenamento dos dados tipo cartão de memória micro SD (*Secure Digital*). Esta tecnologia foi escolhida para permitir que a aquisição dos dados de secagem, principalmente a temperatura e a umidade relativa do ar fosse contínua e de forma autônoma.

Para os experimentos 2, 3, 4 e 5, a programação foi para leitura e amostragem dos dados a cada minuto, com os dados gravados em forma de média numa amostragem de 10 minutos. Esses intervalos de medição e registro podem ser modificados pelo programador atendendo a interesses específicos.

Na Figura 3.19 é apresentado o Arduino utilizado no experimento, conectado a sensores do tipo TH11, que mede a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem, com os respectivos displays LCD (Liquid Crystal Display) alfanumérico, mostrando os valores medidos.

Figura 3.19. Sistema de aquisição de dados (Arduino), usado para medir umidade relativa e temperatura do ar de secagem.



3.4 Secador elétrico utilizado para a secagem de frutas

O sistema de secagem elétrica empregado para a secagem de frutas é bastante utilizado na atualidade, por apresentar boa produtividade se comparado a outros sistemas de secagem. O secador elétrico empregado neste trabalho é bastante versátil por permitir o monitoramento

e controle das propriedades termodinâmicas de forma automatizada, devido ao seu sistema de supervisão e controle embarcados.

Na Figura 3.20 pode ser visto o secador elétrico utilizado nas pesquisas deste trabalho. O princípio de funcionamento deste sistema de secagem elétrica, parte da necessidade de se manter durante todo o processo de secagem o controle das propriedades termodinâmicas do ar (temperatura, umidade relativa e velocidade do ar) no processo, e monitoradas por meio de sistema supervisor que registra a cada intervalo de tempo, a variação de massa, a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem. Os controles da temperatura e da umidade são feitos através da leitura das referidas grandezas e informado aos controladores de temperatura e umidade, que de acordo com os valores pré-definidos passa a estabelecer uma rotina de controle para todo o sistema. Este sistema é composto por subsistemas definidos como: câmara de condicionamento de ar, banco de resistências elétricas, sistema de refrigeração, compressor de ar, balança integralizada com célula de carga (integrada), sistema de aquisição e controle de dados, sistema supervisor, sistema de umidificação do ar, sistema de controle da velocidade do ar de secagem, que serão descritos a seguir.

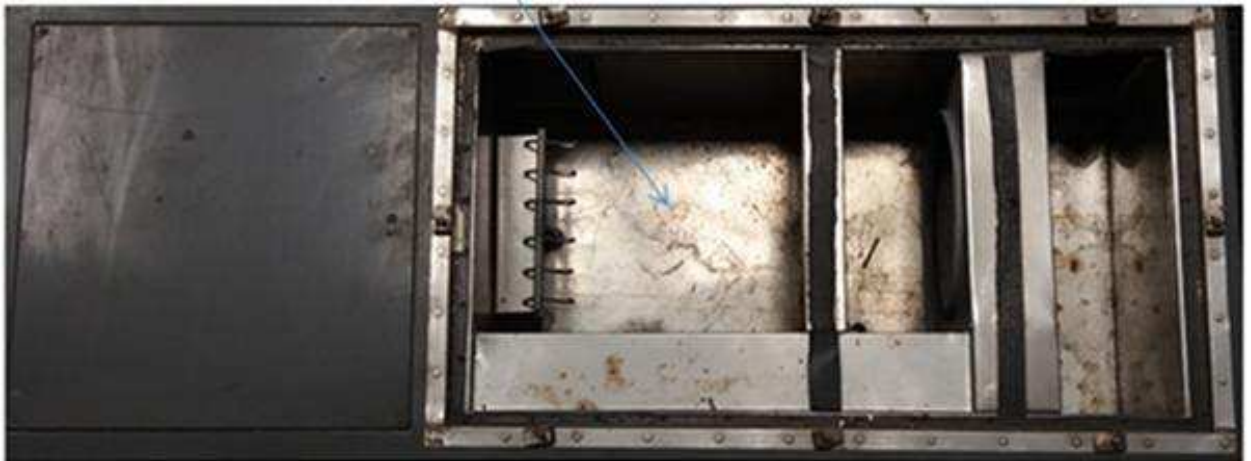
Figura 3.20 Secador elétrico com sistema de aquisição e supervisor integrado.



- **Câmara de condicionamento de ar:** na Figura 3.21 pode ser observada a câmara de condicionamento de ar. Nesta câmara é feito o controle da temperatura e da umidade

do ar de secagem de acordo com os valores definidos no início do processo de secagem.

Figura 3.21. Câmara de condicionamento de ar do secador elétrico.



- **Banco de resistências elétricas:** na Figura 3.22 pode ser visto o banco de resistências elétricas. O mesmo é composto por seis resistências de 1000 W, alimentadas com 380 V instaladas no interior da câmara de condicionamento de ar.

Figura 3.22. Banco de resistência do secador elétrico.



- **Sistema de refrigeração:** na Figura 3.23 pode ser observado o sistema de refrigeração. O mesmo é composto por uma unidade de refrigeração que tem a finalidade de compor o sistema de controle de umidade do ar.

Figura 3.23 Sistema de refrigeração do secador elétrico.



- **Compressor de ar:** na Figura 3.24 pode ser visto o compressor de ar. O mesmo é composto por cabeçote, motor elétrico e pulmão de ar. O compressor de ar tem a finalidade de fornecer ar ao sistema com a pressão controlada, auxiliando no processo de pulverização do ar de secagem com água, por meio de esguichos instalados no interior da câmara de condicionamento de ar.

Figura 3.24 Compressor de ar do secador elétrico



- **Balança integralizada com célula de carga (integrada):** na Figura 3.25 pode ser observado partes que compõem o conjunto da balança integralizada. A mesma é

utilizada para medir a variação da massa do produto no interior da câmara de secagem, e é composta por três células de carga conectadas a um conversor de sinais. A mesma é integrada ao secador executando medições de massa a cada 1(um) minuto.

Figura 3.25 Partes que compõem a balança integralizada do secador elétrico.



- **Sistema de aquisição e controle de dados:** na Figura 3.26 pode ser visto o sensor tipo transmissor que faz parte do sistema de aquisição e controle. O mesmo é constituído por um transmissor modelo RHT-DM, este transmissor é um sensor de alta precisão e estabilidade para medição de umidade relativa e temperatura. Os valores medidos são convertidos em sinais de saída 4 a 20 mA linearmente relacionados a suas leituras. Por serem equipamentos microprocessados, permitem total configuração pela utilização da interface de comunicação Tx Config. Localizado na entrada da câmara de secagem, o mesmo manda informações das variáveis para os respectivos controladores de temperatura e umidade do ar de processo, que através de valores pré-definidos estabelece uma rotina de controle necessária ao equilíbrio das propriedades termodinâmicas do ar de secagem.

Figura 3.26 Sensor de umidade e temperatura do secador elétrico.



- **Sistema supervisorio:** Na Figura 3.27 pode ser visto o sistema supervisorio, ele é uma ferramenta de grande importância para aquisição e manutenção dos dados do processo de secagem. Este sistema é composto de um software que funciona mediante a instalação de uma Hard Lock (É um dispositivo de proteção, que conectado à porta USB do computador, libera o funcionamento do supervisorio). Com o sistema supervisorio é possível acompanhar e modificar em tempo real os parâmetros do processo, temperatura e umidade, como também verificar a variação da massa do produto. Os dados são armazenados e podem ser exportados para diversos tipos de arquivos.

Figura 3.27 Sistema supervisorio do secador elétrico



- **Sistema de umidificação do ar:** na Figura 3.28 pode ser visto o sistema de umidificação do ar de secagem. O mesmo é importante no controle da umidade do ar de secagem, sendo composto de um reservatório com controle de volume de água por meio de boia, 6 (seis) esguichos instalados no interior da câmara de condicionamento

de ar. O mesmo quando necessário pulveriza com o ar comprimido o ar de secagem com água em forma de gotículas, estabelecendo assim o controle da umidade do ar de secagem do secador.

Figura 3.28 Sistema de umidificação do ar de secagem do secador elétrico



- **Sistema de controle da velocidade do ar:** na Figura 3.29 podem ser observados os componentes que fazem parte do sistema de controle da velocidade do fluxo do ar de secagem. Este sistema é composto por um motor funcionando como exaustor e é equipado com uma turbina. O mesmo fica instalado na tubulação de retroalimentação do ar de secagem, o controle da rotação é feito por um inversor de frequência capaz de controlar a velocidade de rotação do motor de zero à rotação nominal do motor, que nesta aplicação é de 1680 rpm.

Figura 3.29 Sistema de controle da velocidade do ar de secagem do secador elétrico



3.5 Avaliação energética dos sistemas de secagem e cálculo do consumo específico de energia na produção da banana passa

Avaliação econômica dos sistemas de secagem estudados neste trabalho teve como um dos objetivos calcular o consumo de energia elétrica e solar-térmica requisitadas pelos sistemas de secagem elétrico, solar e misto (solar-elétrico) no processo de produção da banana passa.

3.5.1 Cálculo do consumo de energia elétrica.

Para determinar o consumo de energia elétrica utilizada pelo sistema de secagem elétrica neste trabalho foi necessário discorrer sobre o conhecimento das peculiaridades das cargas elétricas que compõem o secador elétrico estudado, o tipo de alimentação e a potência elétrica requisitada pelo secador. Portanto, o conhecimento da natureza elétrica da carga e do fluxo de potência em corrente alternada (CA) com todos os seus aspectos integrados foram levados em consideração.

Como mencionado, a medição do consumo de energia elétrica em sistemas elétricos de corrente alternada (CA) devem levar em consideração alguns aspectos que envolvem as características do fluxo de potência requisitadas pela carga elétrica do secador estudado, que são:

Potência aparente (S), medida em volt-ampères (VA);

Fator de potência (FP) adimensional entre 0 e 1;

Potência ativa (P), medida em watts (W);

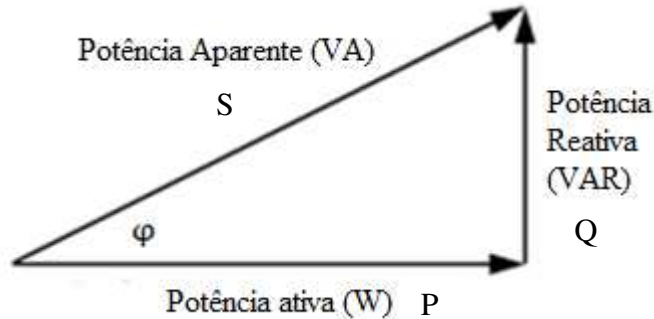
Potência reativa (Q), medida em volt-ampères reativo (VAr).

Como visto, o fluxo de potência em sistemas de corrente alternada (CA) envolve quatro aspectos importantes e determinantes para avaliação econômica de sistemas elétricos. O triângulo das potências é utilizado para mostrar graficamente, a relação entre os quatro aspectos mencionados: potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência. O fator de potência é a razão entre a potência ativa e a potência aparente. Na equação 3.7 pode ser observado a relação entre as potências elétricas mencionadas.

Onde:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (3.7)$$

Figura. 3.30. Triângulo retângulo que representa a relação entre as potências aparente (S), ativa (P) e reativa (Q).



3.5.1.1 Potência aparente

A potência ativa e a potência reativa, juntas, constituem a potência aparente, medida em kVA (quilo volt-ampère), que é a potência total gerada e transmitida à carga. Potência aparente (S) traduz a máxima capacidade de o sistema realizar trabalho numa unidade de tempo, dada pela equação 3.8.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.8)$$

3.5.1.2 Fator de potência

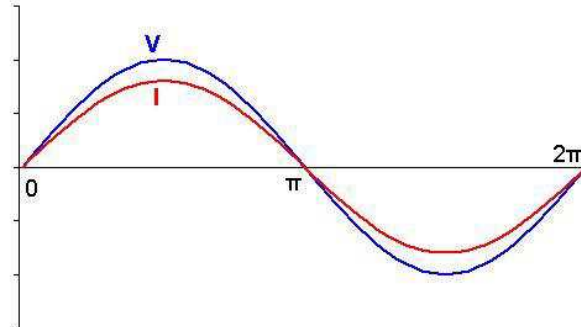
O fator de potência indica qual porcentagem da potência total fornecida (kVA) é efetivamente utilizada como potência ativa (kW). Assim, o fator de potência mostra o grau de eficiência do uso dos sistemas elétricos. Valores altos de fator de potência (próximos a 1,0) indicam uso eficiente da energia elétrica, enquanto valores baixos evidenciam seu mau aproveitamento, além de representar uma sobrecarga para todo o sistema elétrico.

Em circuitos de corrente alternada (CA) puramente resistivos, as formas de ondas de tensão e de corrente elétrica estão em fase, ou seja, mudando a sua polaridade no mesmo instante em cada ciclo. Neste tipo de carga o fator de potência é unitário, toda a energia

fornecida pela fonte é consumida pela carga, a potência ativa é igual a potência aparente, como pode ser visto na equação (3.9).

$$S = P \quad (3.9)$$

Figura 3.31. Característica resistiva da carga, a forma de ondas de tensão (V) e corrente (I) em fase (se senoidal perfeita, FP=1). Ângulo de fase $\varphi=0^\circ$



Nas Figuras 3.32 e 3.33 podem ser observado o comportamento das cargas reativas. Quando estas cargas reativas estão presentes, tais como capacitores e indutores, o armazenamento da energia nessas cargas resulta em uma diferença de fase entre as formas de ondas de tensão e corrente. Uma vez que essa energia armazenada retorna para a fonte e não produz trabalho útil, um circuito com baixo fator de potência terá correntes elétricas maiores para realizar o mesmo trabalho do que um circuito com alto fator de potência. Na equação (3.10) pode ser observado como é determinado o fator de potência da carga.

$$FP = \cos \varphi \quad (3.10)$$

Onde φ é o ângulo de fase ou defasagem entre a tensão e a corrente

Figura 3.32. Característica indutiva da carga, a forma de onda de corrente (I) atrasada em relação à onda de tensão (V). FP atrasado.

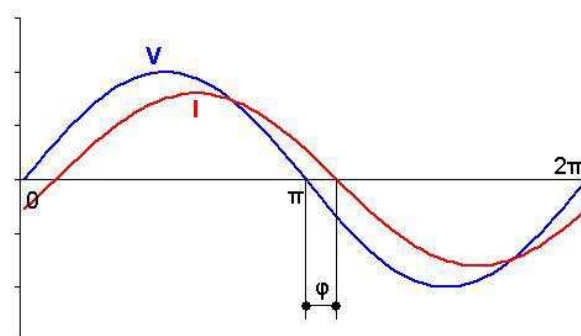
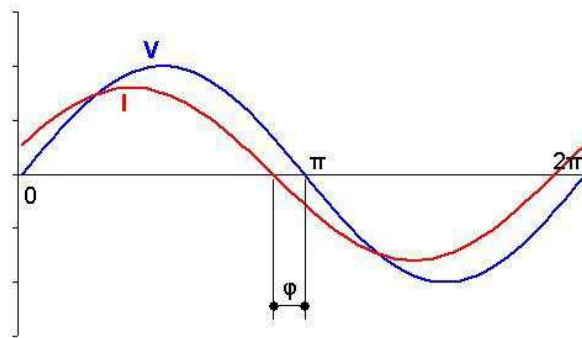


Figura 3.33. Característica capacitiva da carga, a forma de onda de corrente (I) adiantada em relação à onda de tensão (V). FP adiantado.



3.5.1.3. Potência ativa

A potência ativa, mostrada na equação (3.11), pode ser definida como a capacidade de um sistema elétrico produzir trabalho num determinado período de tempo. Devido aos elementos reativos apresentados por cargas não resistivas, a potência aparente, será igual ou maior do que a potência ativa como pode ser observado na equação 3.12.

$$P = U_e \cdot I_e \cdot \cos \varphi \quad (3.11)$$

$$S = \frac{P}{FP} \quad (3.12)$$

Onde, I_e é o valor eficaz da intensidade de corrente alternada senoidal, U_e é o valor eficaz da tensão senoidal e φ é o ângulo de fase ou defasagem entre a tensão e a corrente.

3.5.1.4. Potência reativa

A Potência reativa (Q) não produz trabalho, circula entre a carga e a fonte de alimentação, ocupando um “espaço” no sistema elétrico que poderia ser utilizado para fornecer mais energia ativa. No entanto ela é responsável por estabelecer e manter o campo eletromagnético ativo nas cargas. A mesma é expressa pela equação (3.13).

$$Q = U_e \cdot I_e \cdot \sin \varphi \quad (3.13)$$

3.5.1.5. Medição do consumo de energia elétrica

A medição do consumo de energia elétrica é feita através da medição da potência elétrica fornecida à carga em um determinado intervalo de tempo. A medição da potência elétrica por sua vez é determinada por intermédio de sensores de corrente e tensão instalados na alimentação da carga e conectados aos medidores.

O sensor de corrente é um dispositivo que tem seu funcionamento vinculado a interação eletromagnética, e é responsável por mensurar a corrente elétrica que circula pela carga. O sensor de tensão é responsável por mensurar a tensão elétrica aplicada à carga, e é instalado entre fases e entre fase e neutro. Com as informações das correntes e das tensões fornecidas pelos respectivos sensores, os sistemas de medição utilizados para determinar o consumo de energia elétrica realizam a integração da potência ativa transmitida a carga num determinado intervalo de tempo, como mostrado na equação 3.14.

$$P_{med} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T I(t) \cdot U(t) \cdot dt \quad (3.14)$$

O medidor de qualidade de energia SEL-735, apresentado na Figura 3.34 foi utilizado nesta pesquisa para determinar o consumo de energia elétrica. O mesmo tem a capacidade de fornecer dados de medição personalizados para monitoramento e controle de estabilidade em tempo real e utiliza medição de perfil de carga, compatível com protocolos Itron MV-90, IEC 61850, DNP3 e Modbus.

Figura 3.34. Medidor de qualidade de energia SEL – 735.



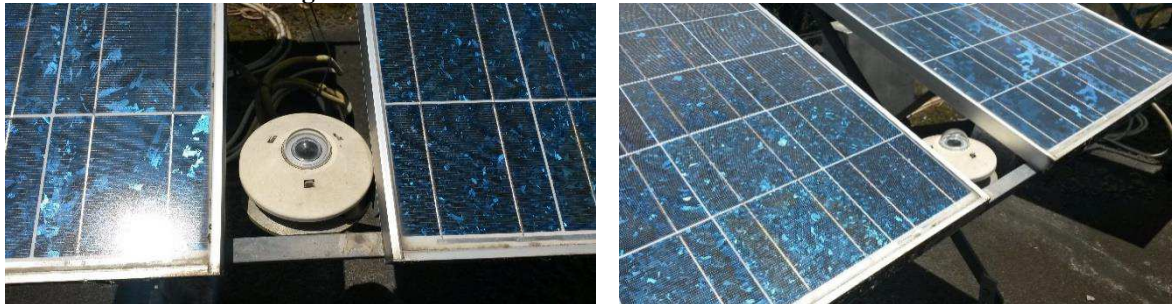
3.5.1.6. Medição da energia solar.

Neste trabalho para a determinação da irradiação solar incidente, e conseqüentemente da potência solar por unidade de área (W/m^2), foram utilizados os dados fornecidos pela estação meteorológica do LEIAM/CEEI/UFMG e pelo piranômetro, modelo CM21, fabricado pela Kipp & Zonen, mostrados nas Figuras 3.35 e 3.36 respectivamente instalados no LEIAM.

Figura 3.35. Estação meteorológica modelo HD32MT.1, SN 11031486 e FW 0714141114.



Figura 3.36. Piranômetro instalado no LEIAM/UFMG.



Com os dados da intensidade da irradiação solar incidente para cada instante obtidos na estação solarimétrica é possível plotar gráficos, como mostrado nas Figuras 3.37 e 3.38,

onde é possível observar a variação dessa irradiação em função do tempo em dois dias de experimento.

Figura 3.37. Variação da radiação solar incidente em função do tempo, do primeiro dia de experimento.

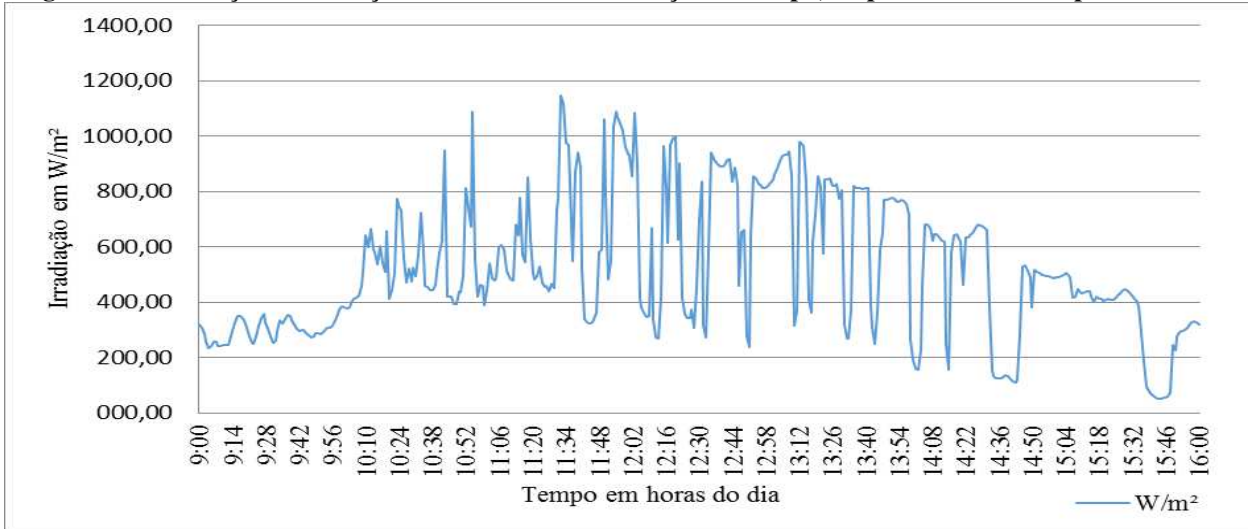
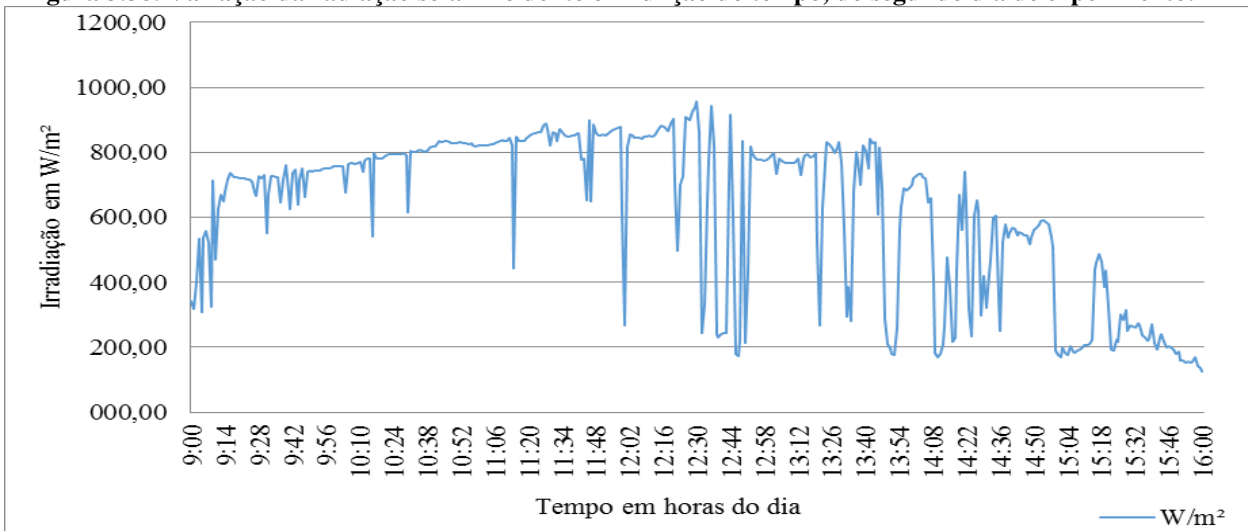


Figura 3.38. Variação da radiação solar incidente em função do tempo, do segundo dia de experimento.



Para obter a radiação solar média, calculada como determina a Equação 3.15, obtém-se o gráfico mostrado na Figura 3.39. 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 acaba se refletindo na variação de temperatura do ar de secagem.

$$\overline{Rad} = \frac{\sum Rad}{n} \quad (3.15)$$

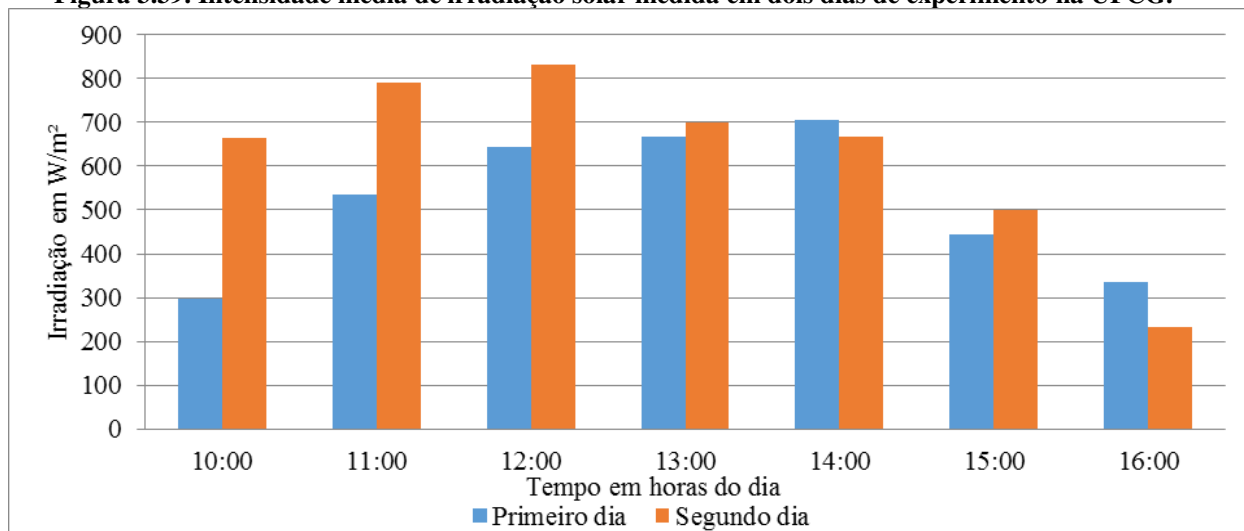
Onde,

\overline{Rad} = radiação solar média [W/m^2];

Rad = radiação solar verificada [Wh/m^2];

n = número de verificações [h].

Figura 3.39. Intensidade média de irradiação solar medida em dois dias de experimento na UFCG.



3.5.2 Cálculo do consumo específico de energia na produção da banana passa

A avaliação do consumo específico de energia nos sistemas de secagem elétrico, solar e mista (solar-elétrico) foram feitas com base nos dados fornecidos pelo medidor de qualidade de energia apresentado na Figura 3.34, nos dados fornecidos pela estação meteorológica e pelo piranômetro, mostrados na Figura 3.35 e 3.36 respectivamente.

3.5.2.1 Avaliação do consumo específico de energia no processo de secagem elétrica.

A avaliação do consumo específico de energia (CEE) do sistema de secagem elétrica foi feita exclusivamente com o auxílio do medidor de qualidade de energia SEL-735, apresentado na Figura 3.34. O instrumento foi instalado com a finalidade de medir as grandezas elétricas, determinando a energia utilizada ao longo do processo de secagem. Desta maneira, foi possível realizar a medição da energia utilizada no processo, como também ter uma representação gráfica do perfil de carga do secador elétrico, podendo assim ter uma avaliação precisa do custo de operação do sistema.

3.5.2.2 Avaliação do consumo específico de energia no processo de secagem solar.

A avaliação do consumo específico de energia no processos de secagem solar foram feitos com base nos dados de irradiação fornecidos pela estação meteorológica e pelo piranômetro, apresentados nas Figuras 3.35 e 3.36, respectivamente. Com os dados de irradiação fornecido, foi possível determinar a energia recebida pelo coletor do secador solar. Com as informações da área de incidência do coletor, obtida por meio dos dados construtivo do equipamento, foi determinada a energia solar-térmica em Wh utilizada durante os experimentos, possibilitando assim realizar a avaliação econômica do sistema através do cálculo do CEE.

3.5.2.3 Avaliação do consumo específico de energia no processo de secagem mista (solar-elétrica).

Para avaliação do consumo específico de energia neste processo de secagem, foram utilizados na primeira parte do experimento os dados fornecidos pela estação meteorológica e pelo piranômetro apresentados nas Figuras 3.35 e 3.36, respectivamente. Na segunda parte do experimento, os dados de consumo de energia foram fornecidos com o auxílio do medidor de qualidade de energia SEL-735, mostrado na figura 3.34.

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

O cálculo do consumo específico total 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 experimentais. A Equação 3.16 foi utilizado neste trabalho para determinar o consumo específico dos processos de secagem.

O resultado do cálculo do consumo específico da energia foi um dos principais indicadores de rendimento dos sistemas de secagem estudado neste trabalho.

$$CEE = \frac{EC.(100-Uf)}{Mi.(Ui-Uf)} \quad (3.16)$$

Onde:

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

EC = energia consumida na secagem (térmica + elétrica), 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.

Os testes experimentais foram realizados nos Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas (LEMT) e no Laboratório de Secagem da UAEM pertencentes à Universidade Federal de Campina Grande, na cidade de Campina Grande, estado da Paraíba.

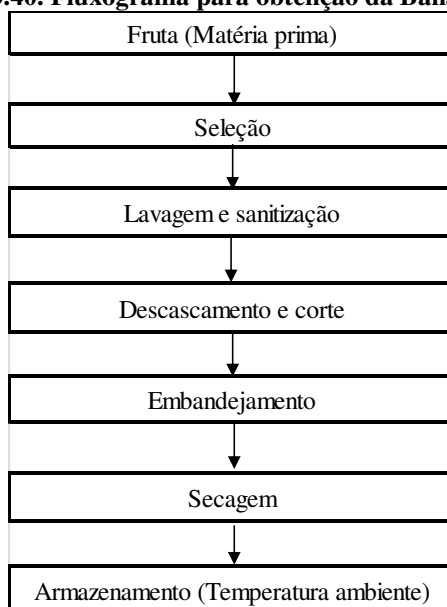
Para realização dos experimentos foram utilizados um secador solar de exposição indireta e um secador elétrico, ambos mostrados nas Figuras 3.4 e 3.20, respectivamente. Os mesmos foram utilizados neste trabalho para produção de banana passa.

Para a preparação da fruta antes dos experimentos foram seguidas as instruções apresentadas no fluxograma da Figura 3.40.

3.6 Produção da banana passa

O processo de produção da banana passa é representado pelo fluxograma apresentado na Figura 3.40.

Figura 3.40. Fluxograma para obtenção da Banana Passa



3.6.1 Descrição do fluxograma

Nesta etapa será descrito todo procedimento necessário à produção da banana passa desde a etapa inicial que compreende a seleção até a etapa final correspondente ao armazenamento.

3.6.2 Fruta (matéria prima)

Utilizou-se banana (*Musa spp.*), adquirida na feira livre e procedente da Central de Abastecimento de Campina Grande, PB (EMPASA).

3.6.3 Seleção

Os frutos foram selecionados de acordo com o grau de maturação adequado ao processamento e tamanho uniforme.

3.6.4 Lavagem e sanitização

Os frutos foram lavados primeiramente em água corrente e depois sanitizadas com água clorada 50ppm de cloro livre ativo por 10 minutos, para retirada de qualquer tipo de sujeira e para a descontaminação do fruto.

3.6.5 Descascamento e corte

O descascamento foi feito de forma manual e o corte foi feito longitudinalmente como pode ser visto na Figura 3.41.

3.6.6 Embandejamento

Os frutos foram distribuídos na bandeja do secador em camada única.

3.6.7 Secagem

A secagem foi realizada em três processos distintos: secagem solar, secagem solar-elétrica e secagem elétrica.

3.6.8 Armazenamento.

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

Na Figura 3.41 é apresentada algumas bananas cortadas longitudinalmente antes da secagem (*in natura*) no início do processo e no final após o processo de armazenamento. Em todos os experimentos foi adotado este procedimento no início e no final do processo de secagem.

Figura 3.41 Bananas cortadas longitudinalmente *in natura* (a) e banana passa (b).



3.7 Cálculo da eficiência do sistema de secagem solar

Segundo Nunes (2016) a análise da eficiência do sistema de secagem solar é realizada calculando-se o desempenho do processo de secagem e o rendimento térmico do equipamento. O desempenho do sistema de secagem deve avaliar duas características: o

equipamento propriamente dito e o processo ao qual se destina. A eficiência do secador solar está relacionada com seu rendimento térmico, enquanto que a eficiência do processo de secagem pode ser avaliada pela diferença entre a massa inicial e a massa final da banana, em relação à massa inicial de água presente no produto.

Contudo, para determinar o rendimento térmico e consequentemente avaliar o secador solar, é imprescindível conhecer a intensidade da irradiação solar a que o secador está sendo submetido durante o processo de secagem, assim como, o conhecimento da quantidade de energia que está sendo entregue ao sistema é fundamental para a avaliação energética do processo de secagem. A quantidade de energia solar interceptada pela Terra (globo terrestre + atmosfera) é da ordem de $1,73 \times 10^{17}$ W, ou seja, 3×10^{24} J ano⁻¹. Só um terço desta quantidade atinge a superfície terrestre, devido à atenuação provocada pela atmosfera. O Homem consome atualmente cerca de 10^{17} a 10^{20} J ano⁻¹, o que representa 10^{-7} a 10^{-4} da energia solar que atinge a superfície terrestre (PRATOTO, 2007).

Para determinar a potência solar por unidade de área (W/m²), utilizada no cálculo da eficiência térmica do secador solar, foi utilizado os dados da irradiação solar incidente, fornecidos pela estação meteorológica do LEIAM/CEE/UFCG, e pelo piranômetro, modelo CM21, fabricado pela Kipp & Zonen, mostrados nas Figuras 3.35 e 3.36 respectivamente instalados no LEIAM.

A vazão mássica (\dot{m}) do ar de secagem foi obtida através da medição da velocidade do ar que passa pelo *cooler* instalado na câmara de secagem e através da seção da ventoinha, verificada por meio de um anemômetro digital portátil, mostrado na Figura 3.42, modelo VEC-GM 8901, marca Vectus, sendo calculada pela Equação 3.17.

$$\dot{m} = v_{ar} \cdot A_2 \cdot \rho \Rightarrow \left(\frac{m}{s} \cdot m^2 \cdot \frac{kg}{m^3} \right) = kg/s \quad (3.17)$$

Onde,

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

A_2 = área da secção transversal da chaminé (ventoinha) [m²];

ρ = massa específica do ar [kg/m³].

Figura 3.42. Equipamentos de medição da velocidade do ar (Anemômetro).



A variação temporal de temperatura nos pontos de interesse, dado pela Equação 3.18, serão medidas por um sistema de medição e aquisição de dados desenvolvida especificamente para o secador solar de irradiação indireta.

$$\Delta T = T_{t+\Delta t} - T_t \quad (3.18)$$

Onde,

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

T_t = Temperatura num instante t [K].

3.8 O processo de secagem

3.8.1 Determinação das curvas de secagem

As curvas de secagem, também denominadas de curvas 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 3.19.

$$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (3.19)$$

Onde,

RU = razão de umidade, base seca;

X = teor de umidade, base seca;

X_e = teor de umidade de equilíbrio, base seca;

X_0 = teor de umidade inicial, base seca.

Os dados experimentais referentes à variação da massa do produto durante o processo de secagem foram obtidos em intervalos regulares de 30 (trinta) minutos, com início às 09h00min da manhã para os experimentos de secagem solar e secagem mista, retirando-se uma amostra da banana da câmara de secagem e medindo-se sua massa com uso de uma balança digital, modelo KC 01, marca Western apresentada na Figura 3.43.

Figura 3.43. Balança digital modelo KC 01, marca Western: banana *in natura* (a), banana passa (b) e massa seca da banana (c)



A medida da massa observada em cada instante é registrada numa tabela, como a mostrado mostrada na Figura 3.44, em que constam, para cada experimento, o tempo em que ocorre a medição e a respectiva massa. Nesta mesma tabela, a partir desses registros iniciais, é possível calcular o teor de água em base seca e em base úmida e a razão de umidade.

Figura 3.44. Modelo de tabela usada para registrar e calcular valores obtidos em cada experimento.

Dia	Horário	Tempo (min)	Produto (g)	Massa Seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	RU (Adim)	Desvio padrão (σ)
		0						
		30						
		60						
dia/mês/ano		90						
		...						
		...						
		...						
		Última medição						

A avaliação do processo de secagem obtido experimentalmente foi realizado comparando-se os valores experimentais com o modelo matemático de Page. Após a coleta de dados realizada, os parâmetros necessários à determinação das curvas de secagem (razão de umidade e tempo) foram calculados por meio do software Microsoft Excel versão 2010.

O modelo matemático proposto por Page foi utilizado neste trabalho devido a muitas citações encontradas na literatura afirmando que este modelo descreve melhor o processo de secagem de produtos agrícolas que o modelo exponencial (ORIKASA 2008). E por apresentar com os dados experimentais deste trabalho um elevado coeficiente de determinação (R^2) em torno de 99% .

O modelo matemático de Page, surgiu da modificação de outro modelo matemático, representado pela Equação 3.20. Este modelo sugere que, durante o processo de secagem de materiais higroscópicos porosos no período de taxa de secagem decrescente, a mudança da umidade seja proporcional à diferença instantânea entre o teor de umidade do material e o teor de umidade do material quando em condições de equilíbrio com o ar de secagem, ou seja:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -k(U - U_e) \quad (3.20)$$

Assumindo k como uma constante e integrando a equação 3.20 para incrementos do tempo de 0 a t , e para teores de umidade decrescentes (U) a partir do teor de umidade inicial (U_0), tem-se o modelo exponencial representado pela Equação 3.21:

$$\frac{(U-U_e)}{(U_0-U_e)} = RU = \exp(-kt) \quad (3.21)$$

Page, com base na Equação 3.21, propôs um modelo empírico para descrever a secagem de grãos em camada fina, como pode ser visto na Equação 3.22.

$$\frac{(U-U_e)}{(U_0-U_e)} = RU = \exp(-kt^n) \quad (3.22)$$

Onde, n representa um parâmetro adimensional de secagem.

O modelo matemático de Page, dado pela Equação 3.22, mostrado na Tabela 3.3, foi utilizado no programa computacional Statistica versão 7.0, onde se determinou o coeficiente de determinação (R^2) para verificar a predição do processo.

Tabela 3.3. Modelo matemático empregado para ajustes das curvas de secagem.

Modelo	Equação	Nº	Referência
Page	$RU = \exp(-k \cdot t^n)$	3.22	Orikasa et al. (2008)

Onde,

k = constantes do modelo;

n = parâmetro do modelo;

t = tempo de secagem [min].

3.9 Análise energética do processo de secagem solar

3.9.1 Conceitos termodinâmicos

São apresentados os conceitos básicos de termodinâmica e da transferência de calor e massa aplicadas ao secador solar utilizado neste trabalho. A partir do balanço de energia no coletor solar e na câmara de secagem, aplicando-se as equações de continuidade (conservação da massa) e da primeira lei da termodinâmica, será possível obter a equação usada para calcular a eficiência térmica em cada componente do sistema de secagem e conseqüentemente no coletor solar.

Para obter os valores da eficiência térmica real é necessário medir a temperatura, a umidade relativa e a velocidade do ar de secagem na entrada e na saída de cada componente. Com os valores destas propriedades termodinâmicas é possível calcular a entalpia (h) em cada ponto de interesse (estado termodinâmico) e conseqüentemente obter a eficiência térmica do componente.

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

3.9.2 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 equação é dada pela expressão 3.23:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (3.23)$$

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 = são as vazões mássicas instantâneas na entrada e saída do volume de controle, respectivamente, dada pela Equação 3.24.

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A \quad (3.24)$$

onde,

v_e e v_s = velocidade do ar na entrada e saída do volume de controle [m/s];

A_e e A_s = área de entrada e da saída do ar do volume de controle [m²];

ρ_e e ρ_s = massa específica do ar na entrada e na saída do volume de controle [kg/m³].

3.9.3 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 a 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 de conservação da energia ao volume de controle, representada matematicamente pela Equação 3.25:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (3.25)$$

$\frac{dE_{vc}}{dt}$ = taxa temporal da variação da energia contida no interior do volume de controle, [J];

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

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

\dot{m}_e e \dot{m}_s = são as vazões mássicas instantâneas na entrada e saída do volume de controle, respectivamente, [kJ/kg];

$\frac{v_e^2}{2}$ e $\frac{v_s^2}{2}$ = são as energias cinéticas específicas na entrada e saída do volume de controle, respectivamente, [J];

gz_e e gz_s = são as energias potenciais específicas na entrada e saída do volume de controle, respectivamente, [J];

h = é a propriedade termodinâmica entalpia específicas; ($h = u + pv$), [kJ/kg];

h_e e h_s = são as entalpias na entrada e saída do volume de controle, respectivamente, [kJ/kg].

3.9.4 Cálculo do rendimento térmico do sistema de secagem solar

A partir do conceito básico de rendimento termodinâmico, como sendo a razão entre a potência entregue pelo sistema e a potência disponível no mesmo, Guerra e Varella (2014) afirmam que o rendimento de um coletor solar pode ser determinado pela Equação 3.26.

$$\eta_t = \frac{P_u}{A_1 \cdot \bar{G}} \cdot 100 \quad (3.26)$$

onde,

η_t = rendimento do secador solar [%];

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

A_1 = área de cobertura transparente [m²];

\bar{G} = média de irradiação solar incidente [W/m²].

A potência transferida ao fluido de trabalho, também chamada de potência útil, foi determinada pela Equação 3.27, e representa a quantidade de energia transferida ao fluido de trabalho, neste caso, o ar ambiente:

$$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.27)$$

onde,

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

c_p = calor específico do fluido de trabalho [J/kgK];

ΔT = diferença de temperatura [K].

Dessa forma, o rendimento térmico de um coletor solar, quando não se tem os valores da umidade relativa e da temperatura do ar na entrada e saída do equipamento, é expresso em função da potência útil, da irradiação solar incidente, da área de cobertura transparente e, conseqüentemente, da vazão do fluido de trabalho, do calor específico do mesmo e da variação de temperatura obtida (NUNES, 2016).

3.9.5 Rendimento termodinâmico do equipamento

Uma das maneiras de se determinar o rendimento térmico do equipamento pode ser através da equação geral da eficiência ($\eta_t = \frac{P_u}{A \cdot \bar{G}} \cdot 100$). Esta equação é utilizada quando não se dispõe dos dados de medição da umidade relativa do ar e temperatura, na entrada e saída de cada parte que compõe o sistema de secagem. Outra maneira de se calcular o rendimento

térmico é usando a expressão geral dada pela Equação 3.25 e com a aplicação do balanço de energia em cada parte do equipamento.

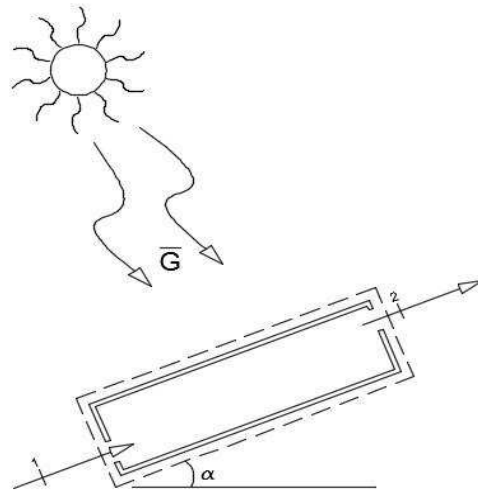
3.9.5.1 Cálculo das eficiências

Neste 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 em cada parte do sistema de secagem, a partir do balanço de energia aplicado ao coletor solar e câmara de secagem.

a) Coletor solar

Na Figura 3.45 pode ser vista uma representação esquemática do volume de controle aplicado ao coletor solar.

Figura 3.45. Representação do volume de controle para o coletor solar



Fonte: Nunes (2016)

Aplicando a Primeira Lei da Termodinâmica, dada pela sua Equação geral 3.25, e considerando que a energia cinética e a energia potencial na entrada e saída do coletor solar são iguais, o que é perfeitamente aceitável, dado as características construtivas e operacionais do coletor solar ($EC_e = EC_s$ e $EP_e = EP_s$). Com estas considerações a Equação 3.25, fica apresentada na forma dada pela Equação 3.28:

O trabalho realizado pelo coletor solar é nulo, isto é:

$$\dot{W}_{1-2} = 0 \quad (3.29)$$

Como a massa que entra no coletor é igual a massa que saí ($\dot{m}_1 = \dot{m}_2$), tem-se:

$$\dot{Q}_{1-2} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (3.30)$$

onde, \dot{Q}_{1-2} é o \dot{Q} *real*, ou seja, é a energia realmente transferida para o ar, que neste caso, é o fluido de trabalho.

Aplicando o conceito de eficiência térmica, pela 1ª da Termodinâmica para um volume de controle chega-se a expressão que representa o rendimento térmico do coletor solar dado pela Equação 3.31:

$$\eta_{coletor} = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{solar}} = \frac{\dot{m}(h_2 - h_1)}{A \dot{Q}_{solar}} \quad (3.31)$$

onde:

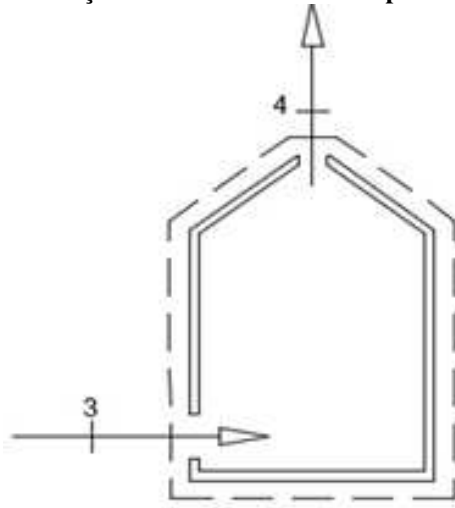
$$\dot{Q}_{solar} = \int_t^{t+\Delta t} \bar{G} dt \quad (3.32)$$

onde \bar{G} é o valor que representa a média da irradiação solar incidente sobre o coletor solar no intervalo de tempo entre o início do processo às $t_i = 9 h$ e seu término diário que ocorre às $t_f = 16 h$.

b) Câmara de Secagem.

A Figura 3.46 mostra uma representação esquemática do volume de controle aplicado à câmara de secagem.

Figura 3.46. Representação do volume de controle para câmara de secagem.



Fonte: Nunes (2016)

Aplicando o balanço de energia na câmara de secagem, e considerando que a energia cinética e a energia potencial na entrada e saída da câmara de secagem são iguais, o que é perfeitamente aceitável, dado as características construtivas e operacionais da câmara de secagem ($EC_e = EC_s$ e $EP_e = EP_s$).

Considerando também que o trabalho é nulo, porque neste caso a câmara de secagem não realiza nenhum trabalho ($\dot{W} = 0$). Com estas considerações a Equação 3.25, fica apresentada na forma dada pela Equação 3.33:

Onde \dot{E}_b representa a vazão mássica da energia retirada da fruta durante o processo de secagem.

$$\dot{Q}_{3-4} + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{E}_b \quad (3.33)$$

Assim,

$$\dot{Q}_{3-4} = \dot{m}_4 h_4 + \dot{E}_b - \dot{m}_3 h_3 \quad (3.34)$$

Lembrando que, neste caso a massa que sai é maior do que a massa que entra, uma vez que sai a massa de ar que entrou, vindo do coletor solar, mais a massa de água que é retirada da fruta durante o processo de secagem.

$$\begin{cases} \dot{m}_3 \neq \dot{m}_4 \\ \dot{m}_4 > \dot{m}_3 \end{cases} \quad (3.35)$$

Ou seja:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_3 + \dot{m}_{\text{água da banana}} \quad (3.36)$$

Lembrando mais uma vez que a vazão mássica do fluido de trabalho, o ar de secagem, é dada pela Equação 3.24:

Aplicando o conceito de eficiência térmica, pela 1ª Lei da Termodinâmica para um volume de controle, chega-se a expressão que representa o rendimento térmico da câmara de secagem dado pela Equação 3.37:

$$\eta_{\text{câmara}} = \frac{\dot{m}_4 h_4 + \dot{E}_b}{\dot{m}_3 h_3} \quad (3.37)$$

Onde \dot{E}_b é obtido a partir da Equação 3.38:

$$\dot{E}_b = h_v \dot{m}_{\text{água retirada da banana}} \quad (3.38)$$

Onde:

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

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

c) Eficiência média do secador solar (sistema de secagem)

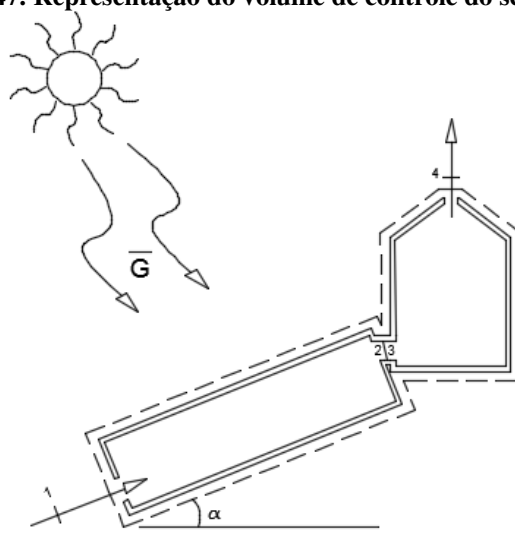
Aplicando o balanço de energia no secador solar, e considerando que a energia cinética e a energia potencial na entrada e saída do secador solar são iguais, dado as características construtivas e operacionais do secador solar ($EC_e = EC_s$ e $EP_e = EP_s$). Considerando também que o trabalho é nulo ($\dot{W} = 0$). Com estas considerações o rendimento

do sistema de secagem ($\eta_{secador}$), é igual ao rendimento do coletor solar ($\eta_{secador\ solar}$) dado pela Equação 3.39.

$$\eta_{secador\ solar} = \eta_{coletor\ solar} \quad (3.39)$$

A Figura 3.47 mostra uma representação esquemática do volume de controle aplicado ao secador solar.

Figura 3.47. Representação do volume de controle do secador solar.



Fonte: Nunes (2016)

3.9.6 Eficiência mássica dos processos de secagem

A eficiência mássica do processo de secagem será avaliada através da medição da variação das massas do produto a ser seco, através da Equação 3.40, que apresenta os parâmetros necessários a essa determinação.

$$\eta_p = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{m_{total\ de\ água}} \cdot 10 \quad (3.40)$$

onde,

η_p = eficiência mássica do processo [%];

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

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

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

3.9.7 Rendimento médio do secador solar

Para os cálculos dos rendimentos médio do coletor solar, experimentos de 3 a 5, foi feita uma média das temperaturas do ar de secagem na entrada e na saída do coletor solar, conforme Equação 3.41.

$$\bar{T} = \frac{\sum T}{n} \quad (3.41)$$

onde,

n =representa o número de horas de secagem;

T =representa a temperatura de cada hora do dia;

\bar{T} = representa a média das temperaturas ao longo do dia.

3.9.8 Apresentação de dados dos experimentos

Neste trabalho foram apresentados os dados obtidos em seis testes experimentais. Portanto, os valores da massa inicial, massa final, massa de água e eficiência mássica foram apresentados individualmente como mostrado na Figura 3.48, bem como a energia consumida, a umidade inicial, a umidade final, a massa inicial e o consumo específico de energia, foram também apresentados de forma individual como mostra na Figura 3.49.

Nas Figuras 3.50 e 3.51 foram apresentados de forma individual os dados dos experimentos de secagem elétrica e secagem mista, respectivamente. Os dados contidos nestas figuras representam os valores das grandezas elétricas do secador elétrico e os dados dos processos, definidos como: energia aparente, energia ativa, energia reativa, fator de potência, energia consumida no processo, umidade inicial do produto, umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia do processo de secagem elétrico e misto respectivamente.

Nas Figuras 3.52 e 3.53 foram apresentados o resumo dos valores da potência útil e do rendimento do coletor solar e o resumo das eficiências dos processos de secagem para cada experimento respectivamente.

Figura 3.48. Valores da massa inicial, massa final, massa de água e eficiência mássica do processo de secagem elétrica

m_{inicial} (g)	m_{final} (g)	$m_{\text{água}}$ (g)	η_{p1} (%)

Figura 3.49. Valores da energia utilizada, teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia do processo de secagem solar.

EC (kWh)	Ui (%)	Uf (%)	Mi (kg)	CEE (kW/kg)

Figura 3.50 Valores da energia consumida, umidade inicial do produto, umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia do processo de secagem elétrica.

Informações elétricas do secador				Dados do processo				
E_S (kVAh)	E_P (kWh)	E_Q (kVArh)	FP	EC (kWh)	Ui (%)	Uf (%)	Mi (kg)	CEE (kW/kg)

Figura 3.51 Valores da energia consumida, umidade inicial do produto, umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia do processo de secagem mista.

Informações elétricas do consumo				Dados do processo						
E_S (kVAh)	E_P (kWh)	E_Q (kVArh)	FP	ET (kWh)	EE (kWh)	EC (kWh)	Ui (%)	Uf (%)	Mi (kg)	CEE (kW/kg)

Figura 3.52. Potência útil e rendimento do coletor solar para cada processo.

Experimentos	Datas do Processo	$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$	$\eta_t = \frac{P_u}{A_1 \cdot I} \cdot 100$
		[W]	[%]
3	15 a 16 / 06 / 2016		
4	07 a 08 / 06 / 2016		

Figura 3.53. Resumo das eficiências dos processos de secagem para cada experimento.

Experimentos	Datas do Processo	X_{buf} [%]	$m_{inicial}$ [g]	m_{final} [g]	m_{H_2O} [g]	η_p [%]
1	24 e 25 / 03 / 2016					
2	30 / 03 / 2016					
3	15 a 16 / 06 / 2016					
4	07 a 08 / 06 / 2016					
5	03 a 04 / 10 / 2016					

3.9.9 Características construtivas do sistema de secagem solar

Na Figura 3.54 é apresentada uma tabela com as características construtivas e dimensionais do sistema de secagem solar utilizado nesta pesquisa.

Figura 3.54. Características construtivas e dimensionais do sistema de secagem solar.

Coletor Solar	Características
Material da base (laterais e fundo)	MDF Ultra
Espessura do MDF Ultra	15 mm
Dimensões (largura, comprimento, altura em mm)	1,235 x 0,77 x 0,185
Dimensões de entrada de ar (largura altura em mm)	600 x 100
Dimensões de saída de ar (largura altura em mm)	400 x 60
Tela de Nylon (m ²)	2
Velcro (m)	8
Material de Cobertura (1 m ²)	policarbonato
Capacitor Térmico no interior do coletor	telha pintada de preto
Volume interno (litros)	176
Área de entrada (mm ²)	60.000
Área de saída (mm ²)	24.000
Fixação do policarbonato no MDF	velcro dupla face 10 m

Câmara de Secagem	Características
Material da base (laterais, fundo e cobertura)	MDF Ultra
Dimensões (largura, comprimento, altura em mm)	43 x 35 x 50
Entrada de ar (mm)	400 x 60
Saída de ar (mm)	40 x 40
Material das bandejas	MDF ultra de 15 mm e tela de nylon verde
Volume interno (litros)	67
<i>Cooler</i> de computador usado na chaminé	(12 V)
Área da chaminé (m ²)	0,007

3.9.10 Valores atribuídos as propriedades termodinâmicas e estratégia de controle.

Durante a realização dos experimentos para fins de comparação entre os sistemas de secagem, foram atribuídos valores de temperatura e umidade aos sistemas de controle do processo da secagem elétrica (experimento 1) compatíveis com os valores médios observados pelo sistema de secagem solar, sendo ajustado os set points de temperatura de processo em 45°C e de umidade relativa do ar de secagem em 30%. No experimento 6 para fins de comparação do consumo de energia com o experimento 1, os set points de temperatura de processo foi ajustado em 55°C e de umidade relativa do ar de secagem foi mantido em 30%.

O experimento 2 (EXP 2), secagem mista (secagem solar seguida de secagem elétrica), foi realizado para fins de comparação com os sistemas de secagem solar e secagem elétrica. Na primeira parte deste experimento, realizado no secador solar, foi introduzida uma estratégia de controle com a finalidade de realizar o controle da temperatura da câmara de secagem do secador solar. Esta estratégia foi utilizada com o objetivo de proporcionar a secagem do produto com uma temperatura mais estável. Na segunda parte do experimento 2 realizada no secador elétrico, foram mantidos os valores atribuídos às propriedades termodinâmicas do ar de secagem (temperatura e umidade), em 45°C e 30%, respectivamente.

Nos experimentos 3 e 5, a exemplo da primeira parte do experimento 2, também foi adotada a mesma estratégia de controle da temperatura do ar de secagem do interior da câmara do secador solar. No experimento 4, a funcionalidade da estratégia de controle, adotada nos demais experimentos, não foi utilizada para fins de comparação.

A estratégia adotada consiste em controlar o acionamento do sistema de exaustão responsável pela convecção forçada do ar de secagem. Quando a temperatura de processo no interior da câmara está abaixo da temperatura limite inferior do processo, o sistema de convecção é desligado, ficando apenas a convecção natural. Esta estratégia de controle foi desenvolvida para manter uma faixa de temperatura de secagem mais estável e adequada ao produto utilizado nestes experimentos. O acionamento do sistema de convecção forçada só é feito na faixa de temperatura compreendida entre 40°C e 60°C no interior da câmara de secagem, ou seja, quando a temperatura do interior da câmara for inferior a 40°C, o sistema de convecção forçada não será acionado. Após atingir 40 °C o sistema será acionado e permanecerá nesta condição até atingir 60°C. Quando a temperatura de 60°C for atingida, o sistema de exaustão será desligado, voltando a atuar apenas na faixa de temperatura estabelecida. O controlador projetado para este sistema de controle aciona o sistema de convecção forçada com a leitura dos valores instantâneos de temperatura do interior da câmara de secagem, fornecido por intermédio do sensor de temperatura à plataforma do Arduino.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos testes experimentais EXP1, EXP2, EXP3, EXP4, EXP5, EXP6 seguindo-se a análise dos resultados, onde: ao término de cada experimento, foram observadas as características do aspecto visual do produto resultante da secagem. Na Figura 4.1 é apresentada uma foto dos frutos de banana prata (*Musa spp.*) já seca obtida em um dos experimentos.

Figura 4.1. Banana prata (*Musa spp.*) já desidratada obtida em um dos experimentos.



Para cada experimento realizado, foram apresentados os valores obtidos na variação de massa do produto e da variação da temperatura, da umidade do ar de secagem e o desvio padrão dos dados dos experimentos, medidos a cada meia hora, os mesmos estarão dispostos em tabelas do Apêndice I. A partir desses valores obtidos, são calculados e apresentados os demais parâmetros necessários à construção das respectivas curvas de secagem.

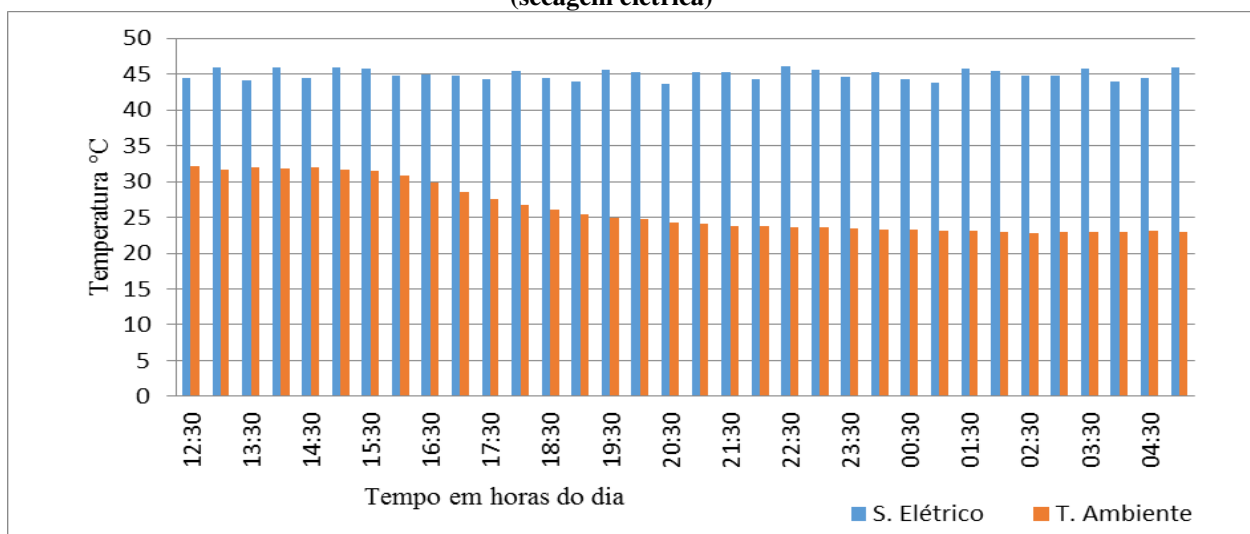
4.1 Análises dos testes experimentais

4.1.1 Experimento 1 (EXP1), (secagem elétrica).

Na Figura 4.2, são mostrados os valores de temperatura do ar de secagem obtidos pelo sistema de aquisição de dados do secador elétrico.

As temperaturas no interior da câmara de secagem do secador elétrico foram estáveis, em resposta ao sistema de aquecimento e ao comando do controlador, mantendo a temperatura em níveis de variação muito pequenos, a temperatura no interior da câmara de secagem permaneceu em torno de $45^{\circ}\text{C} \pm 1,3^{\circ}\text{C}$, ou seja, temperaturas entre $43,7^{\circ}\text{C}$ e $46,3^{\circ}\text{C}$. Desta forma corroborando com o que preconiza um bom sistema de controle térmico, como o possuído pelo secador elétrico estudado nesta pesquisa.

Figura 4.2. Temperatura do processo de secagem elétrica e temperatura ambiente - experimento 1 (secagem elétrica)



Nos secadores de frutas em uso comercial, o controle das temperaturas são normalmente requisitos fundamentais para a obtenção de um produto de boa qualidade, para tanto se deve observar as características do produto a ser seco. Neste caso para fins de comparação com outros sistemas de secagem que utilizam outras fontes de energias, foram utilizadas 300 g (gramas) de banana (*Musa spp.*), temperatura de 45°C e umidade relativa de 30%.

A Figura 4.2 mostra que a máxima temperatura de processo do secador elétrico foi de $46,10^{\circ}\text{C}$ às 22h30min do dia 24 de março de 2016, enquanto a mínima foi de $43,70^{\circ}\text{C}$ às 20h30min, do mesmo dia, verifica-se uma variação de $2,4^{\circ}\text{C}$. Com este nível de variação, observa-se a estabilidade do sistema, na manutenção das condições apropriadas do ar de secagem. Este equilíbrio térmico permitiu que o modelo matemático proposto por Page se

ajustasse bem aos dados experimentais da cinética de secagem do produto, como pode se visto na Figura 4.3. Outro dado a ser observado é que a variação da temperatura ambiente no decorrer do experimento que teve como máxima de 32,06°C às 12h30min do dia 24 de março de 2016 e mínima de 22,83°C as 02h30min do dia seguinte provocando uma variação de 9,23°C na temperatura ambiente, não interferiu na temperatura do processo, como já era esperado, comprovando a eficiência do sistema de controle do secador elétrico.

Os valores da variação da massa de banana foram obtidos a cada meia hora, sendo a primeira medição às 12h30min do dia 24 de março e a última no dia seguinte às 05h00min. Com esses dados foi possível determinar os valores calculados para as variáveis: massa de água (M_a), teor de umidade em base seca (X_{bs}), teor de umidade em base úmida (X_{bu}) e razão de umidade (RU), no experimento iniciado no dia 24 de março de 2016 e finalizado no dia 25 de março de 2016 (EXP1). O valor da massa seca foi obtido em testes realizados na estufa da UFCG.

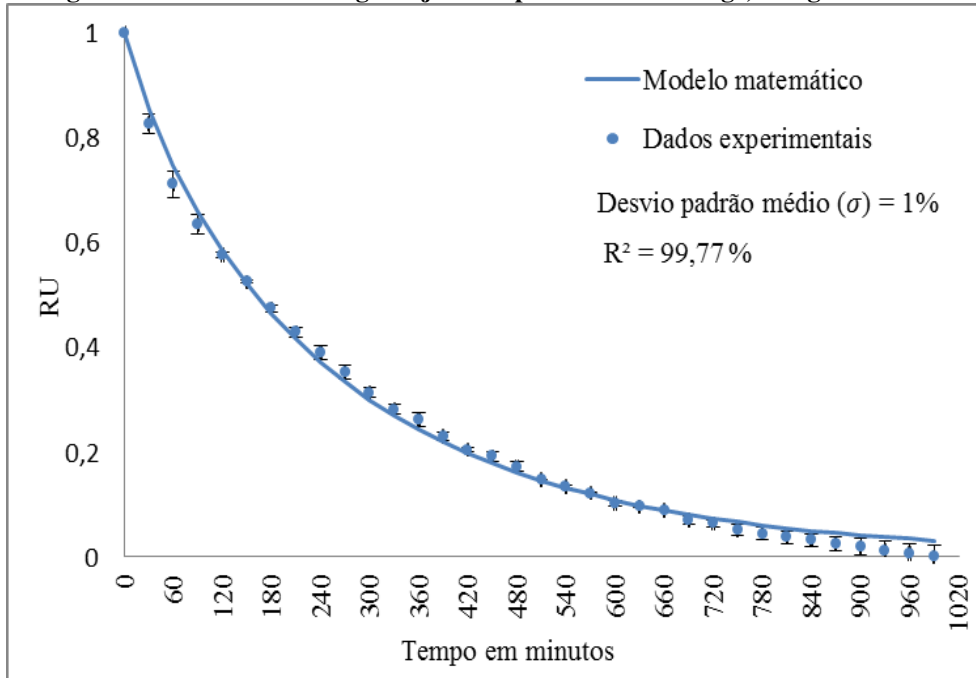
Para este experimento, o teor de umidade inicial da banana em base úmida foi de 70% e após dezesseis horas e trinta minutos de secagem, o teor de umidade final do produto foi de 20,74%.

A curva de secagem mostrada na Figura 4.3 foi obtida através dos dados coletados durante a realização do experimento 1, onde os pontos representam os valores de razão de umidade obtidos experimentalmente e a curva em linha cheia representa a cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page.

Nota-se que os valores experimentais obtidos no primeiro dia do experimento se encontram acima ou próximos da linha do modelo matemático (modelo de Page), enquanto que os do segundo dia se encontram abaixo da linha. Isto ocorreu devido à facilidade de remoção da água no início do processo, quando o teor de umidade ainda está muito elevado. Os dados experimentais em comparação com o modelo matemático utilizado para análises dos resultados, apresentou um desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 1%. Ao longo do experimento foram observados algumas dispersões dos dados experimentais em comparação com o modelo matemático que destoaram do desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) do experimento. Entre os primeiro 30 minutos e 90 minutos do experimento, os dados experimentais e o modelo matemático

apresentaram o maior desvio padrão ($\bar{\sigma}$) de 2,13%, entre 120 e 180 minutos o desvio padrão ($\bar{\sigma}$) apresentado foi de 0,53%, de 210 a 480 minutos o desvio padrão ($\bar{\sigma}$) foi de 0,98%. A menor média do desvio padrão ($\bar{\sigma}$) apresentada foi entre 510 e 660 minutos com um desvio padrão ($\bar{\sigma}$) de 0,16%, entre 690 e 990 minutos de experimento o desvio padrão ($\bar{\sigma}$) foi de 1,38%.

Figura 4.3. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, secagem elétrica.



A Figura 4.4 representa a taxa de secagem do experimento 1. Observou-se que a variação da taxa de secagem ao longo do experimento apresentou um decréscimo de forma exponencial até aproximadamente 510 minutos, a partir deste ponto a variação da taxa de secagem permanece praticamente constante, até o final do experimento apresentando apenas pequenas variações na velocidade da secagem.

Para o cálculo da eficiência mássica do processo de secagem em EXP1, foi utilizada a equação 3.40. Substituindo-se os valores da massa inicial e final da banana no numerador e a massa de água da banana no denominador, obtendo-se (η_p),

Na Tabela 4.1 podem ser observados os valores da massa inicial, massa final, massa de água e eficiência mássica do processo de secagem do experimento 1 (secagem elétrica).

Figura 4.4. Taxa de secagem do experimento 1 (secagem elétrica)

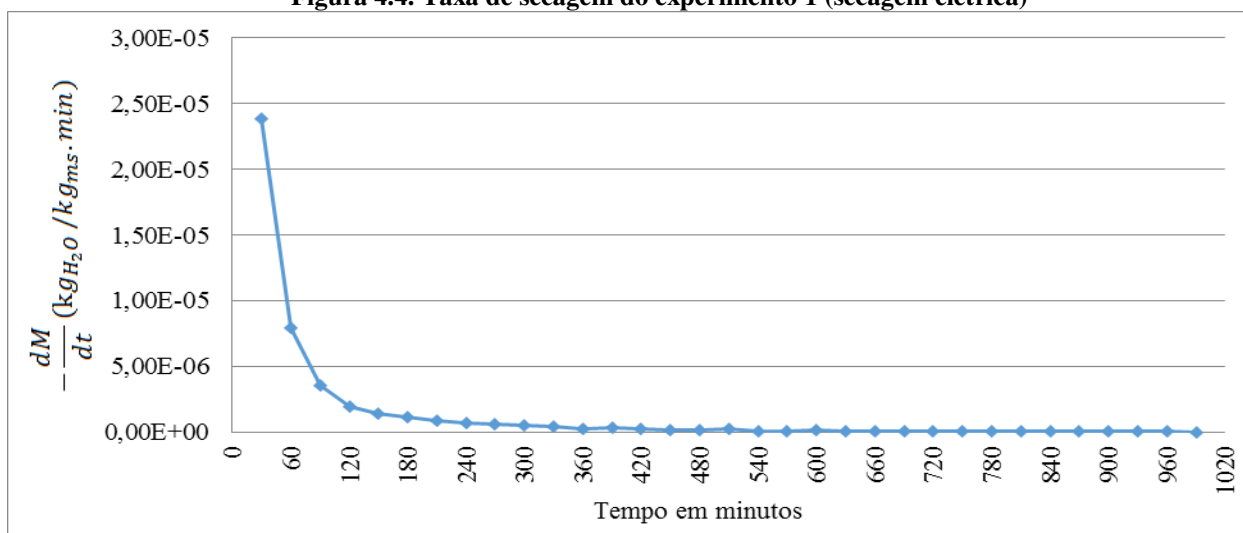


Tabela 4.1 Valores da massa inicial, massa final, massa de água e eficiência mássica do processo de secagem elétrica (experimento 1).

m_{inicial} (g)	m_{final} (g)	$m_{\text{água}}$ (g)	η_{p1} (%)
25,1	9,5	17,57	88,78

A elevada eficiência mássica do processo de secagem obtida foi um indicativo importante da eficiência do processo utilizado, que em conjunto com outros indicativos avaliou o sistema de secagem elétrica na transferência de energia para o processo.

O secador elétrico, por ter uma fonte de alimentação que apresenta pequenas variações e um sistema de controle que possibilita a correção das propriedades termodinâmicas do ar de secagem no decorrer do processo, teve um excelente desempenho no critério estabilidade, que possibilitou ao modelo matemático utilizado, um melhor ajuste aos dados experimentais.

O sistema de secagem elétrico estudado neste trabalho apresenta características elétricas bastantes peculiares, com variações bastante acentuadas da potência instantânea. Nas Figuras 4.5 e 4.6 podem ser observados os gráficos do perfil médio e instantâneo da carga durante todo o experimento e durante a primeira hora do experimento respectivamente. A potência média do sistema de secagem elétrica durante as 17 horas de funcionamento foi determinada com médias de potência realizadas em intervalos de quinze minutos. Nos primeiros trinta minutos de funcionamento, foi observado que a potência média deste período é bem maior do que nos períodos seguintes. Isto ocorre devido ao estado transitório, compreendido pelo início do processo de aquecimento e partida dos diversos sistemas que

compõem o secador, até atingirem as condições de equilíbrio, ajustadas para o início do processo de secagem.

Figura 4.5. Perfil médio de carga do secador elétrico.

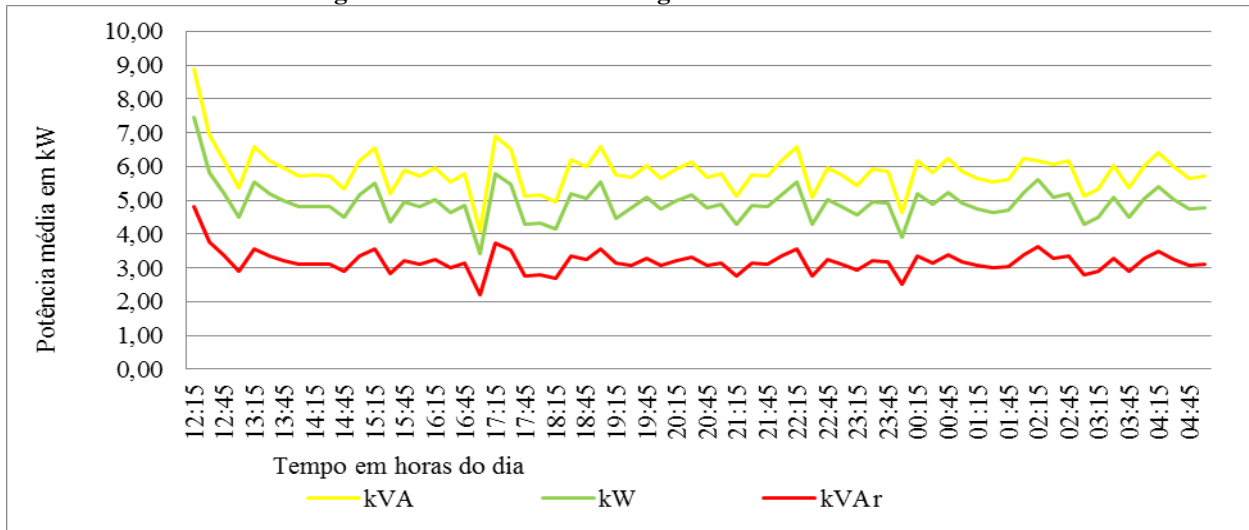
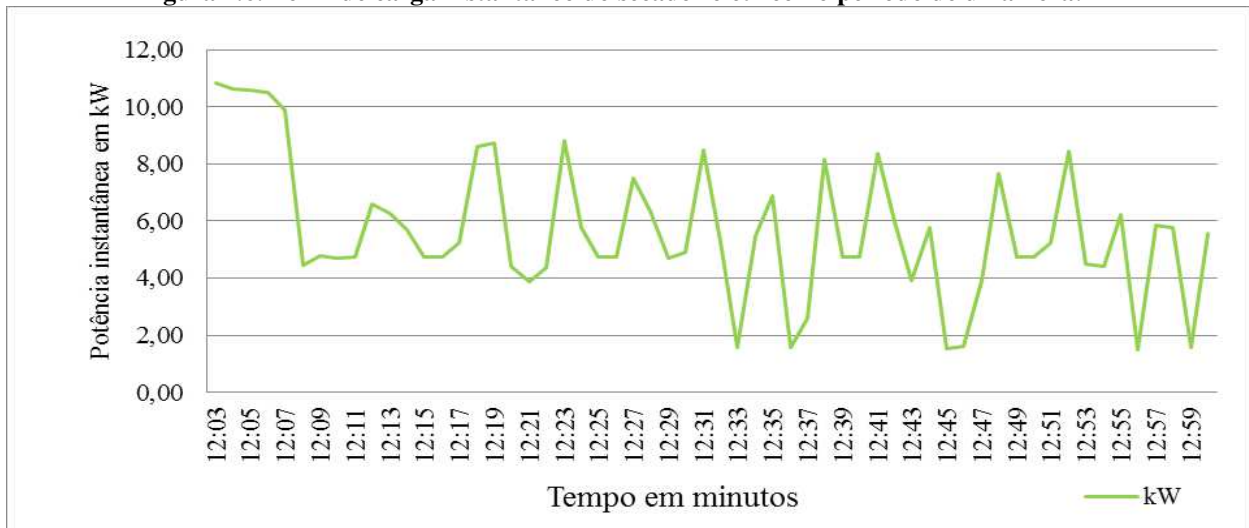


Figura 4.6. Perfil de carga instantâneo do secador elétrico no período de uma hora.

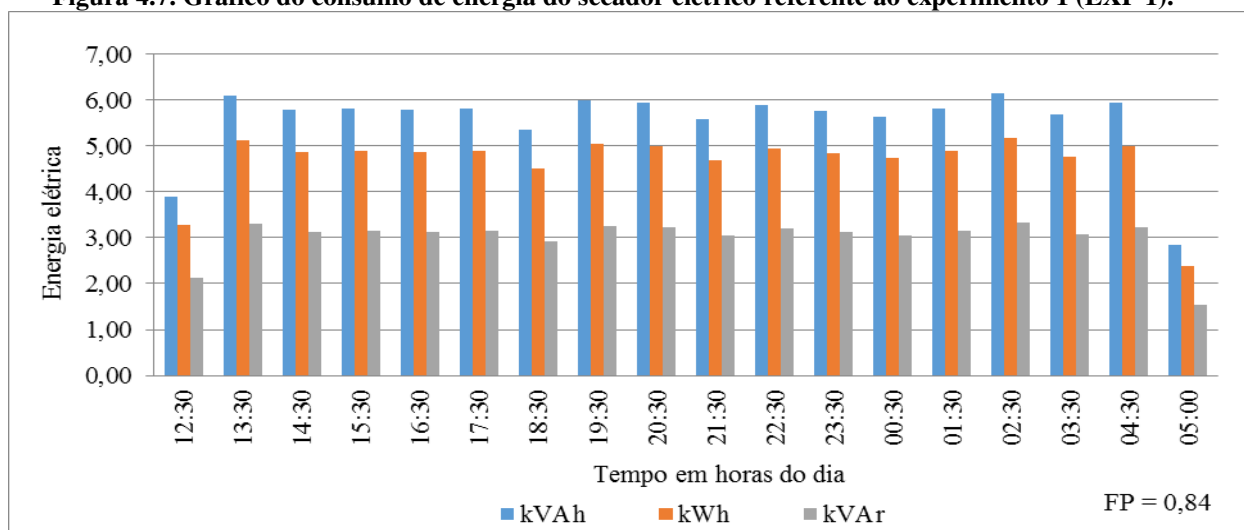


Na Figura 4.6, pode ser observado o comportamento da carga através da potência instantânea, o perfil de carga neste gráfico mostra as potências instantâneas integralizadas a cada um minuto, período compreendido pela aquisição e registros dos dados pelo analisador de qualidade de energia, apresentado na Figura 3.34. Analisando o gráfico é possível observar que nos primeiros 30 minutos foi o período que houve uma maior oscilação da potência requerida pela carga, esta variação ocorreu decorrente do estado transitório, período onde os diversos sistemas que compõem o secador elétrico são acionados, alguns simultaneamente. Este estado permanece até a estabilização das propriedades termodinâmicas em torno dos

parâmetros pré-definidos no início do processo, neste caso, temperatura de 45°C e umidade de 30%.

Na Figura 4.7, é apresentado o gráfico de consumo de energia utilizada no experimento 1, através do qual podem ser observadas algumas informações relevantes ao processo. A primeira meia hora, período inicial de funcionamento, observou-se um consumo de energia de $E_S = 3,90$ kVAh, $E_P = 3,28$ kWh e $E_Q = 2,12$ kVArh, energia aparente (E_S), energia ativa (E_P) e energia reativa indutiva (E_Q), respectivamente. Apesar de numericamente inferior às outras amostragens do gráfico, é bastante significativa, por se tratar de meia hora de funcionamento. Este valor acentuado no consumo de energia deve-se ao fato da energização dos sistemas que compõem o secador, já comentado anteriormente.

Figura 4.7. Gráfico do consumo de energia do secador elétrico referente ao experimento 1 (EXP 1).



O secador elétrico durante o experimento 1, apresentou uma média de consumo de energia elétrica de $E_S = 5,82$ kVA, $E_P = 4,89$ kWh e $E_Q = 3,16$ kVArh, e um consumo total de energia elétrica de $E_S = 99,91$ kVAh, $E_P = 83,90$ kWh e $E_Q = 54,20$ kVArh, apresentando um fator de potência médio (FP) de 0,84, compreendendo o período de estabilização e o de processo de secagem, totalizando 17 horas de funcionamento ininterruptos.

O menor consumo de energia foi de $E_S = 5,36$ kVAh, $E_P = 4,50$ kWh e $E_Q = 2,91$ kVArh registrado às 18h30min do dia 24 de março e o maior foi de $E_S = 6,16$ kVAh, $E_P = 5,17$ kWh e $E_Q = 3,34$ kVArh registrado às 02h30min do dia seguinte, que representa uma variação máxima de $E_S = 0,8$ kVAh e $E_P = 0,67$ kWh comprovando que quando o secador atinge o seu

estágio de equilíbrio a variação média da energia consumida é muito pequena, apesar da variação instantânea da potência ao longo do experimento ser bastante acentuada.

Na Figura 4.6, podem ser observadas variações da potência instantânea em torno de 5 kW, isto ocorre devido aos diversos sistemas que compõem o secador elétrico atuarem em muitos casos simultaneamente para a manutenção do controle das propriedades termodinâmicas.

Para fins de avaliação econômica do sistema de secagem elétrica, bem como avaliações comparativas com outros sistemas, será considerado como energia útil ao processo, apenas aquela que foi desprendida efetivamente para a secagem do produto, que no caso deste trabalho é a banana. Sendo assim, a potência utilizada na fase inicial não será contabilizada neste primeiro momento, considerando-se apenas a energia desprendida na secagem do produto até o valor imediatamente inferior a 25% da umidade em base úmida.

Estes critérios visam poder avaliar comparativamente de forma mais aproximada da realidade os sistemas de secagem solar, secagem mista e secagem elétrica. Outro dado importante de ser mencionado é que para o cálculo do consumo específico de energia foi utilizado a energia ativa (E_P) expressa em kWh, porque a energia aparente (E_S) expressa em kVAh pode ser reduzida com a redução da energia reativa (E_Q) através da correção do fator de potência (FP). A potência ativa é a que de fato realiza trabalho útil.

Considerando estes critérios, o período a ser analisado é compreendido entre as 12h30min do dia 24 de março de 2016 a 02h30min do dia 25 de março de 2016, totalizando quatorze horas de funcionamento do secador elétrico, que de acordo com os dados mostrados na Figura 4.7, representa um consumo de 68,46 kWh. Com base nestas informações é possível determinar o consumo específico de energia (CEE) do secador elétrico, que poderá fornecer informações relevantes para a avaliação econômica do sistema de secagem elétrica.

Com o auxílio da Equação 3.16 é possível determinar o consumo específico de energia. Na Tabela 4.2 são apresentados os valores da energia consumida, teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia do processo de secagem do experimento 1 (secagem elétrica).

O CEE do experimento 1 foi de 379,73 kWh/kg de energia por ciclo (batelada). Com esse valor é possível avaliar comparativamente a viabilidade econômica dos sistemas de secagem envolvidos nesta pesquisa.

Tabela 4.2 Valores da energia consumida, teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia do processo de secagem elétrica EXP 1.

Informações elétricas do consumo				Dados do processo				
E_S (kVAh)	E_P (kWh)	E_Q (kVArh)	FP	EC (kWh)	U _i (%)	U _f (%)	M _i (kg)	CEE (kW/kg)
99,91	83,90	54,20	0,84	68,46	70	24,70	0,3	379,73

4.1.2 Experimento 2 (EXP2), (secagem mista).

Na Figura 4.8, são mostrados os valores de temperatura do ar de secagem obtidos pelos sistemas de aquisição de dados dos secadores solar e elétrico, como também os dados de temperatura ambiente fornecida pela estação meteorológica. A secagem solar ocorreu entre 09h00min e 16h00min (sete horas). A secagem elétrica ocorreu entre 17h30min e 04h00min (dez horas e trinta minutos).

Neste primeiro momento os dados foram analisados separadamente. Inicialmente foram analisados os dados de temperatura fornecida pelo sistema de aquisição do secador solar. O sistema de secagem solar em análise utiliza um sistema de convecção forçada por meio de um *cooler* instalado na saída da câmara de secagem, acionado por um mini painel fotovoltaico, que fornece energia elétrica para a movimentação do *cooler*, que nesta aplicação tem a função de exaustor. Na Figura 4.8 é possível observar os valores obtidos para as temperaturas do ar de secagem na câmara de secagem.

Observando-se os valores obtidos e mostrados no gráfico da Figura 4.8, percebe-se que a temperatura do ar no interior da câmara de secagem esteve na maior parte do experimento entre 38°C e 45°C, o que é esperado neste período do ano (inverno). Próximo às dez horas e trinta minutos, a temperatura na câmara de secagem atinge o maior valor próximo de 45°C. Isto ocorreu porque, neste horário no dia 30 de junho, a intensidade de irradiação solar incidente chegou a níveis próximos a 850 W/m², (situações meteorológicas atípicas nesta época do ano, considerando que já havia começado o inverno). A temperatura ambiente registrou o menor valor de 23,63°C, durante o experimento, às nove horas e trinta minutos, e

o maior valor de 27,75°C às quinze horas. As temperaturas na câmara do secador solar e a ambiente apresentaram uma média de 39,29°C e 26,41°C, respectivamente, durante a realização da primeira parte do experimento. Outro dado importante de ser mencionado é que os valores apresentados pela Figura 4.8, são valores médios de cada meia hora do processo de secagem em estudo, já que a estratégia de controle da temperatura da câmara é projetada para atuar com valor instantâneo da temperatura. Na Figura 4.9 pode ser observado o gráfico da temperatura instantânea no interior da câmara de secagem durante a realização da primeira parte do experimento 2.

Figura 4.8. Temperatura média do processo de secagem solar, temperatura de processo de secagem elétrica e temperatura ambiente – experimento 2 (secagem mista).

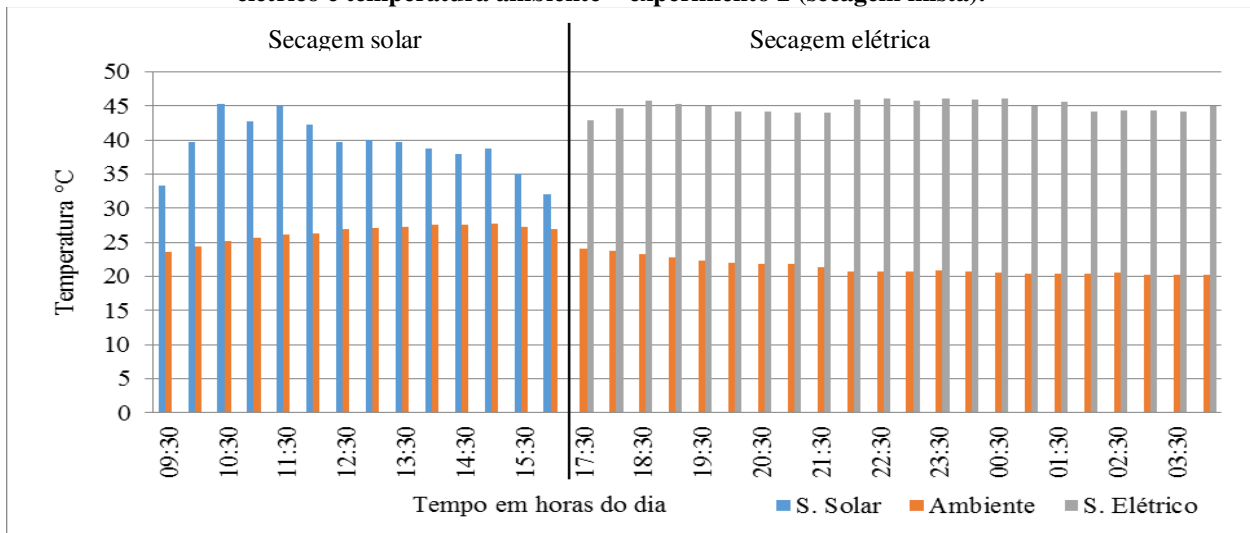
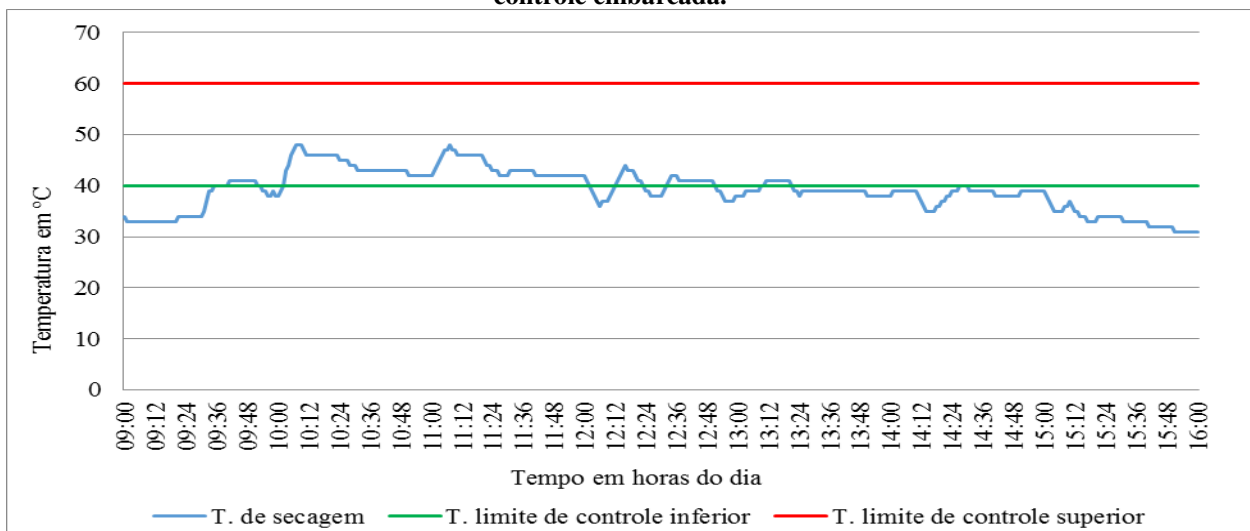


Figura 4.9. Temperatura instantânea do processo de secagem solar, temperatura limite de controle inferior e temperatura limite de controle superior do experimento 2 (secagem mista) com estratégia de controle embarcada.



Na Tabela 4.3 pode-se observar o estado do controle de acionamento do sistema de exaustão, onde podem ser observados os períodos de acionamento e desligamento do exaustor, que teve como objetivo buscar manter a temperatura no interior da câmara de secagem mais estável possível na faixa de temperatura pré-definida no início do processo.

Tabela 4.3. Representação do estado de controle do acionamento do sistema de convecção do secador solar durante a realização do experimento 2 (secagem mista) com estratégia de controle embarcada.

Horário	Temperatura	Acionamento do exaustor	Menor temperatura	Maior temperatura	Temperatura média do período
09h00min as09h34min	$T < 40$	Desligado	33	39	33,83
09h35min as09h40min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
09h41min as09h51min	$40 < T < 60$	Ligado	41	41	41,00
09h52min as09h53min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
09h54min as10h01min	$T < 40$	Desligado	38	39	35,50
10h02min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
10h03min as12h01min	$40 < T < 60$	Ligado	41	48	43,88
12h02min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
12h03min a 12h11min	$T < 40$	Desligado	36	39	37,56
12h12min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
12h13min às 12h22min	$40 < T < 60$	Ligado	41	44	42,30
12h23min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
12h24min às 12h31min	$T < 40$	Desligado	38	39	38,38
12h32min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
12h33min às 12h50min	$40 < T < 60$	Ligado	41	42	41,17
12h51min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
12h52min as13h08min	$T < 40$	Desligado	37	39	38,24
13h09min às 13h10min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
13h11min às 13h20min	$40 < T < 60$	Ligado	41	41	41,00
13h21min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
13h22min às 14h26min	$T < 40$	Desligado	35	39	38,31
14h27min às 14h30min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
14h31min a 16h00min	$T < 40$	Desligado	31	39	35,11

Com as informações apresentadas na Tabela 4.3 é possível determinar o tempo de acionamento do sistema de exaustão durante a realização do experimento 2 (EXP2). O sistema responsável pela convecção forçada do secador solar foi acionado várias vezes em períodos distintos como pode ser observado. Contabilizando o tempo de acionamento e o tempo em que o sistema ficou desativado, pôde-se obter conclusões importantes do controle deste sistema. O tempo em que a temperatura interna da câmara de secagem ficou dentro da faixa pré-definida no início do processo, ou seja, entre 40°C e 60°C foi de 3h17min e o tempo em que a temperatura no interior da câmara foi inferior a 40°C foi de 3h43min, considerando que o experimento foi realizado no período do inverno, estação com irradiação solar e

temperatura ambiente baixas, devido a grande nebulosidade, o desempenho do sistema de controle de temperatura foi bastante eficiente tendo em vista que durante a realização da primeira parte do experimento o produto saiu da teor de umidade inicial de 70% para 53% em base úmida.

As Figuras 4.10 e 4.11 mostram as curvas da média da intensidade da irradiação solar incidente em Campina Grande nos intervalos de trinta minutos e uma hora respectivamente, no dia 30 de junho, medidas pela estação meteorológica do LEIAM/UFCEG. A Figura 4.10 tem por finalidade mostrar a média da intensidade da irradiação solar no momento da medição da massa da amostra do produto e a Figura 4.11 apresenta a média da irradiação solar horária, necessária para determinar a irradiação total por hora (kWh/m^2) durante a realização do experimento.

Figura 4.10. Intensidade média de irradiação solar medida na UFCEG em intervalos de 30 minuto durante a realização da primeira parte do experimento 2.

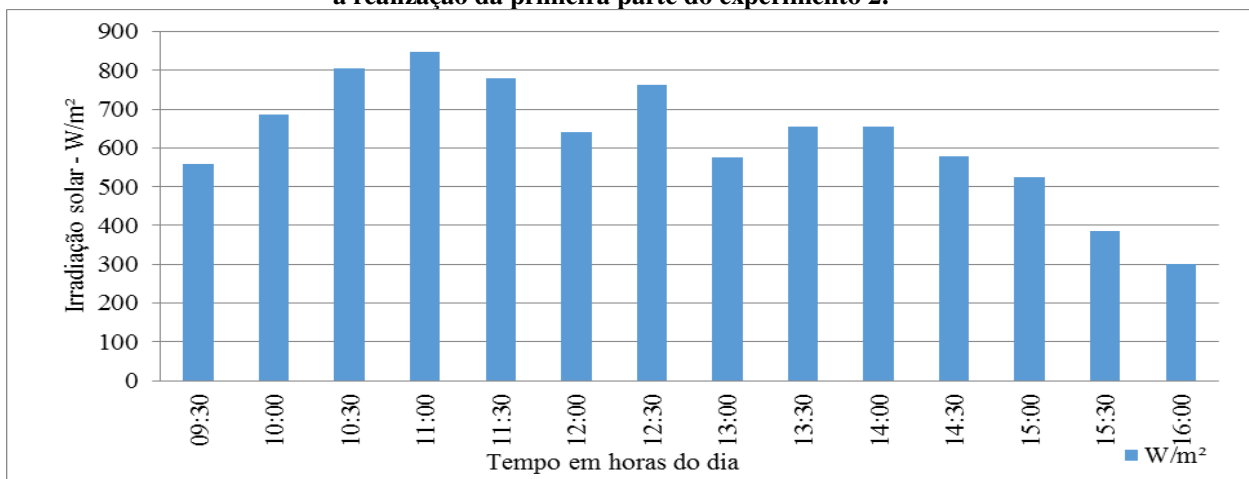
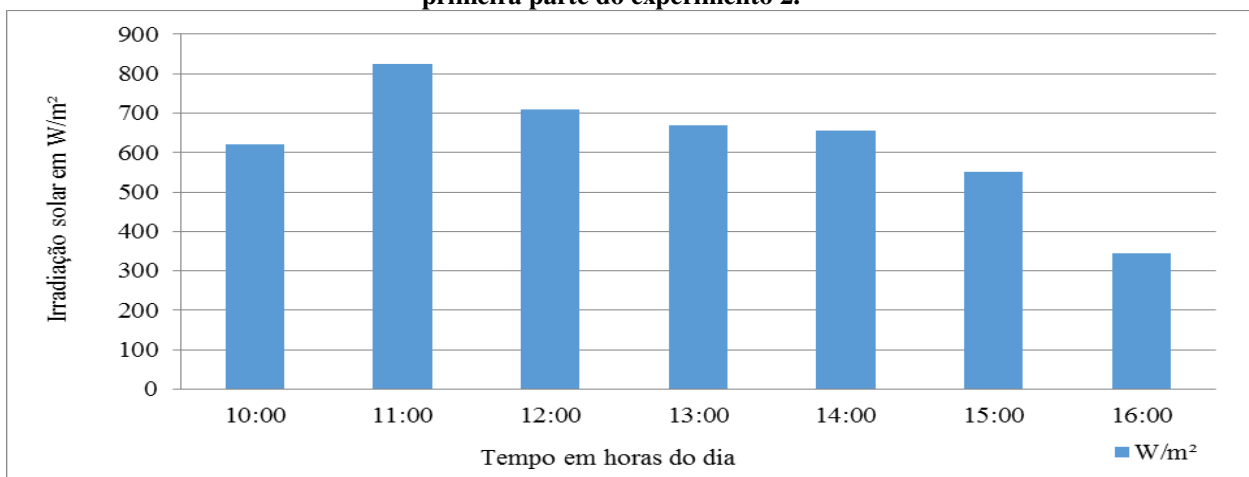
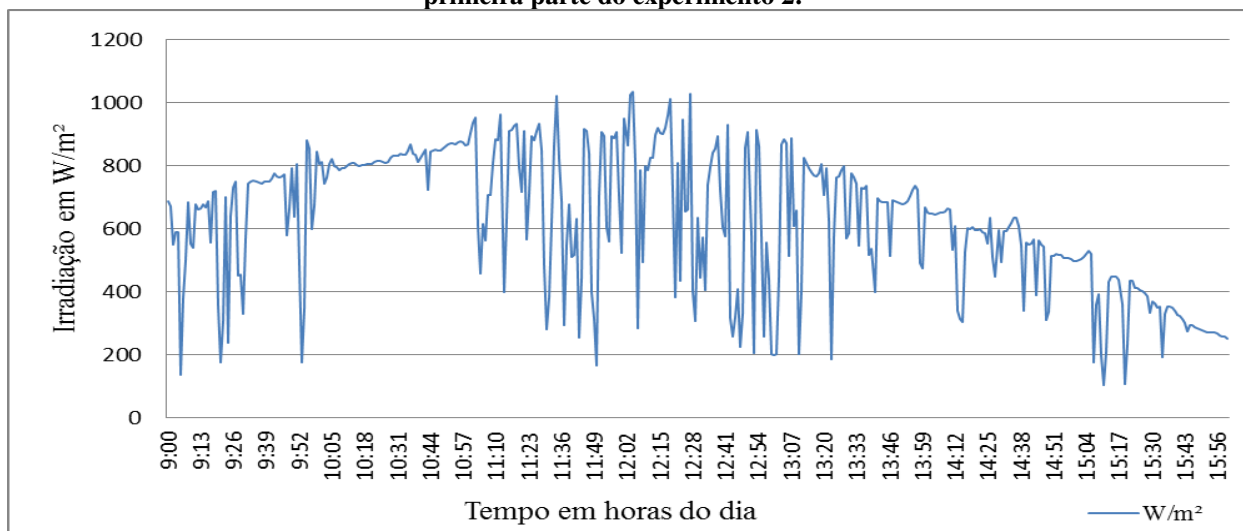


Figura 4.11. Intensidade da irradiação solar média horária medida na UFCEG durante a realização da primeira parte do experimento 2.



Na Figura 4.12 é apresentado o gráfico da irradiação solar instantânea, medida pela estação meteorológica LEIAM/UFCG no dia 30 de junho de 2016 durante a realização da primeira parte do experimento 2 (EXP2).

Figura 4.12 Intensidade instantânea da irradiação solar medida na UFCG durante a realização da primeira parte do experimento 2.



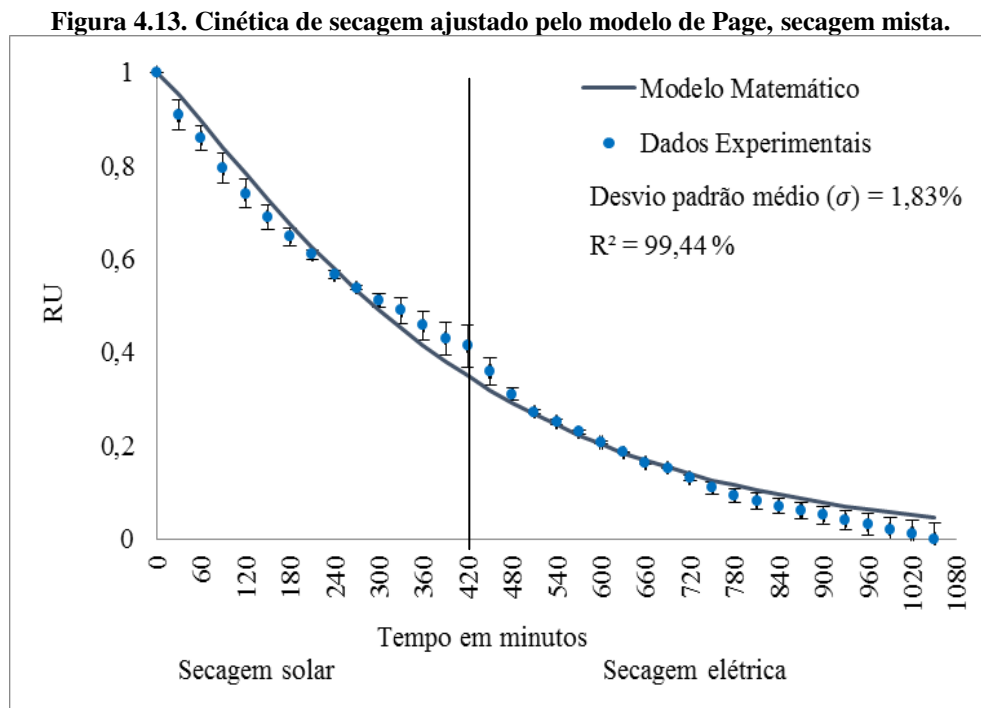
A Figura 4.8 mostra que a máxima temperatura de processo de secagem ocorreu, na segunda parte do experimento 2 (EXP2), quando da utilização do secador elétrico. A temperatura nesta segunda parte do experimento 2 (EXP2) se manteve bastante estável, como já era esperado tendo como mínima 42,9°C às 17h30min do dia 30 de junho de 2016 e 46,10°C em três momentos, 22h30min, 23h30min do dia 30 de junho e às 0h30min do dia seguinte, observando-se então, uma variação de 3,2°C. Com este nível de variação verifica-se mais uma vez a estabilidade do sistema na manutenção das condições apropriadas do ar de secagem. Durante a segunda parte do experimento 2, observou-se que a temperatura ambiente no decorrer do experimento teve como máxima de 24,90°C às 17h30min do dia 30 de junho de 2016 e mínima de 20,17°C às 03h30min do dia seguinte, provocando uma variação de 4,73°C, o que não interferiu na temperatura do processo, comprovando mais uma vez a eficiência do sistema de controle do secador elétrico.

Durante a segunda parte do experimento 2, as temperaturas do ar de secagem do secador elétrico e a ambiente apresentaram uma média de 44,93°C e 21,36°C, respectivamente. Esta etapa do experimento 2, os parâmetros ajustados de temperatura e umidade relativa foram 45°C e 30%, respectivamente, como já mencionados. Ao se observar

a média das temperaturas registradas pelo sistema de controle do secador elétrico pode-se atestar a eficiência do mesmo.

Com os valores obtidos da massa de banana a cada meia hora, tendo a primeira medição às 09h00min do dia 30 de junho e a última no dia seguinte às 03h30min, foram calculados os valores para as variáveis: massa de água (M_a), teor de umidade em base seca (X_{bs}), teor de umidade em base úmida (X_{bu}) e razão de umidade (RU), no experimento iniciado no dia 30 de junho de 2016 e finalizado no dia 01 de julho de 2016 (EXP2). O valor da massa seca foi obtido em testes realizados na estufa da UFCG.

A curva de secagem mostrada na Figura 4.13, foi obtida através dos valores coletados da massa de banana durante a realização do experimento 2, onde os pontos representam os valores de razão de umidade obtidos experimentalmente e a curva em linha cheia representa a cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page.



Nota-se que os valores experimentais obtidos nas primeiras 7 horas do experimento, foram obtidos utilizando o secador solar de exposição indireta. Observa-se que os pontos nos primeiros 90 minutos do experimento, encontram-se abaixo da linha do modelo matemático em relação aos demais. Isto ocorre devido a variação da temperatura no início do processo, ocasionada pela variação da intensidade da irradiação solar. Nas Figuras 4.8 e 4.10 podem ser

observados os níveis de temperatura e irradiação mencionados. Pode ser observado ainda na Figura 4.13, que a partir dos primeiros 180 minutos (3h) o modelo matemático começou a se ajustar melhor aos pontos experimentais, permanecendo até os 270 minutos (4h30min) do experimento. Entre o tempo de 300 minutos (5h00min) e 450 minutos (7h30min) de experimento o modelo matemático se distanciou dos pontos que representam os dados experimentais. As discrepâncias verificadas no gráfico se devem a variação de temperatura no sistema de secagem durante o experimento. Isso ocorre em razão da intermitência da irradiação solar, mostrando com isso, que o sistema de secagem solar é um sistema variável.

A segunda metade do experimento foi realizada no secador elétrico apresentado na Figura 3.20. Na Figura 4.13, pode ser observado que após o início da segunda parte do experimento com apenas 30 minutos de secagem elétrica, no tempo correspondente a 450 minutos (sete horas e trinta minutos) no gráfico, o modelo matemático começa a se ajustar aos dados experimentais, devido a uniformidade da temperatura de processo e se mantém até 750 minutos (12h30min) do experimento. A partir daí os pontos experimentais passam a ficar abaixo da linha que representa o modelo matemático. Este fato deve-se, a cinética de secagem ser mais lenta no final do processo.

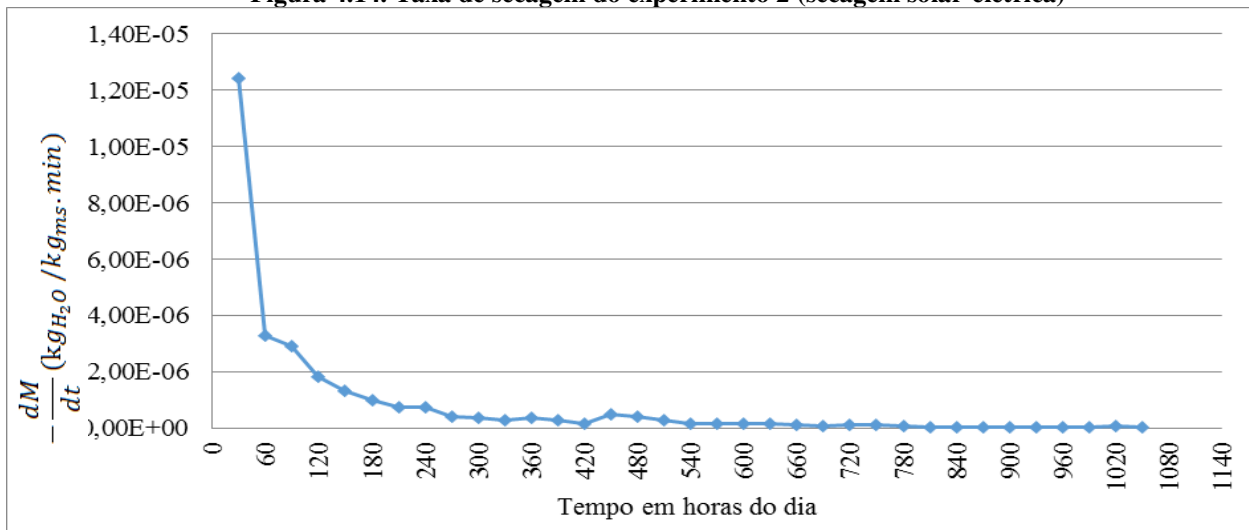
Com relação ao desvio padrão observado ao longo do experimento 2 (secagem solar - elétrica), observou-se que os dados experimentais em comparação com o modelo matemático utilizado para análises dos resultados, apresentou um desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 1,83%. Ao longo do experimento foram observados algumas dispersões dos dados experimentais em comparação com o modelo matemático que destoaram do desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) do experimento. Entre os primeiro 30 minutos e 240 minutos do experimento, os dados experimentais e o modelo matemático apresentaram um desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 2,34% e entre 270 e 420 minutos foi registrado o maior desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 2,6%. A menor média do desvio padrão ($\bar{\sigma}$) apresentada foi entre 450 e 720 minutos, com um desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 0,67%. Entre 750 e 1050 minutos, o desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) foi de 2,1%. Na primeira parte do experimento (secagem solar) o desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) foi de 2,45% e na segunda parte do experimento (secagem elétrica) o desvio padrão foi ($\bar{\sigma}$) de 1,41%.

Como mencionado anteriormente no experimento 1 (EXP1), o secador elétrico utilizado, por sua estabilidade decorrente do seu sistema de controle, possibilita a correção e a

manutenção das propriedades termodinâmicas em níveis de variação muito pequenos, podendo promover a secagem dos produtos muito próximos aos dados ajustados pelo modelo matemático de Page.

A Figura 4.14 representa a taxa de secagem do experimento 2. Observou-se que inicialmente ocorreu uma variação muito acentuada no gráfico ocasionada pela variação acentuada da massa nos primeiros trinta minutos, devido principalmente a variação da temperatura no interior da câmara de secagem em 6°C. Após este primeiro momento a taxa de secagem decresceu de forma exponencial até 420 minutos do experimento, correspondente ao final da primeira parte do experimento 2 (secagem mista). No instante de 450 minutos, correspondente a 30 minutos de secagem elétrica, a taxa de secagem apresenta uma pequena oscilação, devido principalmente a variação da temperatura de secagem de 12°C, ocasionada em decorrência da baixa temperatura registrada no final da primeira parte do experimento e início da segunda parte. A partir deste ponto, a variação da taxa de secagem permanece praticamente constante.

Figura 4.14. Taxa de secagem do experimento 2 (secagem solar-elétrica)



Para calcular a eficiência mássica do processo de secagem em EXP2, deve ser utilizada a Equação 3.40. Substituindo-se os valores da massa inicial e final da banana no numerador e a massa total de água da banana no denominador. Utilizando esses dados obtêm-se o cálculo da eficiência mássica do processo (η_p). Na Tabela 4.4 pode ser observado os valores das massas inicial, final e massa de água, bem como o cálculo da eficiência mássica do processo de secagem do experimento 2, secagem mista (solar-elétrica).

Tabela 4.4 Valores da massa inicial, massa final, massa de água e eficiência mássica do processo de secagem mista (experimento 2).

m_{inicial} (g)	m_{final} (g)	$m_{\text{água}}$ (g)	η_{p1} (%)
30,4	12	21,28	86,46

A elevada eficiência mássica do processo de secagem obtida foi um indicativo importante da eficiência do processo utilizado, que em conjunto com outros indicativos avaliou o sistema de secagem mista na transferência de energia para o processo

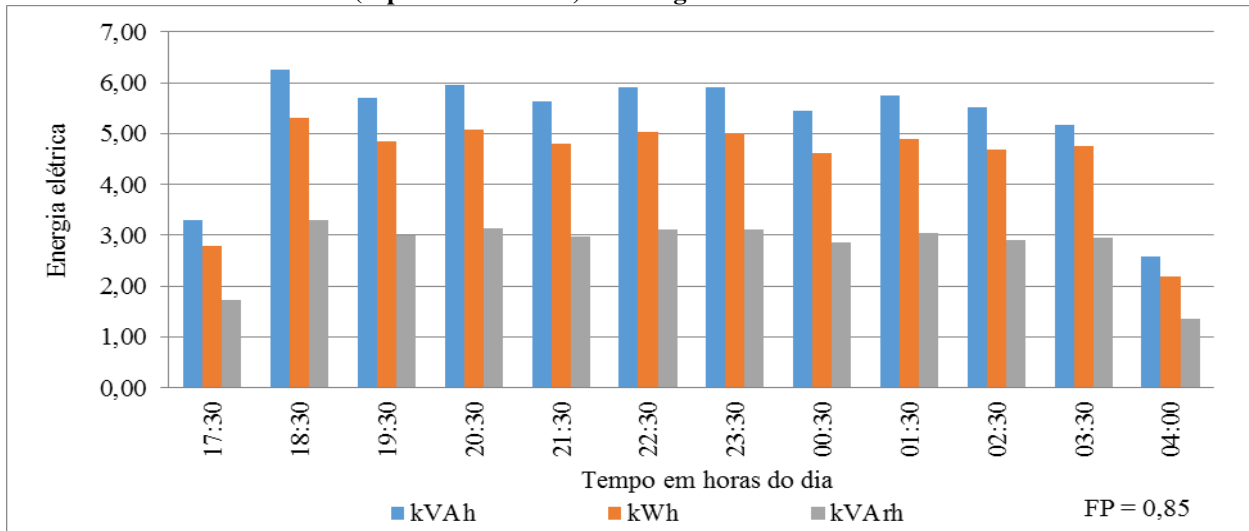
O sistema de secagem elétrico utilizado neste experimento é o mesmo utilizado no experimento 1 (EXP1), portanto não será apresentado neste segundo experimento os gráficos referentes ao perfil de carga médio e nem o instantâneo, tendo em vista o caráter redundante da análise, porem será apresentado o consumo da energia elétrica durante a realização do experimento.

Na Figura 4.15, é apresentado o gráfico de consumo de energia utilizada no experimento 2. Neste gráfico, a exemplo do gráfico da Figura 4.7, podem ser observadas algumas informações relevante ao processo. A primeira meia hora foi o período inicial de funcionamento, na qual observou-se um consumo de energia de $E_S = 3,29$ kVAh, $E_P = 2,79$ Kwh e $E_Q = 1,73$ kVArh. Apesar de numericamente inferior as outras amostragens do gráfico, é bastante significativa por se tratar de meia hora de funcionamento. Este valor do consumo de energia deve-se ao fato da partida dos sistemas que compõem o secador, já comentado em momentos anteriores.

O secador elétrico durante o experimento 2, apresentou uma média de consumo de energia elétrica de $E_S = 5,26$ kVAh, $E_P = 4,5$ kWh e $E_Q = 2,79$ kVArh, e um consumo total de energia elétrica de $E_S = 63,14$ kVAh, $E_P = 54,04$ kWh e $E_Q = 33,49$ kVArh, apresentando um fator de potência médio (FP) de 0,85, compreendendo o período de estabilização e o de processo, totalizando 11 horas de funcionamento ininterruptos. O menor consumo de energia foi de $E_S = 5,16$ kVAh e $E_P = 4,76$ kWh no horário entre 02h30min e 03h30min e o maior foi de 6,26 kVAh e 5,32kWh das 17h30min as 18h30min, que dá uma variação máxima de $E_S = 1,1$ kVAh e $E_P = 0,56$ kWh, ratificando que quando o secador atinge o seu estágio de equilíbrio, a variação média da energia consumida é muito pequena, apesar da variação

instantânea da potência ao longo do experimento ser bastante acentuada, como mostrado anteriormente no experimento1 (EXP1)

Figura 4.15. Gráfico do consumo de energia do secador elétrico referente ao experimento 2 (EXP 2) (experimento misto) solar seguido de elétrico.



Para fins de avaliação econômica do sistema de secagem mista, bem como avaliações comparativas com outros sistemas de secagem e a exemplo do experimento 1, será considerado como energia útil ao processo, apenas aquela que foi desprendida efetivamente para a secagem do produto, que no caso deste trabalho é a banana (*Musa spp.*). Sendo assim, a potência utilizada na fase inicial não será contabilizada, como também será considerada apenas a energia desprendida na secagem do produto até o valor imediatamente inferior a 25% da umidade em base úmida. Este critério visa poder avaliar comparativamente de forma mais aproximada possível da realidade os sistemas de secagem envolvidos nesta pesquisa (secagem solar, secagem mista e secagem elétrica). Outro dado importante de ser mencionado é que para o cálculo do consumo específico de energia foi utilizado a energia ativa expressa em kWh, porque a energia aparente expressa em kVAh pode ser reduzida fazendo a correção do fator de potência (FP). A potência ativa é a que de fato realiza trabalho útil.

Considerando estes critérios, o período a ser analisado é compreendido entre as 17h30min do dia 30 de junho de 2016 a 03h30min do dia 01 de julho de 2016, totalizando 10 horas de funcionamento do secador elétrico. Na Figura 4.15, pode ser observado o período de análise compreendendo o intervalo de consumo das 18h30min as 03h30min. Com estas informações foi possível determinar o consumo de energia elétrica da segunda parte do experimento 2, que foi de 49,05 kWh.

A energia térmica recebida pelo secador solar utilizada para secagem na primeira parte do experimento 2, foi de 4.377,48 Wh/m². Conhecendo a área de incidência da irradiação solar no coletor do secador solar, é possível determinar a energia térmica recebida pelo sistema de secagem solar. O sistema de secagem solar utilizado nesta pesquisa possui um coletor com área de incidência solar de um metro quadrado. Com essas informações, foi possível determinar a energia térmica incidida no sistema de secagem solar, multiplicando-se a irradiação média horária pela área de incidência. Especificamente para este secador, como a área de incidência é um valor unitário, a energia térmica recebida no sistema é a própria irradiação média horária. Com base nestas informações é possível determinar o consumo específico de energia do experimento 2 (EXP2), que forneceu informações relevantes para a avaliação econômica do sistema de secagem mista.

Convertendo para kWh a energia térmica, o valor da energia utilizada pelo sistema de secagem solar na primeira parte do experimento foi de 4,38 kWh. Após a determinação da energia térmica utilizada na primeira parte do experimento 2 e a energia elétrica da segunda parte do referido experimento, utilizando a Equação 3.16 apresentada no capítulo 3, foi possível determinar o consumo específico de energia (CEE) para o experimento de secagem mista.

Assim, com os dados do processo de secagem, considerando o valor total da amostra utilizada no experimento 2 que foi de 300 g, a energia térmica recebida pela irradiação solar durante a primeira parte do experimento 2 e o consumo de energia elétrica da segunda parte do experimento 2 no intervalo das 17h30min do dia 30 de junho as 03h30min do dia 01 de julho, pode-se assim determinar o consumo específico de energia (CEE).

Com as informações do consumo da energia elétrica e do valor de energia térmica entregue ao sistema foi possível determinar a energia consumida (EC), que é o somatório da energia térmica da primeira parte do experimento, mais a energia elétrica consumida na segunda parte do experimento. Na Tabela 4.5 pode ser observado os valores da energia utilizada (energia elétrica, energia térmica e energia consumida), teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto, massa inicial do produto, bem como o cálculo do consumo específico de energia do processo de secagem do experimento 2.

Tabela 4.5 Valores da energia utilizada, teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia do processo de secagem mista (EXP 2).

Informações elétricas do consumo				Dados do processo						
E_S (kVAh)	E_P (kWh)	E_Q (kVArh)	FP	ET (kWh)	EE (kWh)	EC (kWh)	U_i (%)	U_f (kg)	M_i (%)	CEE (kW/kg)
63,14	54,04	33,49	0,85	4,38	49,05	53,43	70	24,63	0,3	295,87

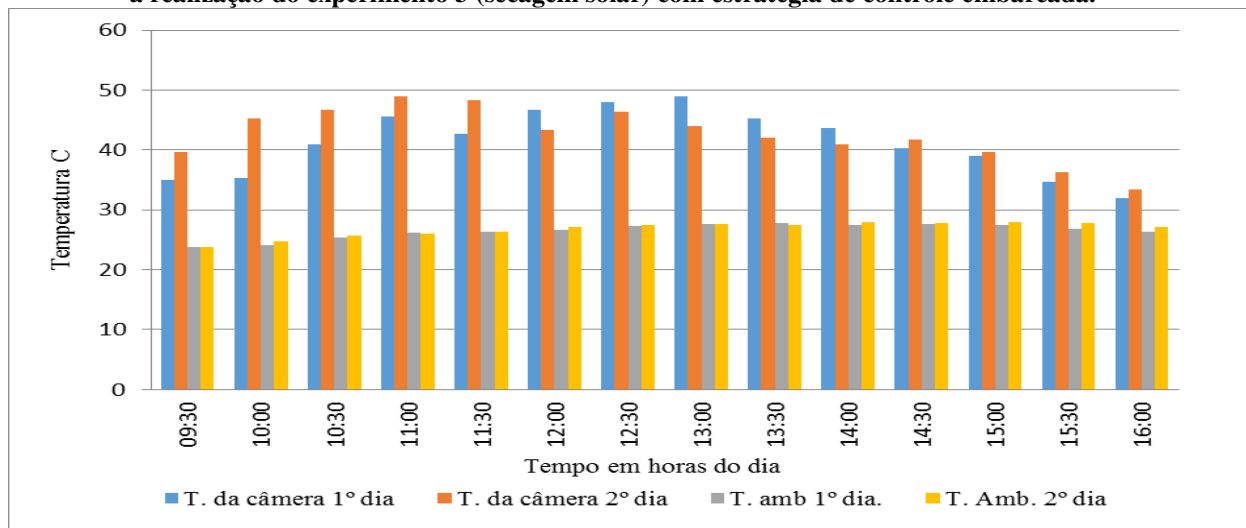
O CEE do experimento 2 foi de 295,87 kWh/kg de energia por ciclo (batelada). Com esse valor é possível avaliar comparativamente a viabilidade econômica dos sistemas de secagem elétrico, misto e solar, objeto desta pesquisa.

4.1.3 Experimento 3 (EXP3), (secagem solar com controle).

Neste experimento foi utilizado o sistema de controle da temperatura da câmara de secagem do secador solar adotado na primeira parte do experimento 2 (EXP2). Esta inovação teve por objetivo manter a temperatura do ar de secagem no interior da câmara de secagem mais estável possível, mesmo em condições pouco favoráveis como no caso do inverno, e com isto buscou-se obter um produto final com características comerciais de boa qualidade, tornando sistema mais competitivo em comparação com outros sistemas de secagem. A estratégia adotada neste experimento 3 é a mesma adotada no experimento 2. Consiste em controlar o acionamento do sistema de exaustão responsável pela convecção forçada do ar de secagem, para buscar manter uma faixa de temperatura de secagem mais estável e adequada ao produto a ser seco. O acionamento do sistema de convecção forçada só será feito na faixa de temperatura compreendida entre 40°C e 60°C, medida no interior da câmara de secagem, ou seja, quando a temperatura do interior da câmara for inferior a 40°C, o sistema de exaustão não será acionado. Após atingir 40°C, o sistema será acionado e permanecerá nesta condição até atingir 60°C. Após os 60°C, o sistema será desligado, voltando a atuar apenas na faixa de temperatura estabelecida.

Na Figura 4.16, são mostrados os valores de temperatura do ar de secagem obtidos pelo sistema de aquisição de dados do secador solar, como também os dados de temperatura ambiente fornecida pela estação meteorológica.

Figura 4.16. Temperaturas médias do processo de secagem solar e temperatura ambiente medidas durante a realização do experimento 3 (secagem solar) com estratégia de controle embarcada.

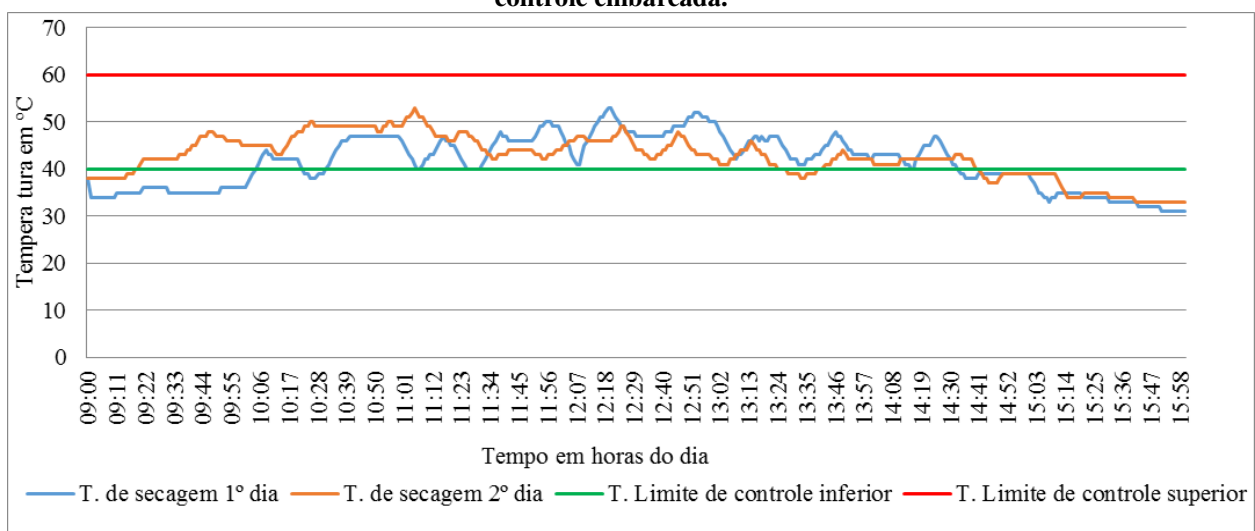


Inicialmente a análise do experimento 3 será realizada mediante verificação dos dados de temperatura fornecida pelo sistema de aquisição do secador solar. O sistema de secagem solar em estudo utiliza um sistema de convecção forçada por meio de *cooler* instalado na saída da câmara de secagem como mencionado anteriormente. Seu acionado é feito por intermédio de um mini painel fotovoltaico, que fornece energia elétrica necessária à movimentação do *cooler*, que nesta aplicação tem a função de exaustor. Na Figura 4.16, podem-se observar os valores obtidos para as temperaturas do ar de secagem medidos na câmara de secagem, que serão analisadas logo a seguir.

Observando-se os valores apresentados no gráfico da Figura 4.16, percebe-se que a temperatura média do ar no interior da câmara de secagem esteve na maior parte dos testes entre 40°C e 49°C, com exceção das primeiras e das últimas medições realizadas no dia, fato já esperado para o processo de secagem neste período do ano. Próximo às treze horas do dia 15 de junho, a temperatura média na câmara de secagem atinge o maior valor de 49°C. Isto ocorreu porque no período compreendido entre doze e treze horas, a intensidade de irradiação solar incidente manteve-se em níveis elevado de irradiação, com variação de 760 W/m² a 840 W/m² (situações meteorológicas atípicas nesta época do ano, considerando que estava no final do outono e início do inverno). A temperatura média ambiente registrou o menor valor de 23,85°C durante o experimento às nove horas e trinta minutos, e o maior valor de 27,78°C às quinze horas. As temperaturas na câmara do secador solar e a ambiente apresentaram uma média de 41,78°C e 26,51°C, respectivamente, durante o primeiro dia do experimento.

No segundo dia do experimento 3, dia 16 de junho de 2016, as condições meteorológicas nas primeiras horas foram mais favoráveis em comparação com as do primeiro dia de experimento. Foi observado valores de temperatura na maior parte do tempo entre 41°C e 49°C, com exceção da primeira meia hora e da última hora do experimento, que registrou as menores temperaturas, mas muito significativas para a estação do inverno. A maior temperatura do segundo dia do experimento 3 foi registrada às onze horas devido ao alto índice de irradiação que se manteve em níveis bem expressivos a partir das dez e meia da manhã e se mantendo até próximo das treze horas, com variações de 763 W/m² a 873 W/m², como pode ser observado na Figura 4.18. Um dado importante a ser mencionado é que os valores apresentados pelas Figuras 4.16 e 4.18, são valores médios das temperaturas e irradiação, com média realizada a cada meia hora, a partir dos dados fornecidos pelo sistema de aquisição do secador solar e pela estação meteorológica do LEIAM/UFCG. Neste experimento 3 como a exemplo do experimento 2, também foi adotada uma estratégia de controle da temperatura da câmara, para manter a temperatura mais estável possível. A mesma foi projetada para atuar com valor instantâneo da temperatura medidos na câmara de secagem. Na Figura 4.17 pode ser observado o gráfico do comportamento da temperatura instantânea no interior da câmara de secagem durante a realização da primeira parte do experimento 3. Na Tabela 4.6 pode-se observar o estado do controle de acionamento do sistema de exaustão, onde pode ser visto os períodos de acionamento e desligamento do exaustor. A estratégia de controle tem como objetivo buscar manter a temperatura no interior da câmara de secagem mais estável possível, para a faixa de temperatura pré-definida no início do processo.

Figura 4.17. Temperatura instantânea do processo de secagem solar, temperatura limite de controle inferior e temperatura limite de controle superior do experimento 3 (secagem solar) com estratégia de controle embarcada.



Na Tabela 4.6 pode-se verificar o funcionamento do controle da temperatura da câmara de secagem. A partir destas informações, pode-se determinar o tempo de acionamento do sistema de convecção forçada durante a realização do experimento 3 (EXP3). O sistema de exaustão do secador solar, como pode ser observado, foi acionados várias vezes em função da temperatura de controle. Ao verificar o tempo de acionamento do sistema de exaustão e o tempo em que o mesmo ficou desativado, foi possível tirar conclusões relevantes da estratégia de controle adotada para o sistema de secagem solar utilizado neste experimento. O período de acionamento (período compreendido em que o exaustor está em funcionamento) corresponde ao tempo em que a temperatura interna da câmara de secagem permaneceu dentro da faixa pré-definida no início do processo, entre 40°C e 60°C. O tempo de acionamento do sistema de exaustão no primeiro dia do experimento 3 foi de 4h24min e o tempo em que o sistema de exaustão ficou desativado no primeiro dia foi de 2h36min. Já no segundo dia, as condições meteorológicas foram melhores, registrando médias de temperatura superiores ao primeiro dia e conseqüentemente alterando os períodos de acionamento do sistema de controle de temperatura. No segundo dia, o tempo de acionamento do sistema de exaustão foi de 5h12min e o tempo em que o mesmo ficou sem atuar foi de 1h48min. Mesmo sendo o período de inverno, o experimento 3 obteve resultados satisfatórios considerando o objetivo do experimento, que foi de obter um produto final dentro das especificações de umidade estabelecidas pela norma vigente, que determina que o produto seco para ser comercializado deve ter umidade inferior a 25% em base úmida.

Como mencionado anteriormente o sistema de controle da temperatura do interior da câmara de secagem foi projetado para acionar o sistema de exaustão com a leitura dos dados instantâneo da temperatura, fornecido por intermédio do sensor de temperatura, a plataforma do Arduino.

Nas Figuras 4.18 e 4.19 são apresentadas os gráficos da intensidade média da irradiação solar incidente em Campina Grande nos dias 15 e 16 de junho com intervalos de trinta minutos e de uma hora respectivamente, fornecidas pela estação meteorológica do LEIAM/UFCG. Com os dados fornecidos pela Figura 4.18, é possível observar a média da intensidade da irradiação solar no momento da medição da massa do produto e a Figura 4.19 apresenta a média da irradiação solar horária, necessária para determinar a irradiação total por hora (kWh/m²) durante a realização do experimento.

Tabela 4.6. Representação do estado de controle do acionamento do sistema de convecção do secador solar durante a realização do experimento 3 (secagem solar) com estratégia de controle embarcada.

Dias	Horário	Temperatura	Acionamento do exaustor	Menor temperatura	Maior temperatura	Temperatura média do período
15/06	09h00min as 10h03min	$T < 40$	Desligado	34	39	35,34
	10h04min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
	10h05min às 10h21min	$40 < T < 60$	Ligado	41	44	42,18
	10h22min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
	10h23min às 10h30min	$T < 40$	Desligado	38	39	38,63
	10h31min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
	10h32min às 12h24min	$40 < T < 60$	Ligado	41	47	44,89
	12h25min às 12h30min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
	12h31min às 14h14min	$T > 40$	Ligado	41	53	46,16
	14h15min às 14h16min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
	14h17min às 14h32min	$40 < T < 60$	Ligado	41	47	44,13
	14h33min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
	14h33min às 16h00min	$T < 40$	Desligado	31	39	35,05
	16/06	09h00min as 09h17min	$T < 40$	Desligado	38	39
09h18min as 09h19min		$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
09h20min às 13h23min		$40 < T < 60$	Ligado	41	53	45,61
13h24min às 13h27min		$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
13h28min as 13h38min		$T < 40$	Desligado	38	39	38,80
13h39min as 13h41min		$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
13h42min as 14h39min		$40 < T < 60$	Ligado	41	44	41,90
14h40min as 14h41min		$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
14h42min as 16h00min		$T > 40$	Ligado	33	39	35,70

Figura 4.18. Intensidade média de irradiação solar medida na UFCG em intervalos de 30 minutos durante a realização do experimento 3 (secagem solar com controle)

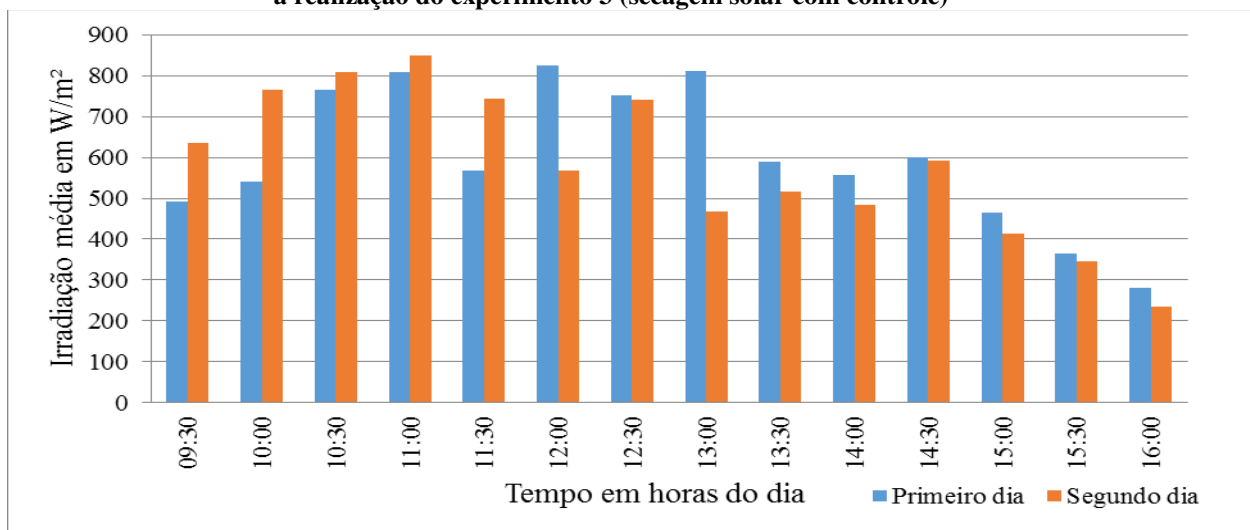
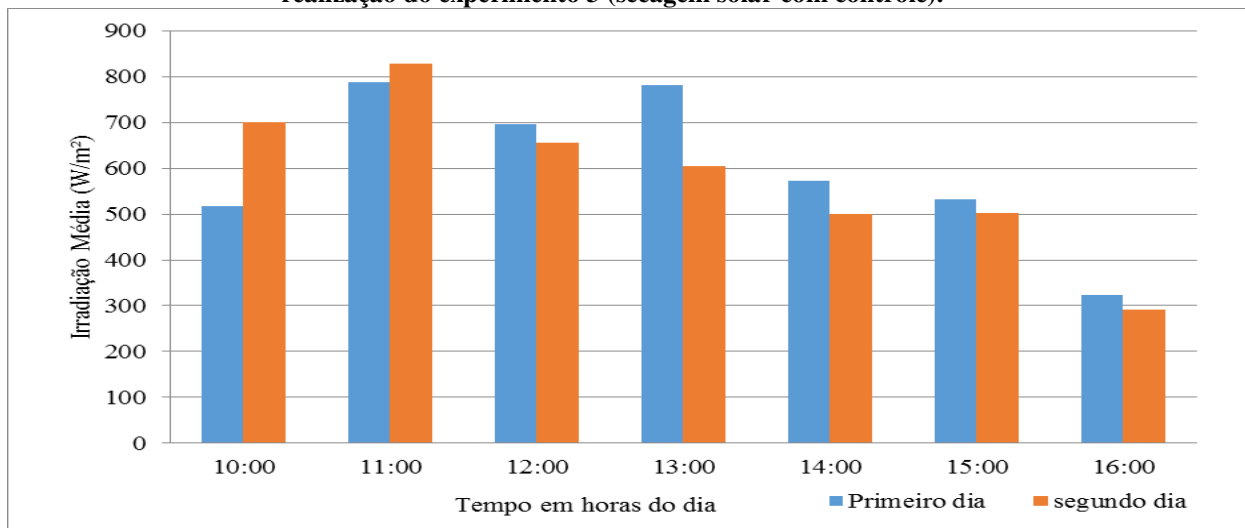


Figura 4.19. Intensidade média de irradiação solar medida na UFCG em intervalo de uma hora durante a realização do experimento 3 (secagem solar com controle).



Nas Figuras 4.20 e 4.21 são apresentados os gráficos da irradiação solar instantânea medida pela estação meteorológica LEIAM/UFCG nos dias 15 e 16 de junho de 2016. Estes gráficos têm como finalidade apresentar o comportamento do perfil da irradiação solar durante a realização do experimento 3 (EXP3).

Figura 4.20. Intensidade instantânea da irradiação solar medida no primeiro dia de realização do experimento 3 (secagem solar com controle).

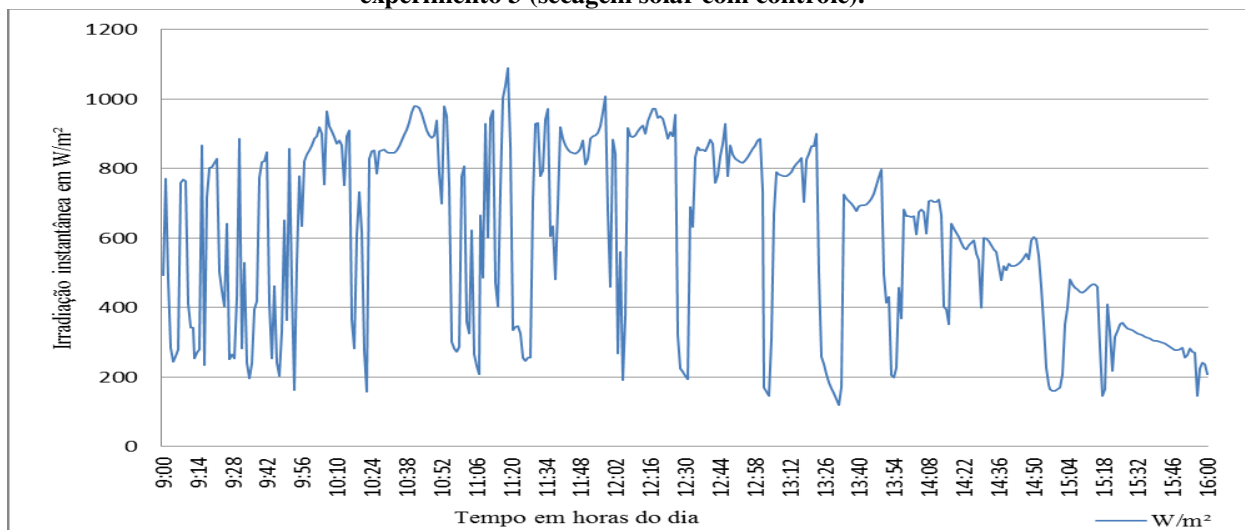
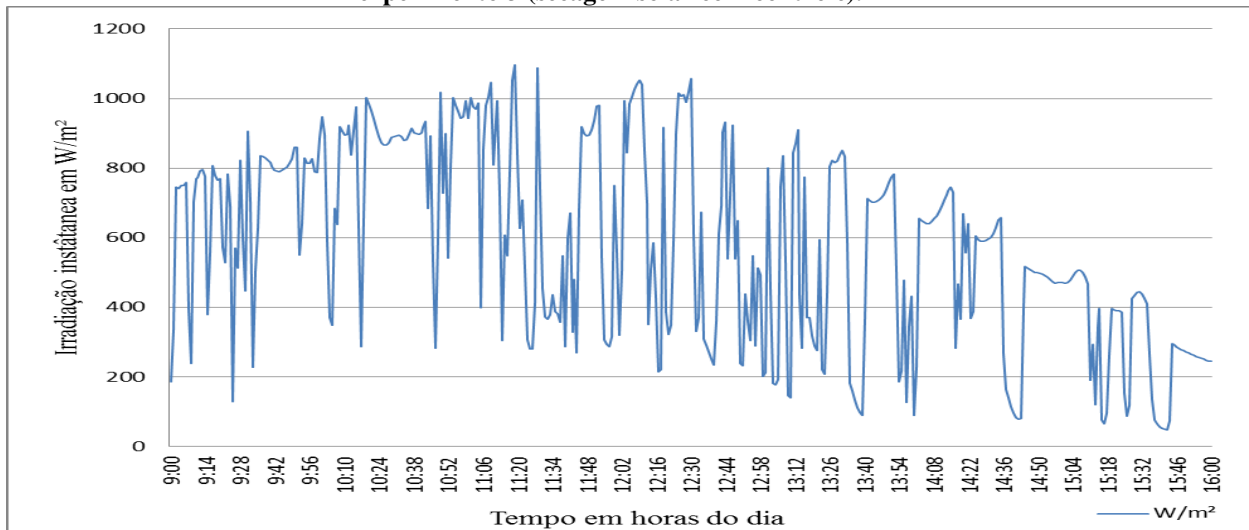


Figura 4.21. Intensidade instantânea da irradiação solar medida no segundo dia de realização do experimento 3 (secagem solar com controle).



A máxima temperatura média (média realizada a cada dez minutos da temperatura registrada no interior da câmara de secagem) de processo de secagem do experimento 3 foi de $51^{\circ}C$, esta temperatura foi registrada nos dois dias do experimento em três horários distintos compreendidos entre as onze hora e treze horas do dia.

A variação da temperatura durante a realização do experimento 3, foi dentro do esperado para um sistema de secagem solar. No primeiro dia foi registrada como temperatura mínima de processo $31^{\circ}C$ as dezesseis horas, provocando uma variação de $20^{\circ}C$ na temperatura interna da câmara. No segundo dia foi registrada uma temperatura mínima de $33^{\circ}C$, também às dezesseis horas, que por sua vez provocou uma variação de $18^{\circ}C$ na temperatura interna da câmara.

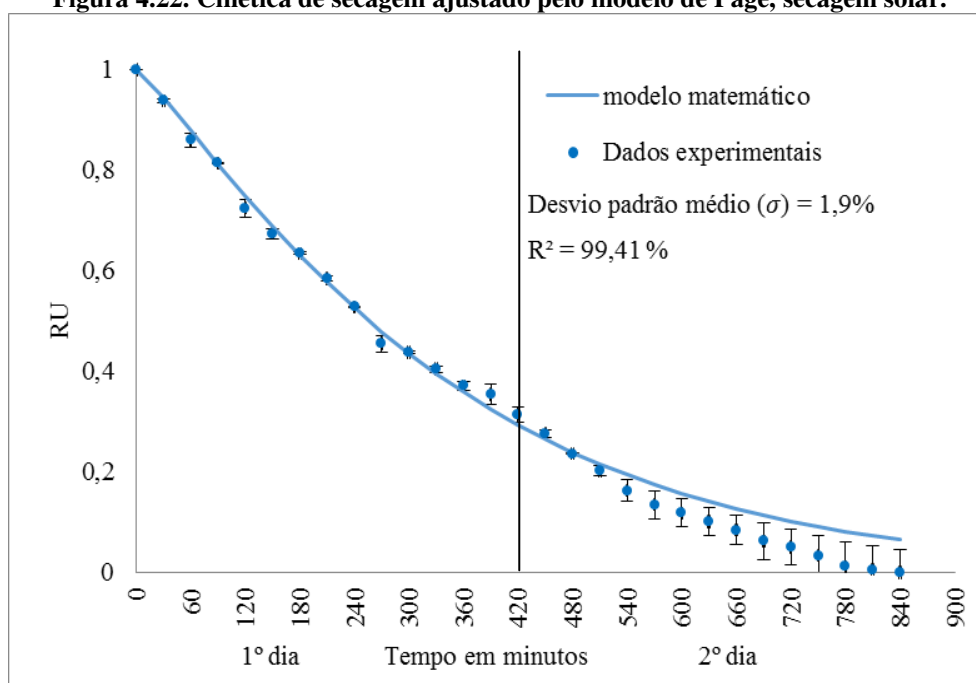
As médias das temperaturas ambiente registradas nos dias de realização do experimento 3 tiveram um comportamento muito parecido. A maior média da temperatura ambiente registrada no primeiro dia do experimento foi de $28,05^{\circ}C$ as 14h30min e a mínima foi de $24,09^{\circ}C$ as 09h30min representando uma variação de $3,96^{\circ}C$. No segundo dia a máxima temperatura ambiente registrada foi de $27,72^{\circ}C$ as 13h30min e mínima de $23,85^{\circ}C$, a variação neste dia foi de $3,87^{\circ}C$. Como observado, a temperatura ambiente durante os dois dias de realização do experimento teve um comportamento muito semelhante.

Com os valores da variação da massa da banana coletados a cada meia hora, sendo a primeira medição às 09h00min do dia 15 de junho e a última as 16h00 do dia seguinte, foi

obtida a curva de secagem apresentada na Figura 4.22, onde os pontos representam os valores de razão de umidade obtidos experimentalmente e a curva em linha cheia representa a cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page.

Na Figura 4.22, observa-se que durante as primeiras horas do experimento 3, os pontos encontram-se próximos a linha que representa o modelo matemático ajustado por Page, demonstrando que a temperatura de processo apresentava-se estável com pequenas oscilações, contribuindo para que o modelo matemático se ajustasse bem as condições iniciais. Este fato foi possível devido a atuação do controle de temperatura como pode ser observado na Tabela 4.6, que durante as primeira horas desativou a convecção forçada enquanto a temperatura da câmara de secagem estava abaixo do valor mínimo pré-definidos para o processo mantendo a temperatura mais estável.

Figura 4.22. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, secagem solar.

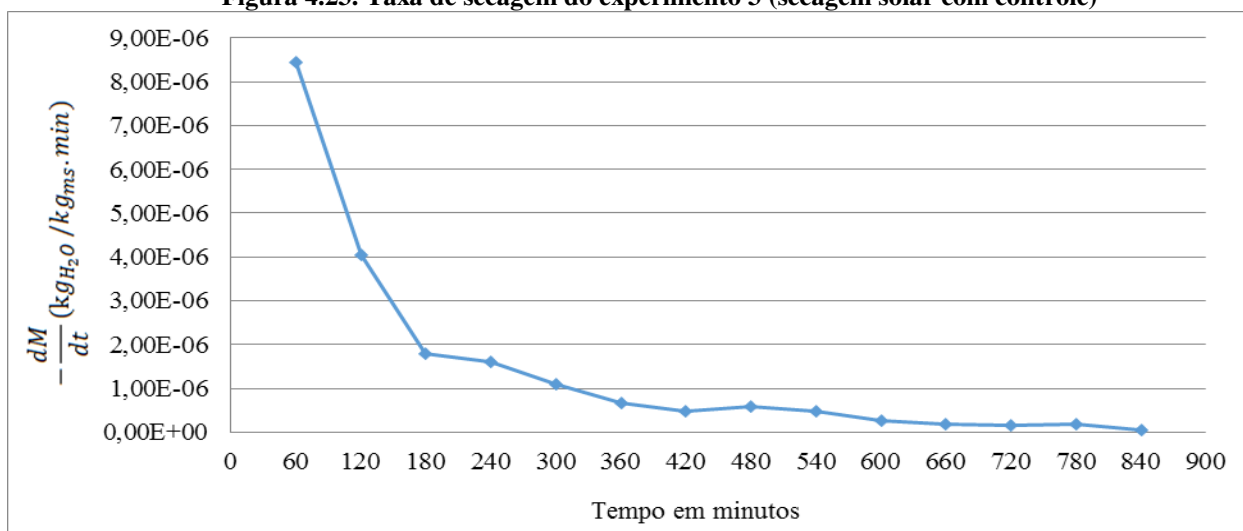


Nas Figuras 4.16 e 4.18 podem ser observados os níveis de temperatura e irradiação mencionados. A partir do tempo correspondente a 330 minutos (5h30min), o modelo matemático passou a não mais se ajustar aos pontos que representam a razão de umidade, justamente no momento em que começou a diminuir a irradiação média e a temperatura, provocando variação da temperatura interna da câmara de secagem, como pode ser observado nas Figuras 4.16 e 4.18. Isto dificultou o processo de secagem, permanecendo assim até o final do primeiro dia, no instante correspondente a 420 minutos e até 480 minutos, que

corresponde a 8h00min de experimento e primeira hora do experimento do segundo dia. Após o tempo de 570 minutos ou nove horas e meia de experimento, observou-se que os pontos começaram a se distanciarem para baixo da curva que representa o modelo matemático. Isto ocorreu porque neste período, a cinética de secagem foi mais lenta, devido à dificuldade de remover massa de água em função do baixo valor de umidade do produto apresentado nas últimas horas do experimento em comparação com as primeiras, indicando que a cinética de secagem no primeiro dia foi maior. No primeiro dia foram retiradas mais gramas de água da banana, enquanto no segundo dia foram retirados menos gramas de água da banana devido à facilidade de remoção da água no início do processo, quando o teor de umidade ainda está muito elevado.

Com relação ao desvio padrão observado ao longo do experimento 3 (secagem solar com controle), observou-se que os dados experimentais em comparação com o modelo matemático utilizado para análises dos resultados, apresentou um desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 1,9%. Ao longo do experimento foram observados algumas dispersões dos dados experimentais em comparação com o modelo matemático que destoaram do desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) do experimento. Entre os primeiro 30 minutos e 150 minutos do experimento, os dados experimentais e o modelo matemático apresentaram o desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 0,92% e a menor média do desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) foi de 0,89%, ocorrendo entre 180 e 420 minutos. Entre 450 e 540 minutos, o desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) foi de 1% e a maior média do desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) foi entre 570 e 840 minutos com 3,67%. No primeiro dia do experimento, o desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) foi de 0,9% e no segundo dia de experimento o desvio padrão foi ($\bar{\sigma}$) de 2,91%.

A Figura 4.23 representa a taxa de secagem do experimento 3 (secagem solar com controle). Observou-se que inicialmente a taxa de secagem decresce rapidamente até o tempo de 180 minutos. Após este período ocorreu uma redução menos acentuada na taxa de secagem até o tempo de 420 minutos, devido principalmente a variação da irradiação solar que neste período foi próximo a 240W/m², o que provocou uma variação de 3°C na temperatura interna da câmara de secagem. A partir deste momento a taxa de secagem apresenta pequenas oscilações até o tempo de 600 minutos, após este período a taxa de secagem permanece praticamente constante até o final do experimento.

Figura 4.23. Taxa de secagem do experimento 3 (secagem solar com controle)

Para calcular o rendimento térmico do equipamento utilizando apenas os dados de temperatura, foram utilizadas as Equações 3.24 e 3.27. Com os dados do processo de secagem do experimento 3, foi determinado o valor do rendimento térmico do secador solar pelo método da potência útil. Como a área de incidência da irradiação solar sobre a cobertura transparente do coletor solar é de 1 m², foi possível determinar a energia térmica incidida no sistema de secagem solar, multiplicando-se a irradiação média horária pela área de incidência. Na Tabela 4.7, pode ser visto os dados do processo de secagem: vazão mássica, variação de temperatura, potência útil, média da irradiação solar e o rendimento térmico do secador solar durante a realização do experimento 3.

Tabela 4.7. Dados obtidos do processo de secagem do experimento 3- (secagem solar com controle): vazão mássica, variação de temperatura, potencia útil, média da irradiação solar, rendimento térmico do secador

\dot{m}_1 (kg/s)	$\overline{\Delta T}$ (K)	c_p ($\frac{kJ}{kg.K}$) a 300K	P_{u3} (W)	\overline{G} (W/m ²)	η_{t3} (%)
0,009795	16,45	1,0048	177,02 W	592,32	27,35

Para o cálculo da eficiência mássica do processo de secagem em EXP3, foi utilizada a Equação 3.40. Substituindo-se os valores da massa inicial e final da banana no numerador e a massa total de água da banana no denominador, obtêm-se o cálculo da eficiência mássica do processo (η_p). Na Tabela 4.8 pode ser observado os valores das massas inicial, final e massa de água, bem como o cálculo da eficiência mássica do processo de secagem do experimento 3.

Tabela 4.8. Valores da massa inicial, massa final, massa de água e eficiência mássica do processo de secagem solar (experimento 3).

m_{inicial} (g)	m_{final} (g)	$m_{\text{água}}$ (g)	η_{p3} (%)
30,8	13	20,94	85,00

A elevada eficiência mássica do processo de secagem obtida foi um indicativo importante da eficiência do processo utilizado, que demonstrou que a utilização da energia solar como fonte energética é competitiva, sendo compatível com eficiências equivalentes a de processos de secagem que usam eletricidade.

Como um dos objetivos deste trabalho e o estudo da viabilidade econômica dos sistemas de secagem, e para verificar a funcionalidade da estratégia de controle desenvolvida para o sistema de secagem solar, foi considerado como energia útil ao processo de secagem, toda a energia desprendida da irradiação solar, incidida sobre o coletor do secador solar, utilizado nesta pesquisa para a secagem do produto. Sendo assim, a energia considerada útil ao processo foi contabilizada nos dois dias do experimento das nove horas as dezesseis horas dos dias 15 e 16 de junho de 2016, totalizando 14h00min de exposição do secador solar à irradiação solar.

A energia térmica recebida pelo secador solar utilizada para secagem durante a realização do experimento 3, foi de 4.209,31 Wh/m² no primeiro dia de experimento e de 4.083,17 Wh/m² no segundo dia, totalizando 8.292,48 W/m² nos dois dias de experimento. O sistema de secagem solar utilizado nesta pesquisa possui um coletor com área de incidência solar de um metro quadrado. Com essas informações foi possível determinar a energia térmica incidida no sistema de secagem solar, multiplicando-se a irradiação média horária incidida pela área de incidência do coletor. Com base nestas informações, foi possível determinar o consumo específico de energia do experimento 3 (EXP3), que forneceu informações relevantes para a avaliação econômica do sistema de secagem neste experimento.

Convertendo para kWh a energia térmica, o valor da energia utilizada pelo sistema de secagem solar foi de 8,29 kWh. Após a determinação da energia térmica utilizada no experimento 3 com o auxílio da equação 3.16 apresentada anteriormente, foi possível determinar o consumo específico de energia (CEE) para o experimento de secagem solar com estratégia de controle embarcada.

Assim, com os dados dos teores de umidade inicial e final do produto, considerando o valor total da amostra utilizada no experimento que foi de 300 g e a energia térmica recebida pela irradiação solar durante a realização do experimento 3, foi determinado o consumo específico de energia (CEE) para o referido experimento. Na Tabela 4.9 pode ser observado os valores da energia consumida, teor de umidade inicial e final do produto, massa inicial do produto bem como o cálculo do consumo específico de energia do processo de secagem do experimento 3.

Tabela 4.9. Valores da energia consumida, teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia do processo de secagem mista (EXP3).

EC (kWh)	Ui (% bu)	Uf (% bu)	Mi (kg)	CEE (kWh/kg)
8,29	68	24,15	0,3	47,96

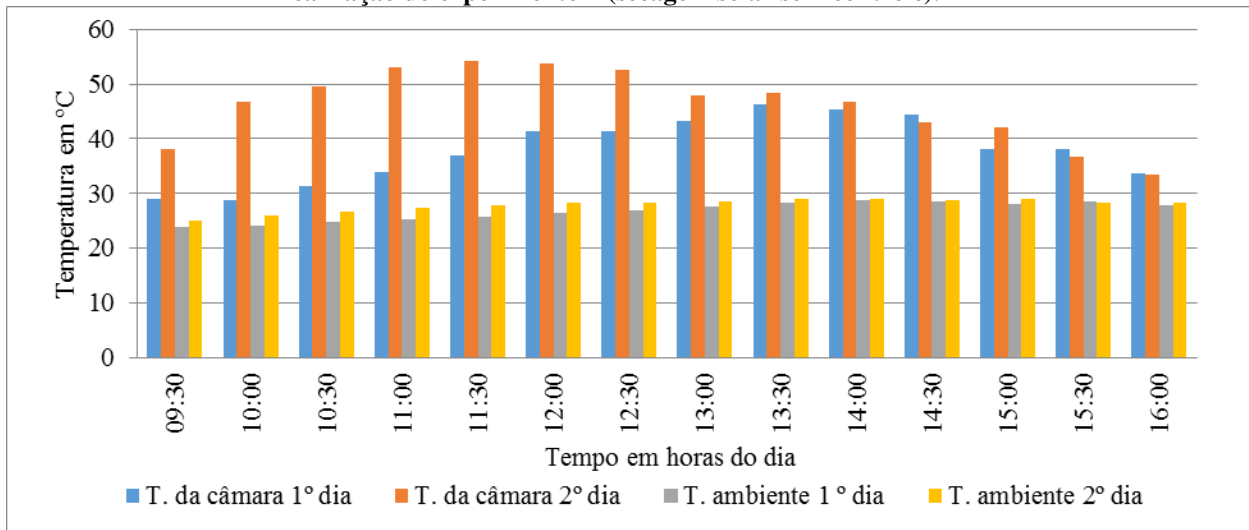
O CEE do experimento 3 foi de 47,96 kWh/kg de energia por ciclo (batelada). Com esse valor é possível avaliar comparativamente a viabilidade econômica dos sistemas de secagem envolvidos nesta pesquisa.

4.1.4 Experimento 4 (EXP4), (secagem solar sem controle).

Neste experimento não foi utilizado o sistema de controle da temperatura da câmara de secagem do secador solar adotado nos experimentos 2 e 3. A não utilização do sistema de controle adotado nos experimentos anteriores tem por finalidade fazer uma análise comparativa da funcionalidade da estratégia sugerida, na manutenção temperatura da câmara de secagem com maior estabilidade nas condições mais adversas. Neste experimento, o sistema de convecção forçada (*cooler*) instalado na saída da câmara de secagem permanecerá acionado durante todo processo de secagem.

Na Figuras 4.24, são mostrados os valores de temperatura do ar de secagem na câmara de secagem obtidos pelo sistema de aquisição de dado do secador solar, como também os dados de temperatura ambiente fornecida pela estação meteorológica, que serão analisadas em seguida.

Figura 4.24. Temperaturas médias do processo de secagem solar e temperatura ambiente durante a realização do experimento 4 (secagem solar sem controle).



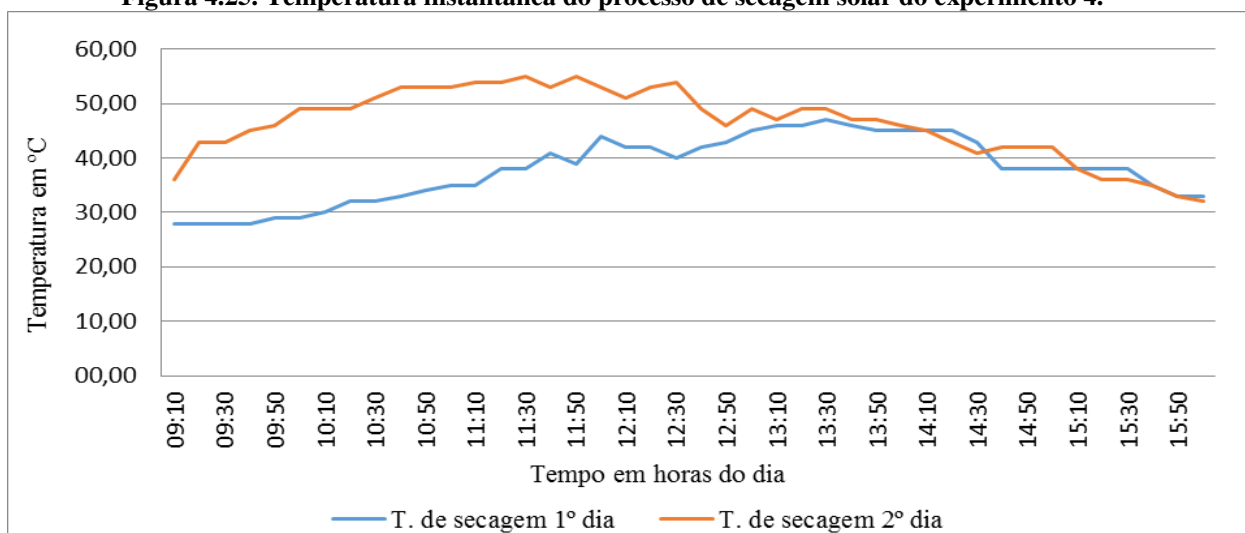
Observando-se os valores apresentados no gráfico da Figura 4.24, percebe-se que a temperatura média do ar no interior da câmara de secagem teve comportamento distinto nos dois dias do experimento 4, realizados nos dias 07 e 08 de julho de 2016. No primeiro dia as temperaturas registradas ficaram na maior parte do dia com valores inferiores a 40°C. Das 09h00min a 11h30min, a temperatura no interior da câmara variou de 29°C a 37°C e das 12h00min as 14h30min variou de 41,33°C a 46,33°C. Foi neste período que foi registrado a maior intensidade de irradiação solar, com valores de irradiação variando de 738,24 Wh/m² a 782,55 Wh/m². Nas horas finais do primeiro dia do experimento 4, compreendidas entre as 15h00min e 16h00min, variou de 38°C a 33,67°C. Analisando os períodos do experimento em função da temperatura da câmara de secagem no primeiro dia, observa-se que foi registrada apenas três horas com temperaturas superiores a 40°C, enquanto que nas demais quatro horas as temperaturas registradas foram inferiores a 40°C.

No segundo dia do experimento 4, dia 08 de julho de 2016, as condições meteorológicas foram mais favoráveis do que no primeiro dia de experimento, observando-se valores de temperatura, na maior parte do tempo, entre 42°C e 54°C, com exceção da primeira meia hora e da última hora do experimento, que registrou as menores temperaturas. As temperaturas durante o segundo dia do experimento 4 tiveram um comportamento atípico para a estação do inverno. A maior temperatura do segundo dia do experimento 4 foi registrada às onze horas e trinta minutos, devido ao alto índice de irradiação que se manteve em níveis bem expressivos a partir das dez horas da manhã e se mantendo até próximo das treze horas, com variações de 716 W/m² a 833 W/m², como pode ser observado na Figura 4.26. Como

mencionado em experimentos anteriores os valores apresentados pelas Figuras 4.24 e 4.26, são valores médios das temperaturas e da irradiação solar, com média realizada a cada meia hora, a partir dos dados fornecidos pelo sistema de aquisição do secador solar e pela estação meteorológica do LEIAM/UFCG.

Na Figura 4.25 são apresentadas as informações dos valores médios das temperaturas, realizadas em intervalos de dez minutos, a partir dados coletados do experimento 4. Com estas informações, é possível observar o comportamento da temperatura no interior da câmara de secagem durante a realização do experimento 4.

Figura 4.25. Temperatura instantânea do processo de secagem solar do experimento 4.



Nas Figuras 4.26 e 4.27 são apresentados os gráficos da intensidade média da irradiação solar incidente em Campina Grande nos dias 07 e 08 de julho com intervalos de trinta minutos e de uma hora respectivamente, fornecidas pela estação meteorológica do LEIAM/UFCG. Com os dados fornecidos pela Figura 4.26, é possível observar a média da intensidade da irradiação solar no momento da medição da massa do produto e a Figura 4.27 apresenta a média da irradiação solar horária, necessária para determinar a irradiação total por hora (kWh/m^2) durante a realização do experimento.

Figura 4.26 Intensidade média de irradiação solar medida na UFCG em intervalos de 30 minutos durante a realização do experimento 4.

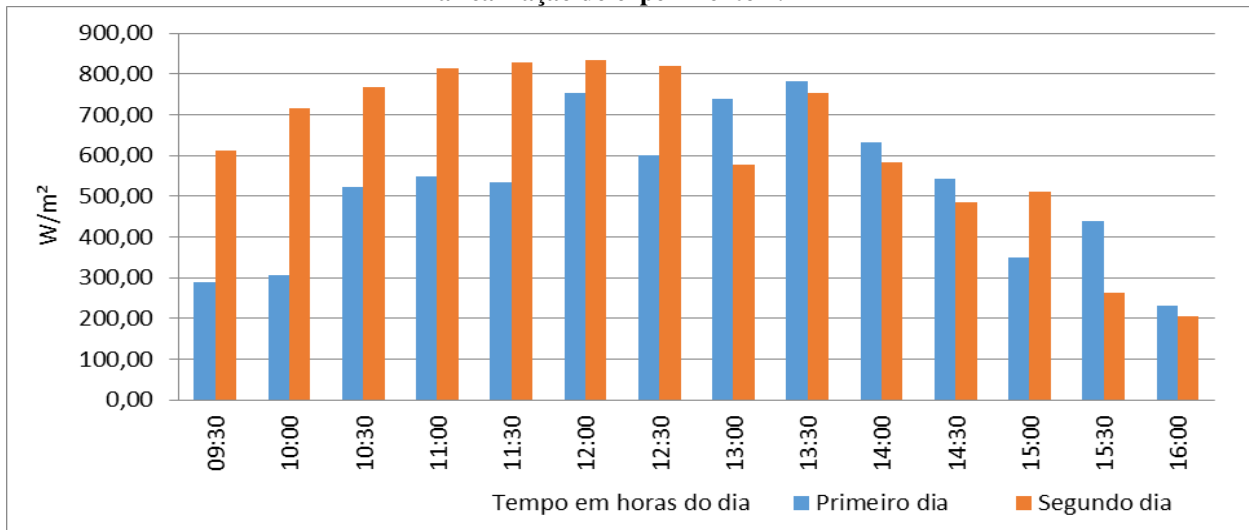
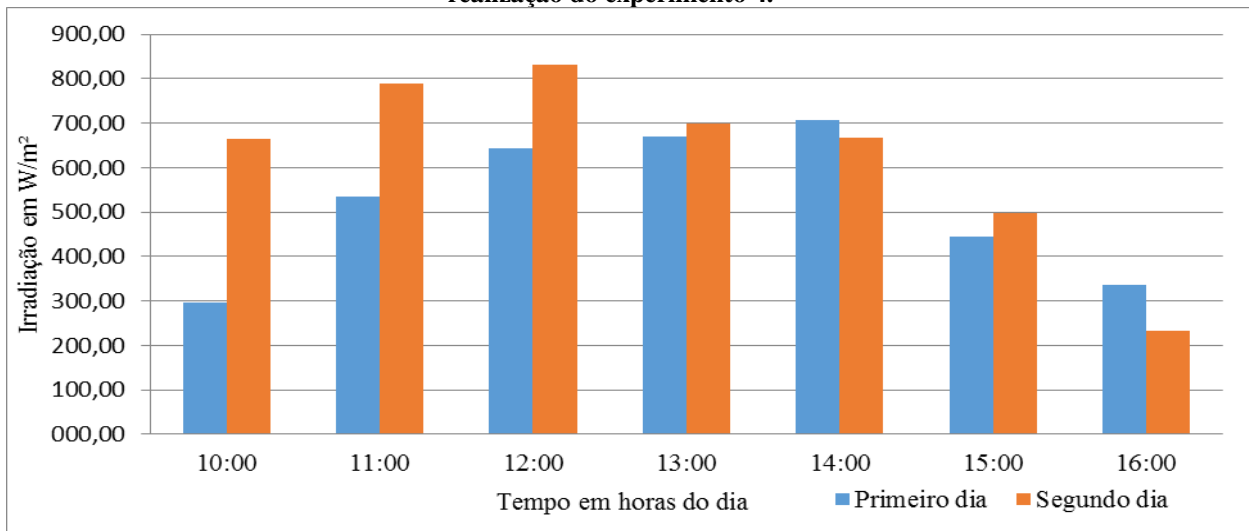


Figura 4.27. Intensidade média de irradiação solar medida na UFCG em intervalo de uma hora durante a realização do experimento 4.



Nas Figuras 4.28 e 4.29 são apresentados os gráfico da irradiação solar instantânea medida pela estação meteorológica LEIAM/UFCG nos dia 7 e 8 de julho de 2016. Estes gráficos tem como finalidade apresentar o comportamento do perfil da irradiação solar durante a realização do experimento 4 (EXP4).

Figura 4.28. Intensidade instantânea da irradiação solar medida na UFCG durante o primeiro dia de realização do experimento 4.

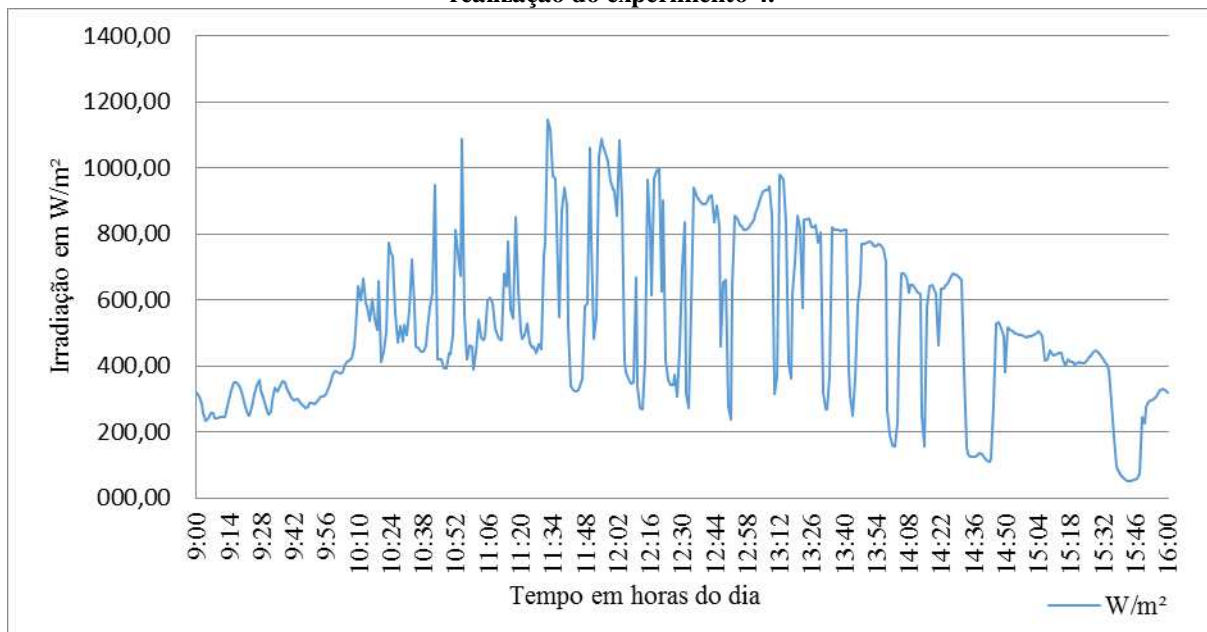
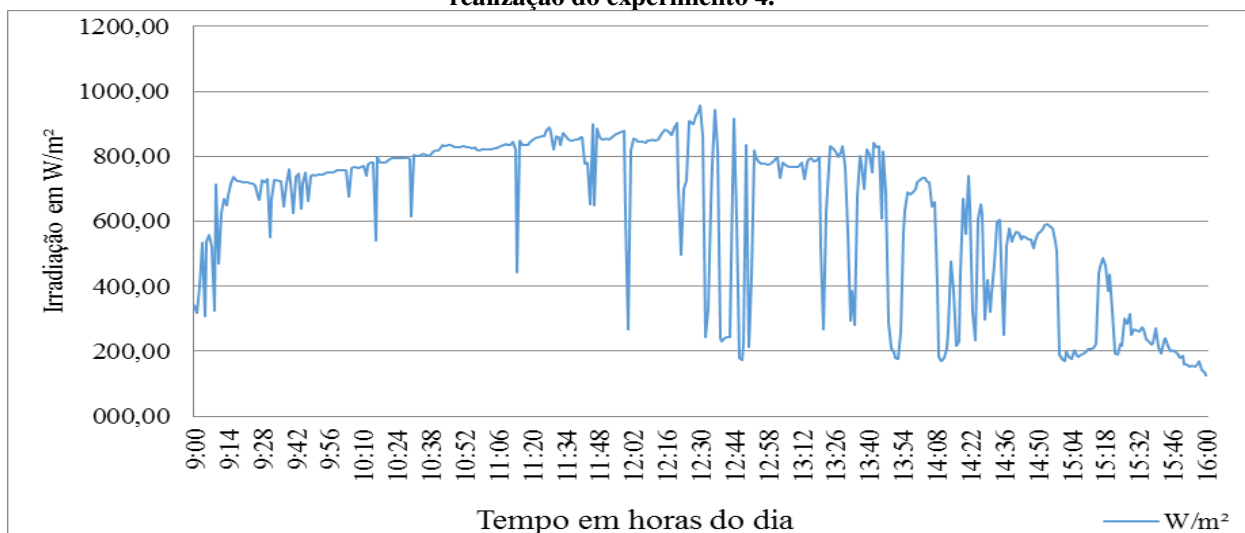


Figura 4.29. Intensidade instantânea da irradiação solar medida na UFCG durante o segundo dia de realização do experimento 4.



A máxima temperatura média (média realizada a cada dez minutos da temperatura registrada no interior da câmara de secagem) de processo de secagem do experimento 4 foi de $55^{\circ}C$, sendo registrada no segundo dia do experimento em horários distintos compreendidos entre as onze hora e trinta minutos e doze horas.

A variação da temperatura durante a realização do experimento 4 foi dentro do esperado para um sistema de secagem solar. No primeiro dia foi registrada como temperatura mínima de processo $28^{\circ}C$, no início do processo de secagem, às nove horas e dez minutos e

47°C como temperatura máxima de processo, no interior da câmara, às treze horas e trinta minutos, provocando uma variação de 19°C na temperatura interna da câmara. No segundo dia foi registrada uma temperatura mínima de 32°C às dezesseis horas e máxima de 55°C entre onze meia e meio dia, que por sua vez provocou uma variação de 23°C na temperatura interna da câmara durante todo o processo de secagem solar.

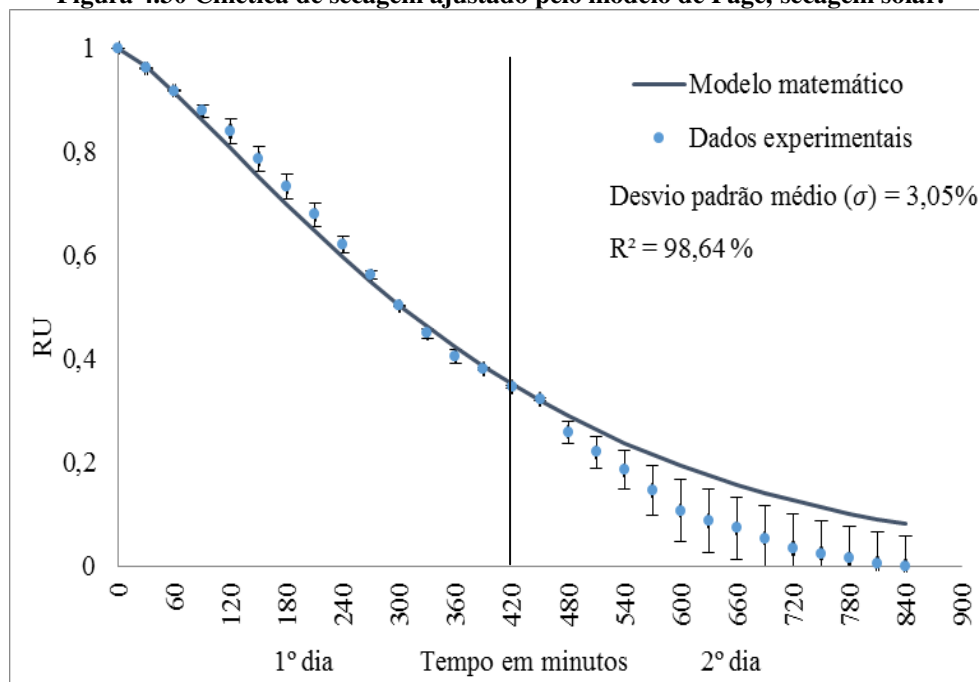
As médias das temperaturas ambiente registradas nos dias de realização do experimento 4 tiveram um comportamento muito parecido. A maior média da temperatura ambiente registrada no primeiro dia do experimento foi de 28,66°C às 14h00min e a menor de 23,81°C às 09h30min, representando uma variação de 4,85°C. No segundo dia, a máxima temperatura ambiente registrada foi de 29,04°C às 14h0min e a menor de 25,09°C às 09h30min, representando uma variação de 3,95°C. Como observado, a temperatura ambiente durante os dois dias de realização do experimento teve um comportamento muito semelhante. Outro dado observado quando comparando as médias de temperatura nos dois dias, é possível verificar que o segundo dia apresentou sempre valores de temperatura ambiente superiores ao apresentado no primeiro dia, com valores variando na maioria das vezes de 1°C a 2,13°C.

Com os valores da variação da massa da banana coletados a cada meia hora, sendo a primeira medição às 09h00min do dia 07 de julho e a última às 16h00 do dia seguinte, foi obtida a curva de secagem apresentada na Figura 4.30, onde os pontos representam os valores de razão de umidade obtidos experimentalmente e a curva em linha cheia representa a cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page.

Na Figura 4.30, observa-se que durante as primeiras horas do experimento 4, os pontos encontram-se próximos e em seguida ficaram ligeiramente afastados da linha que representa o modelo matemático, comportamento que se mantém até o final do primeiro dia, correspondente ao tempo de 420 min. No segundo dia os valores experimentais ficam abaixo da linha, devido principalmente a grande variação da temperatura no interior da câmara de secagem registrada ao longo do segundo dia de experimento. Fazendo uma análise comparativa do primeiro dia do experimento 4 com o segundo dia do referido experimento, conclui-se que a cinética de secagem no segundo dia foi maior, pois no segundo dia foram retiradas mais massa de água da banana em comparação com o primeiro dia, devido as altas temperaturas registradas no segundo dia do experimento 4. Em função da variação da temperatura de processo no interior da câmara, o modelo matemático não se ajustou bem aos

pontos experimentais na maior parte do experimento, como pode ser observado na análise do desvio padrão registrado ao longo do experimento.

Figura 4.30 Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, secagem solar.

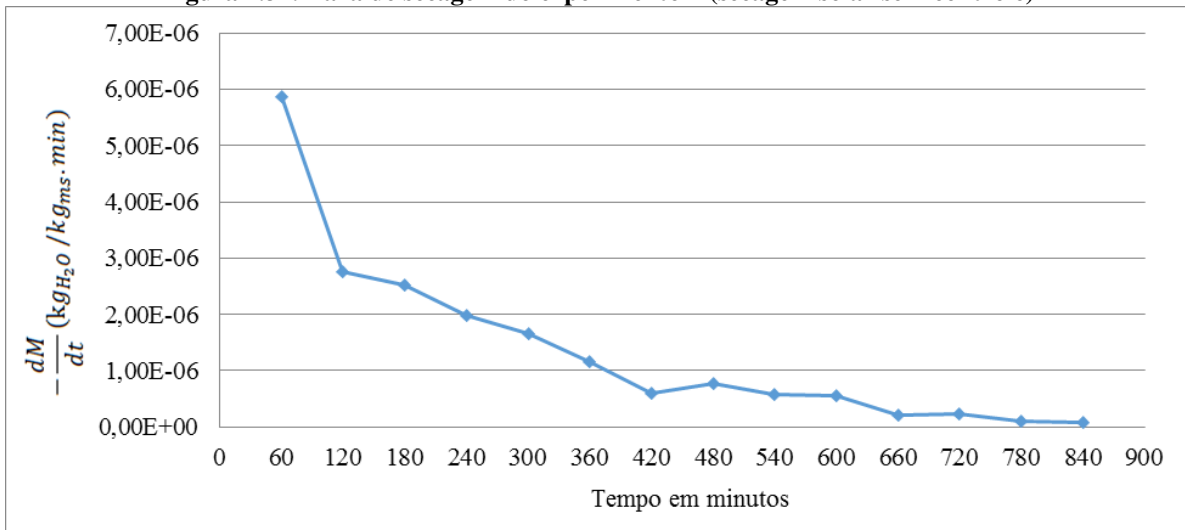


Com relação ao desvio padrão observado ao longo do experimento 4 (secagem solar sem controle), observou-se que os dados experimentais em comparação com o modelo matemático utilizado para análises dos resultados, apresentou um desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 3,05%. Ao longo do experimento foram observados algumas dispersões dos dados experimentais em comparação com o modelo matemático que destoaram do desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) do experimento. Entre os primeiro 30 e 240 minutos do experimento, os dados experimentais e o modelo matemático apresentaram o desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 1,55%. A menor média do desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) foi de 0,58%, entre 270 e 450 minutos e a maior média do desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) foi entre 480 e 840 minutos, com 5,3%. No primeiro dia do experimento o desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) foi de 1,16% e no segundo dia de experimento o desvio padrão foi ($\bar{\sigma}$) de 4,94%.

A Figura 4.31 representa a taxa de secagem do experimento 4 (secagem solar sem controle). Observou-se que inicialmente a variação da taxa de secagem decresce de forma rápida até o tempo de 120 minutos. Após este período a redução na taxa de secagem ocorreu de forma mais lenta até o tempo correspondente a 420 minutos de experimento. No segundo

dia de experimento com o tempo correspondendo a 480 minutos, observou-se uma nova variação na taxa de secagem. Este fato se deu principalmente devido a variação da temperatura do processo em 13°C, correspondente ao final do primeiro dia do experimento e a primeira hora de experimento do segundo dia, que corresponde ao tempo de 480 minutos de experimento. A partir deste período, houve um pequeno decréscimo na taxa de secagem até o tempo de 660 minutos e após este período, a taxa de secagem permaneceu praticamente constante até o final do experimento.

Figura 4.31. Taxa de secagem do experimento 4 (secagem solar sem controle)



Para calcular o rendimento térmico do equipamento utilizando apenas os dados de temperatura, serão utilizadas as Equações 3.24 e 3.27. Com os dados do processo de secagem do experimento 4 foi determinado o valor do rendimento térmico do secador solar pelo método da potência útil. A área de incidência da irradiação solar sobre a cobertura transparente do coletor solar é de 1 m². Com essas informações foi possível determinar a energia térmica incidida no sistema de secagem solar, multiplicando-se a irradiação média horária pela área de incidência. Na Tabela 4.10, pode ser visto os dados do processo de secagem: vazão mássica, variação de temperatura, potencia útil, média da irradiação solar e o rendimento térmico do secador.

Tabela 4.10. Dados obtidos do processo de secagem do experimento 4 (secagem solar com controle): vasão mássica, variação de temperatura, potencia útil, média da irradiação solar, rendimento térmico do secador solar

\dot{m}_1 (kg/s)	$\overline{\Delta T}$ (K)	c_p ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$) a 300K	P_{u4} (W)	\overline{G} (W/m ²)	η_{t4} (%)
0,01071	15,58	1,0048	167,66 W	572,62	29,27

Para o cálculo da eficiência mássica do processo de secagem em EXP4, foi utilizada a Equação 3.40. Na Tabela 4.11 pode ser observado os valores da massas inicial, final e massa de água, bem como o cálculo da eficiência mássica do processo de secagem do experimento 4.

Tabela 4.11 Valores da massa inicial, massa final, massa de água e eficiência mássica do processo de secagem solar (experimento 4).

m_{inicial} (g)	m_{final} (g)	$m_{\text{água}}$ (g)	η_{p4} (%)
32,2	11,7	22,54	90,95

A elevada eficiência mássica do processo de secagem obtida foi um indicativo importante da eficiência do processo utilizado, que demonstrou que a utilização da energia solar como fonte energética é competitiva, sendo compatível com eficiências equivalentes a de processos de secagem que usam eletricidade.

Para avaliação econômica da secagem solar neste experimento em comparação com as demais propostas apresentadas no trabalho, foi considerada como energia útil ao processo, toda a energia desprendida da irradiação solar incidida sobre o coletor do secador solar em estudo. Sendo assim, a energia considerada útil ao processo será contabilizada nos dois dias do experimento das nove horas às dezesseis horas dos dias 7 e 8 de julho de 2016, totalizando 14h00min de exposição do secador solar.

A energia térmica recebida pelo secador solar durante a realização do experimento 4, foi de 3.631,38 Wh/m² no primeiro dia de experimento e de 4.384,91 Wh/m² no segundo dia, totalizando 8.161,29 W/m² nos dois dias de experimento. O sistema de secagem solar utilizado nesta pesquisa possui um coletor com área de incidência solar de um metro quadrado. Com essas informações, foi possível determinar a energia térmica incidida no sistema de secagem solar, multiplicando-se a irradiação média horária incidida pela área de incidência do coletor. Com base nestas informações, foi possível determinar o consumo

específico de energia do experimento 4 (EXP4), que forneceu informações relevantes para a avaliação econômica do sistema de secagem neste experimento.

Convertendo para kWh a energia térmica, o valor da energia utilizada pelo sistema de secagem solar foi de 8,16 kWh. Após a determinação da energia térmica utilizada no experimento 4 com o auxílio da equação 3.16 apresentada anteriormente no capítulo 3, foi possível determinar o consumo específico de energia (CEE) para o experimento de secagem solar.

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 a realização do experimento 4, foi determinado o consumo específico de energia (CEE) para o referido experimento. Na Tabela 4.12 pode ser observado os valores da energia consumida, umidade inicial do produto, umidade final do produto, massa inicial do produto bem como o cálculo do consumo específico de energia do processo de secagem do experimento 4.

Tabela 4.12. Valores da energia consumida, teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia do processo de secagem mista (EXP4).

EC (kWh)	Ui (% bu)	Uf (% bu)	Mi (kg)	CEE (kWh/kg)
8,16	70	17,44	0,3	42,73

O CEE do experimento 4 foi de 42,73 kWh/kg de energia por ciclo (batelada). Com esse valor foi possível avaliar comparativamente a viabilidade econômica dos sistemas de secagem envolvidos nesta pesquisa.

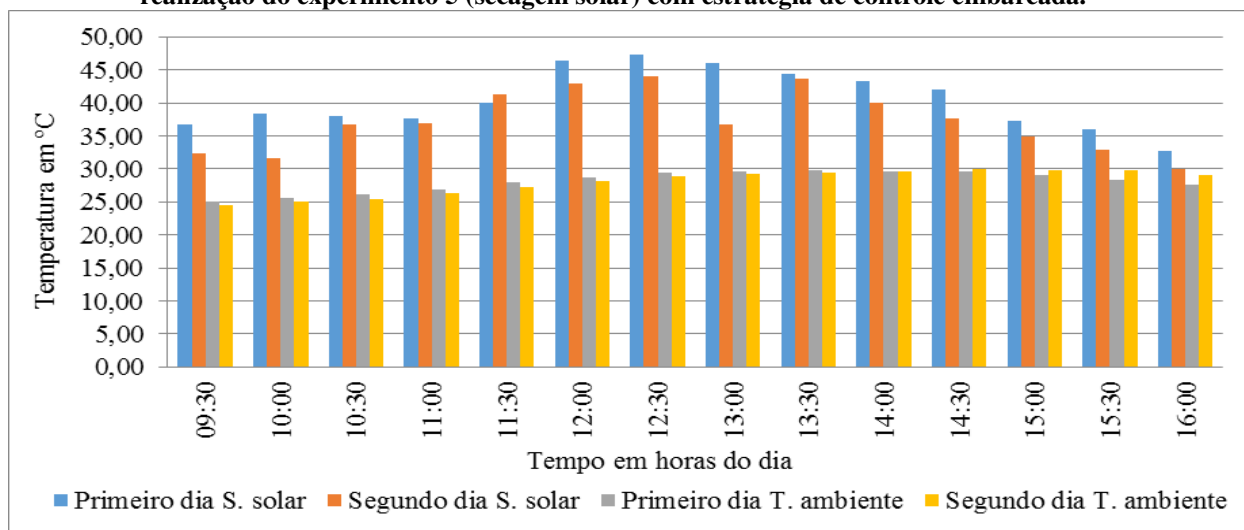
4.1.5 Experimento 5 (EXP5), (secagem solar com controle).

Neste experimento, como no experimento 3 (EXP 3), foi utilizado o sistema de controle da temperatura da câmara de secagem do secador solar. Esta aplicação neste experimento tem por objetivo, a exemplo dos anteriores, controlar a temperatura da câmara dentro de níveis mais estáveis possíveis, nas diversas condições, em todas as estações do ano. Com a temperatura da câmara de secagem mais estável, buscou-se obter um produto final com boas características comerciais, com o objetivo de tornar o sistema mais competitivo em

comparação com outros sistemas de secagem. A estratégia adotada neste experimento 5 foi a mesma adotada nos experimentos 2 e 3, que consiste em controlar o acionamento do sistema de exaustão responsável pela convecção forçada do ar de secagem para buscar manter uma faixa de temperatura de secagem mais estável e adequada ao produto a ser seco. O acionamento do sistema de convecção forçada só será feito na faixa de temperatura compreendida entre 40°C e 60°C no interior da câmara de secagem, ou seja, quando a temperatura do interior da câmara for inferior a 40°C, o sistema de exaustão não será acionado, após atingir 40°C, o sistema será acionado e permanecerá nesta condição até atingir 60°C. Após os 60°C, o sistema será desligado, voltando a atuar apenas na faixa de temperatura estabelecida.

Na Figura 4.32, são mostrados os valores da temperatura do ar de secagem obtidos pelo sistema de aquisição do secador solar, como também os dados de temperatura ambiente fornecida pela estação meteorológica.

Figura 4.32. Temperaturas médias do processo de secagem solar e temperatura ambiente durante a realização do experimento 5 (secagem solar) com estratégia de controle embarcada.



Como feito nos experimentos anteriores, a análise do experimento 5 foi realizada mediante análises dos dados de temperatura fornecida pelo sistema de aquisição do secador solar. O sistema de secagem solar em estudo neste trabalho utilizou a convecção forçada por meio de *cooler* instalado na saída da câmara de secagem, como mencionado anteriormente em outros experimentos. Seu acionamento neste experimento também foi feito por intermédio de um mini painel fotovoltaico, que forneceu energia elétrica necessária a movimentação do

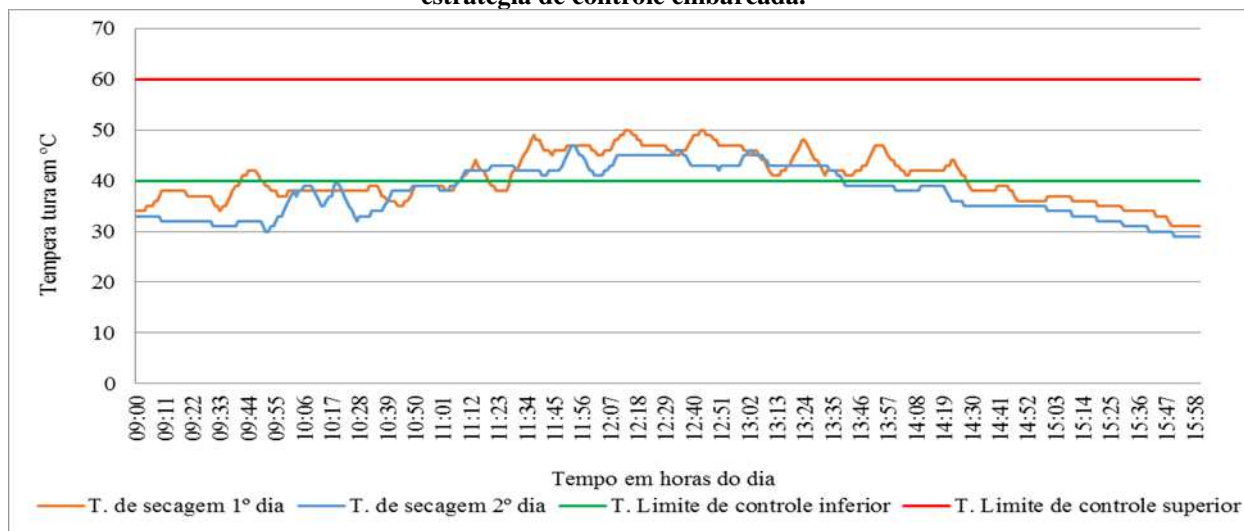
exaustor. Na Figura 4.32, pode-se observar os valores obtidos para as temperaturas do ar de secagem medidos na câmara de secagem, que serão analisadas na sequência.

Observando-se os valores apresentados no gráfico da Figura 4.32 percebe-se que a temperatura média do ar no interior da câmara de secagem esteve com valores de temperatura na maior parte do tempo entre 40°C e 47°C. A maior média da temperatura do primeiro dia do experimento 5 foi registrada próximo as doze horas e trinta minutos, devido ao alto índice de irradiação que se manteve em níveis bastante significativo neste período, com variações de 820 W/m² a 912 W/m² como pode ser observado na Figura 4.34. A temperatura média ambiente registrou o menor valor de 25,16°C durante o experimento às nove horas e trinta minutos, e o maior valor de 29,76°C às treze horas e trinta minutos. As temperaturas na câmara do secador solar e ambiente apresentaram uma média de 40,43°C e 28,13°C, respectivamente durante o primeiro dia do experimento.

No segundo dia do experimento 5, dia 04 de outubro de 2016, observa-se que os valores apresentados no gráfico da Figura 4.32, que representa o comportamento da temperatura média do ar no interior da câmara de secagem, esteve nas duas primeiras e na última hora do segundo dia de experimento com valores de temperatura abaixo de 40°C. No horário compreendido entre as onze horas e quatorze horas, a temperatura permaneceu entre 40°C e 44°C. Próximo às doze horas e trinta minutos do dia 04 de outubro, a temperatura média na câmara de secagem atinge o maior valor de 44°C. Isto ocorreu porque no período compreendido entre doze e treze horas, a intensidade de irradiação solar incidente manteve-se em níveis elevados de irradiação, com variação de 763 W/m² a 860 W/m². Um dado importante a ser mencionado também no experimento 5, é que os valores apresentados pela Figura 4.32, são valores médios das temperaturas registradas no interior da câmara de secagem e temperaturas ambiente, com média realizada a cada meia hora a partir dos dados fornecidos pelo sistema de aquisição do secador solar e pela estação meteorológica do LEIAM/UFCG. Neste experimento 5 como a exemplo do experimento 3, também foi adotado a estratégia de controle da temperatura da câmara, que tem como propósito manter a temperatura mais estável possível. A estratégia mencionada foi desenvolvida para atuar com valores instantâneos da temperatura medidos na câmara de secagem por intermédio do sistema de aquisição do secador solar. Na Figura 4.33 pode ser observado o gráfico da temperatura instantânea no interior da câmara de secagem durante a realização do experimento 5 e na Tabela 4.13 pode-se observar o estado do controle de acionamento do

sistema de exaustão, onde pode ser visto os períodos de acionamento e desligamento do exaustor. A estratégia de controle teve como objetivo buscar manter a temperatura no interior da câmara de secagem mais estável possível, para a faixa de temperatura pré-definida no início do processo.

Figura 4.33. Temperatura instantânea do processo de secagem solar, temperatura limite de controle inferior e temperatura limite de controle superior do experimento 5– secagem solar com estratégia de controle embarcada.



Na Tabela 4.13 pode-se verificar o funcionamento do controle da temperatura da câmara de secagem. A partir destas informações pode-se determinar o tempo de acionamento do sistema de convecção forçada durante a realização do experimento 5 (EXP5). O sistema de exaustão do secador solar foi acionados em várias ocasiões em função da temperatura definida para o processo de secagem do experimento. Com a análise do funcionamento do sistema de exaustão neste experimento foi possível tirar algumas conclusões importantes da estratégia de controle adotada para o sistema de secagem solar em estudo.

O tempo de acionamento do sistema de exaustão no primeiro dia do experimento 5 foi de cinco horas e doze minutos e o tempo em que o mesmo ficou sem atuar foi de uma hora e quarenta e oito minutos. No segundo dia foram registradas médias de temperatura inferiores ao primeiro dia e conseqüentemente alterando os períodos de acionamento do sistema de controle de temperatura. No segundo dia, o tempo de acionamento do sistema de exaustão foi de duas horas e trinta e quatro minutos e o tempo em que o sistema de exaustão ficou desativado foi de quatro horas e vinte e seis minutos, mesmo sendo numa estação (primavera) considerada propícia a realização de um experimento de secagem solar. Observou-se que

durante o experimento 5 (EXP5) realizado nos dias três e quatro de outubro o céu estava com grande nebulosidade.

Tabela 4.13. Representação do estado de controle do acionamento do sistema de convecção do secador solar durante a realização do experimento 5 (secagem solar) com estratégia de controle embarcada.

Dias	Horário	Temperatura	Acionamento do exaustor	Menor temperatura	Maior temperatura	Temperatura média do período
03/10	09h00min às 09h40min	$T < 40$	Desligado	34	39	36,56
	09h41min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
	09h41min às 09h48min	$40 < T < 60$	Ligado	41	42	41,57
	09h49min às 09h50min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
	09h51min às 11h06min	$T < 40$	Desligado	35	39	37,88
	11h07min às 11h08min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
	11h09min às 11h18min	$40 < T < 60$	Ligado	41	44	42,10
	11h19min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
	11h20min às 11h27min	$T < 40$	Desligado	38	39	38,38
	11h28min às 14h27min	$40 < T < 60$	Ligado	41	50	45,12
	14h28min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
14h29min as 16h00min	$T < 40$	Desligado	31	39	38,80	
04/10	09h00min às 10h18min	$T < 40$	Desligado	31	39	33,29
	10h19min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
	10h20min às 11h06min	$T < 40$	Desligado	32	39	36,79
	11h07min às 11h08min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
	11h09min às 13h38min	$40 < T < 60$	Ligado	41	47	43,34
	13h39min	$T = 40$	Ligado	40	40	40,00
	13h40min às 16h00min	$T < 40$	Desligado	29	39	34,60

A análise do comportamento da temperatura no interior da câmara de secagem é realizada a partir dos valores médios da temperatura dos dados coletado pelo sistema de aquisição durante a realização do experimento, em intervalos de dez minutos. Contudo o controle de temperatura foi projetado para acionar o sistema de exaustão com a leitura dos valores instantâneo da temperatura, fornecido por intermédio do sensor de temperatura, a plataforma do Arduino.

Nas Figuras 4.34 e 4.35 são apresentadas as curvas da intensidade média da irradiação solar incidente em Campina Grande nos dias 03 e 04 de outubro com intervalos de trinta minutos e de uma hora respectivamente, fornecidas pela estação meteorológica do LEIAM/UFCG. Com os dados fornecidos pela Figura 4.34, é possível observar a intensidade média da irradiação solar no momento das medições da massa do produto a cada trinta minutos e a Figura 4.35 apresenta a média da irradiação solar horária, necessária para determinar a irradiação total por hora (kWh/m^2) durante a realização do experimento.

Figura 4.34. Intensidade média de irradiação solar medida na UFCG em intervalos de 30 minutos durante a realização do experimento 5.

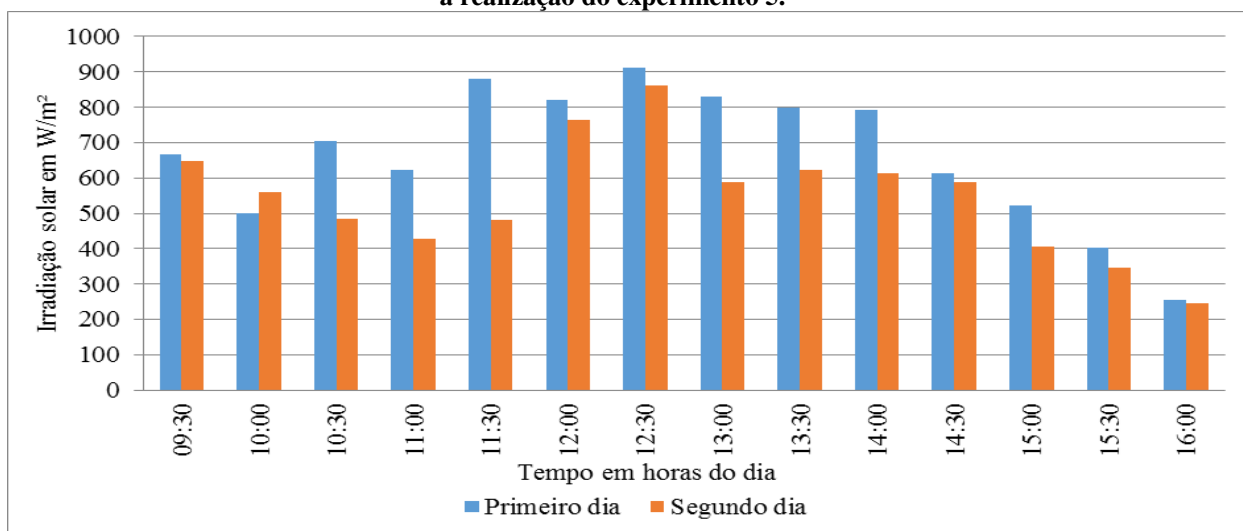
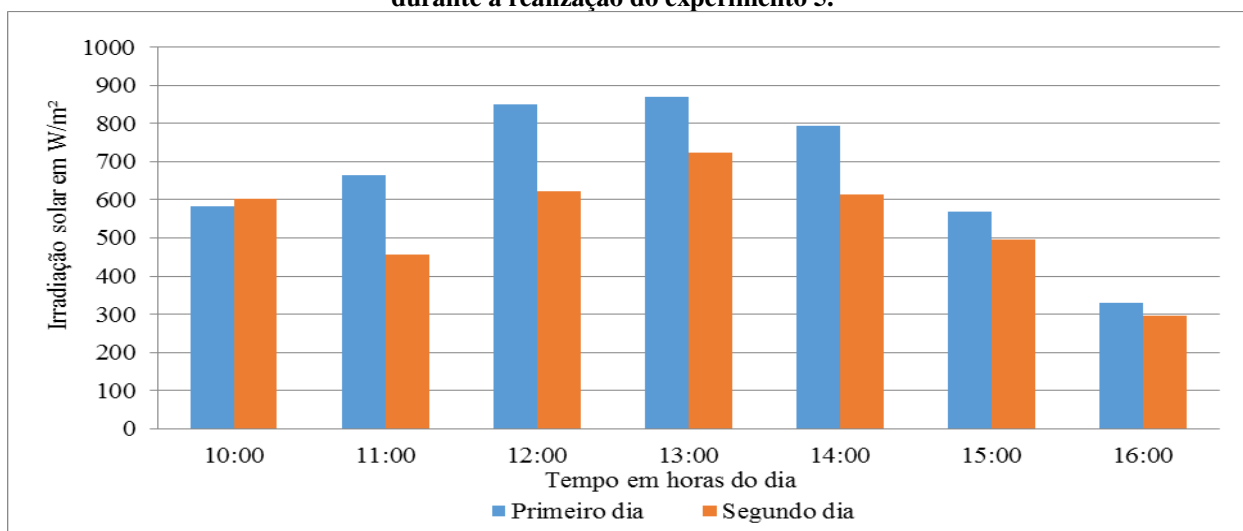


Figura 4.35. Intensidade média de irradiação solar medida na UFCG em intervalo de uma hora durante a realização do experimento 5.



Nas Figuras 4.36 e 4.37 são apresentadas as curvas de intensidade da irradiação solar instantâneas durante a realização do experimento 5 (EXP5). Nestas figuras podem ser observado o caráter intermitente da irradiação solar, devido principalmente a grande nebulosidade registrada durante a realização do experimento. No entanto mesmo com condições pouco propícias, os resultados obtidos foram satisfatórios, a considerar o objetivo do experimento, que foi de obter um produto final dentro das especificações de umidade estabelecidas pela norma vigente, Resolução RDC nº 272, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária.

Figura 4.36 Intensidade instantânea da irradiação solar medida na UFCG durante o primeiro dia de realização do experimento 5.

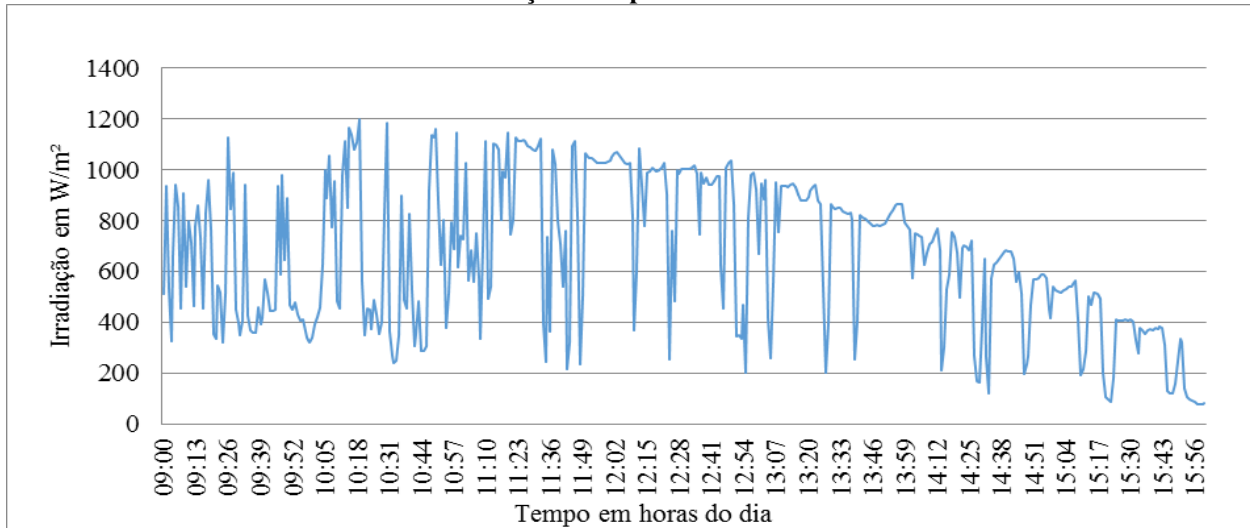
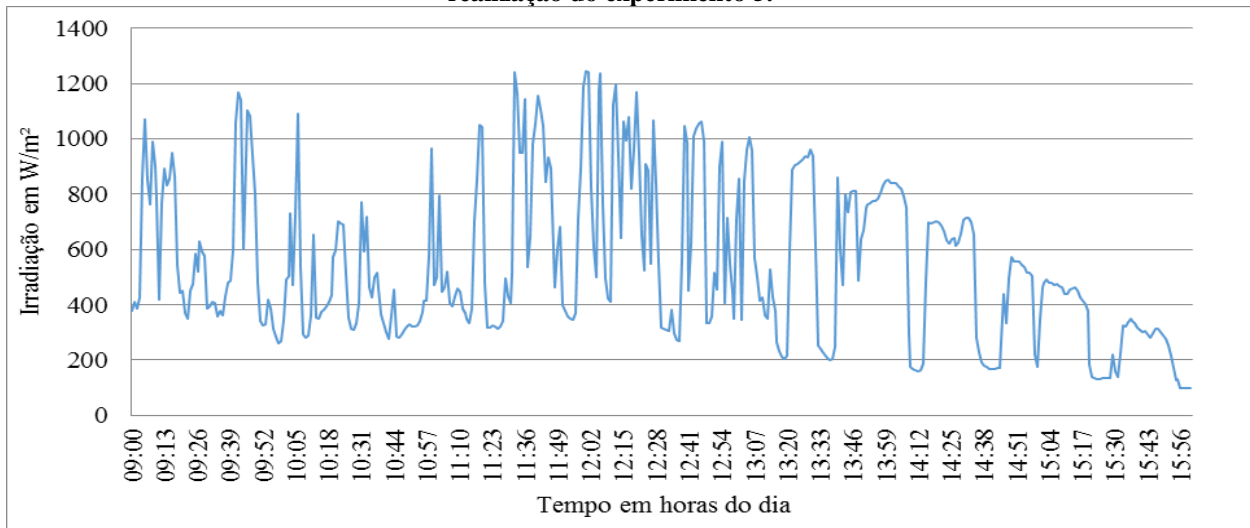


Figura 4.37. Intensidade instantânea da irradiação solar medida na UFCG durante o segundo dia de realização do experimento 5.



A máxima temperatura média (média realizada a cada dez minutos da temperatura registrada no interior da câmara de secagem) de processo de secagem do experimento 5 foi de $49^{\circ}C$. Esta temperatura foi registrada no primeiro dia do experimento em dois horários distintos compreendidos entre as doze hora e treze horas do dia, já no segundo dia a máxima temperatura atingida foi de $45^{\circ}C$, também entre as doze e as treze horas.

A variação da temperatura durante a realização do experimento 5, foi dentro do esperado para um sistema de secagem solar. No primeiro dia foi registrada como temperatura mínima de processo $31^{\circ}C$ próximo as dezesseis horas provocando uma variação de $18^{\circ}C$ na temperatura interna da câmara. No segundo dia foi registrada uma temperatura mínima de

29°C, também as dezesseis horas, que por sua vez provocou uma variação de 16°C na temperatura interna da câmara.

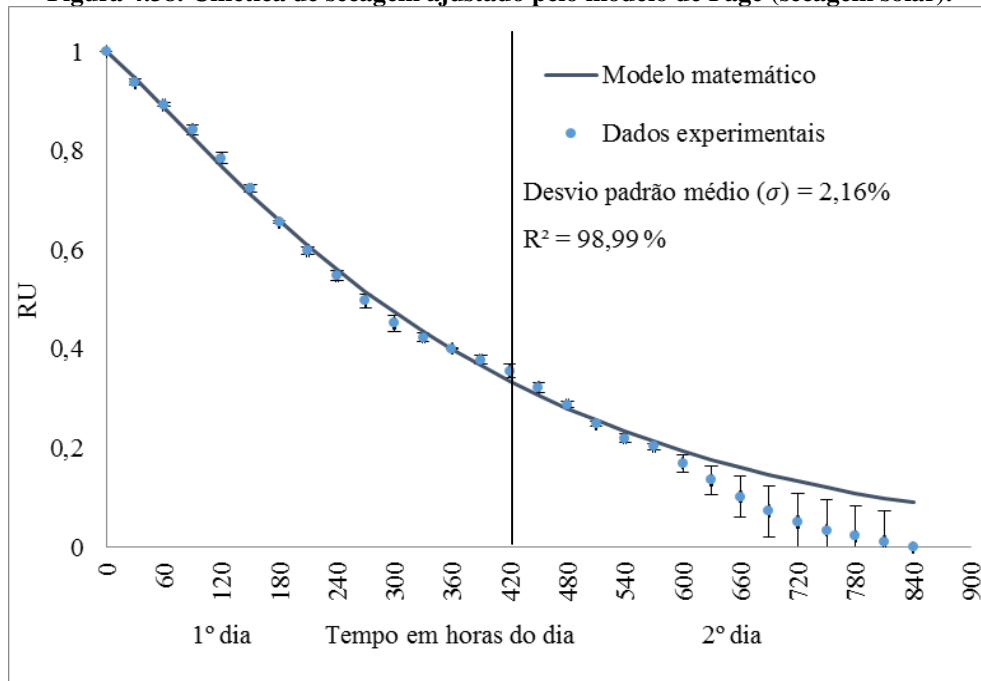
As médias das temperaturas ambiente nos dias de realização do experimento 5 tiveram um comportamento muito parecido. A maior média da temperatura ambiente registrada no primeiro dia do experimento foi de 29,76°C às 13h30min e a menor foi de 25,16°C às 09h30min representando uma variação de 4,60°C. No segundo dia, a máxima temperatura ambiente registrada foi de 30,05°C às 14h30min e mínima de 24,49°C, a variação neste dia foi de 5,56°C. Como observado, a temperatura ambiente durante os dois dias de realização do experimento teve um comportamento semelhante.

Com os valores da variação da massa da banana coletados a cada meia hora, sendo a primeira medição às 09h00min do dia 03 de outubro e a última às 16h00 do dia seguinte, foi obtida a curva de secagem apresentada na Figura 4.38, onde os pontos representam os valores de razão de umidade obtidos experimentalmente e a curva em linha cheia representa a cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page.

Na Figura 4.38, observa-se que durante as primeiras horas do experimento 5, os pontos encontram-se próximos à linha que representa o modelo matemático ajustado por Page. Isto demonstra que as temperaturas de processo apresentavam-se estáveis, registrando apenas pequenas oscilações, o que contribuiu para que o modelo matemático se ajustasse bem aos dados experimentais. Este fato foi possível devido à atuação do controle da convecção na manutenção do equilíbrio da temperatura da câmara de secagem, como pode ser observado na Tabela 4.13, que durante as primeiras horas desativou a convecção forçada, enquanto a temperatura da câmara de secagem estava abaixo do valor mínimo pré-definido para o processo. Nas Figuras 4.32 e 4.34 podem ser observados os níveis de temperatura e irradiação mencionados. Neste experimento em particular os pontos que representam os dados experimentais permaneceram próximos à curva que representa o modelo matemático por quase todo o experimento. Só a partir do tempo correspondente a 600 minutos ou dez horas de experimento, observou-se que os pontos começaram a se distanciarem para baixo da curva que representa o modelo matemático. Isto ocorreu porque a cinética de secagem estava mais lenta devido à dificuldade de remover massa de água em função do baixo valor de umidade do produto apresentado nas últimas horas do experimento, em comparação com as primeiras, o

que indica que a cinética de secagem no primeiro dia foi maior, pois nesse dia foram retiradas mais gramas de água, enquanto no segundo dia foram retirados menos gramas de água da banana. Isto ocorre devido a facilidade de remoção da água no início do processo, quando o teor de umidade ainda está muito elevado.

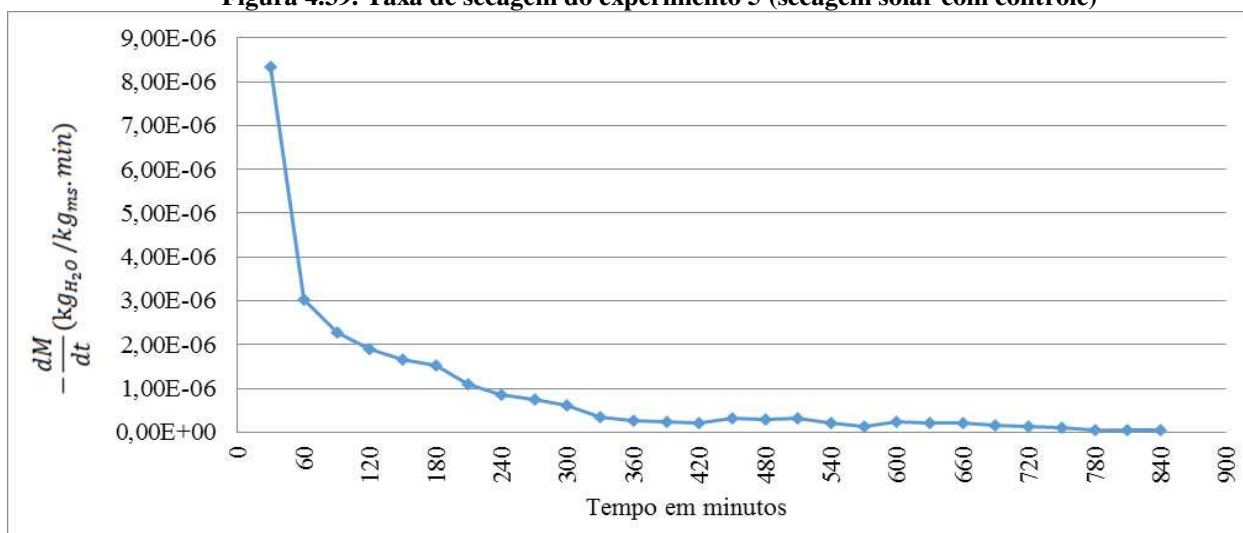
Figura 4.38. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page (secagem solar).



Com relação ao desvio padrão observado ao longo do experimento 5 (secagem solar com controle), observou-se que os dados experimentais em comparação com o modelo matemático utilizado para análises dos resultados, apresentou um desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 2,16%. Ao longo do experimento foram observados algumas dispersões dos dados experimentais em comparação com o modelo matemático que destoaram do desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) do experimento. Entre os primeiros 30 minutos e 210 minutos do experimento, os dados experimentais e o modelo matemático apresentaram o desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 0,7%, que foi também a menor média registrada do desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) do experimento. Entre 240 e 360 minutos do experimento, os dados experimentais e o modelo matemático apresentaram o desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 0,96% e no tempo entre 390 e 510 minutos, o desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) registrado foi de 0,89%. A maior média do desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) foi entre 540 e 840 minutos com 4,21%. No primeiro dia do experimento, o desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) foi de 0,86% e no segundo dia de experimento o desvio padrão foi ($\bar{\sigma}$) de 3,46%.

A Figura 4.39 representa a taxa de secagem do experimento 5 (secagem solar com controle), observou-se que inicialmente a variação da taxa de secagem decresce de forma linear rapidamente até o tempo de 60 minutos do experimento e em seguida a taxa de secagem descreve um comportamento exponencial até o tempo de 150 minutos de experimento. Entre o período de 180 e 330 minutos há uma variação sinuosa na taxa de secagem e entre 360 e 660 minutos há uma pequena variação na taxa de secagem. Após este período a taxa de secagem permaneceu praticamente constante até o final do experimento.

Figura 4.39. Taxa de secagem do experimento 5 (secagem solar com controle)



Para o cálculo da eficiência mássica do processo de secagem em EXP5, foi utilizada a Equação 3.40. Na Tabela 4.14 pode ser observado os valores da massas inicial, final e massa de água, bem como o cálculo da eficiência mássica do processo de secagem do experimento 5.

Tabela 4.14. Valores da massa inicial, massa final, massa de água e eficiência mássica do processo de secagem solar (experimento 5).

m_{inicial} (g)	m_{final} (g)	$m_{\text{água}}$ (g)	η_{p5} (%)
29,3	11,6	20,51	86,30

A exemplo dos experimentos 3 e 4, a eficiência obtida com o experimento 5 demonstra que a utilização da energia solar como fonte alternativa de energia é bastante competitiva, podendo ser compatível com eficiências equivalentes a de processos de secagem que utilizam a eletricidade como fonte de energia.

Como apresentado nos experimentos anteriores, um dos objetivos deste trabalho é a avaliação econômica dos processos de secagem e o estudo da viabilidade de alguns sistemas de secagem na busca de avaliar a viabilidade do sistema de secagem solar com estratégia de controle associada ao processo, será considerado como energia útil ao processo toda a energia desprendida da irradiação solar incidida sobre o coletor do secador solar utilizado nesta pesquisa para a secagem do produto. Sendo assim, a energia considerada útil ao processo será contabilizada nos dois dias do experimento das nove horas às dezesseis horas dos dias 03 e 04 de outubro de 2016, totalizando 14h00min de exposição do secador solar a irradiação solar.

A energia térmica recebida pelo secador solar utilizada para secagem durante a realização do experimento 5, foi de 4.659,95 Wh/m² no primeiro dia de experimento e de 3.814,09 Wh/m² no segundo dia, totalizando 8.474,04 W/m² nos dois dias de experimento. O sistema de secagem solar utilizado nesta pesquisa possui um coletor com área de incidência solar de um metro quadrado. Com essas informações, foi possível determinar a energia térmica incidida no sistema de secagem solar, multiplicando-se a irradiação média horária incidida pela área de incidência do coletor. Com base nestas informações, foi possível determinar o consumo específico de energia do experimento 5 (EXP5), que forneceu informações relevantes para a avaliação econômica do sistema de secagem neste experimento.

Convertendo para kWh a energia térmica, o valor da energia utilizada pelo sistema de secagem solar foi de 8,47 kWh. Após a determinação da energia térmica utilizada no experimento 5 com o auxílio da Equação 3.16 foi possível determinar o consumo específico de energia (CEE) para o experimento de secagem solar com estratégia de controle embarcada.

Assim, com os dados dos teores de umidade inicial e final do produto, considerando o valor total da amostra utilizada no experimento e a energia térmica recebida pela irradiação solar durante a realização do experimento 5, foi determinado o consumo específico de energia (CEE) para o referido experimento. Na Tabela 4.15 pode ser observado os valores da energia consumida, teor de umidade inicial e final do produto, massa inicial do produto, bem como o cálculo do consumo específico de energia do processo de secagem do experimento 5.

Tabela 4.15. Valores da energia consumida, teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto massa do inicial produto e consumo específico de energia do processo de secagem mista (EXP 5).

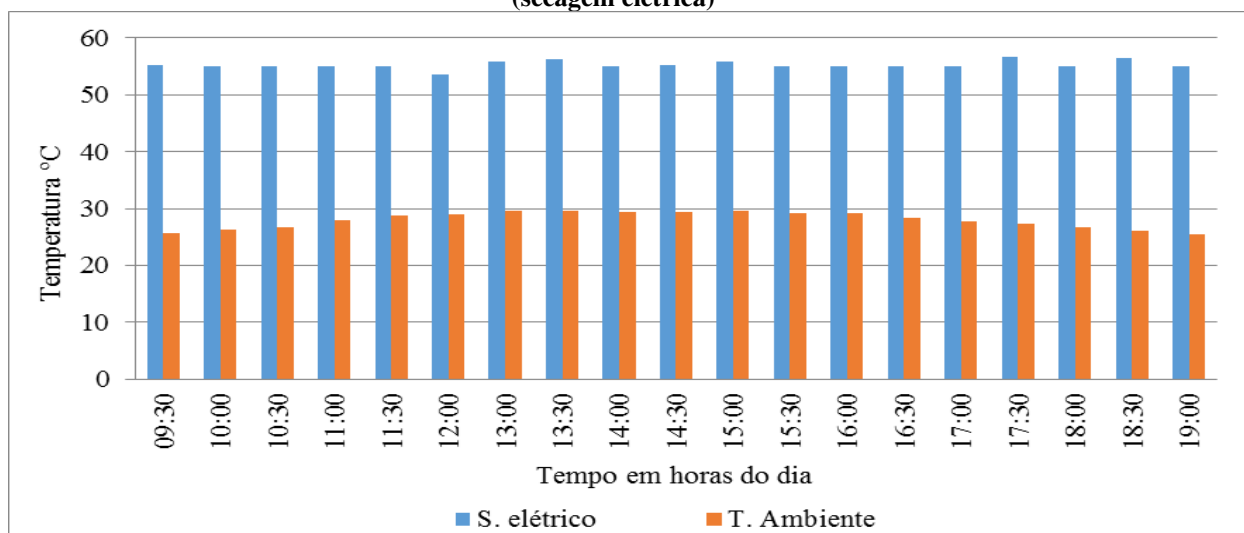
EC (kWh)	Ui (% bu)	Uf (% bu)	Mi (kg)	CEE (kWh/kg)
8,47	70	24,22	0,3	46,73

O CEE do experimento 5 foi de 46,73 kWh/kg de energia por ciclo (batelada). Com esse valor foi possível avaliar comparativamente a viabilidade econômica dos sistemas de secagem envolvidos nesta pesquisa.

4.1.6 Experimento 6 (EXP6), (secagem elétrica).

Na Figura 4.40, são mostrados os valores de temperatura do ar de secagem e da temperatura ambiente obtidos pelo sistema de aquisição de dados do secador elétrico e pela estação meteorológica do LEIAM/CEEI/UFMG, respectivamente.

Figura 4.40. Temperatura do processo de secagem elétrica e temperatura ambiente - experimento 6 (secagem elétrica)



As temperaturas no interior da câmara de secagem do secador elétrico foram estáveis, em resposta ao sistema de aquecimento e ao comando do controlador, mantendo a temperatura em níveis de variação muito pequenos. A temperatura no interior da câmara de secagem permaneceu em torno de $55^{\circ}\text{C} \pm 1,5^{\circ}\text{C}$, ou seja, temperaturas entre $56,5^{\circ}\text{C}$ e $53,5^{\circ}\text{C}$, comprovando neste experimento o que já havia sido atestado nos experimentos 1 e 2, que o controle de temperatura do secador elétrico apresenta uma resposta bastante eficiente na manutenção da temperatura do ar de processo.

Nos secadores de frutas em uso comercial, o controle das temperaturas são normalmente requisitos fundamentais para a obtenção de um produto de boa qualidade. Para tanto se deve observar as características do produto a ser seco. Neste caso para fins de comparação com o experimento 1 (secagem elétrica, com parâmetros de temperatura ajustados em 45° e umidade relativa de 30%), foram utilizadas 300 g (gramas) de banana (*Musa spp.*), temperatura de 55°C e umidade relativa de 30%.

A Figura 4.40 mostra que a máxima temperatura de processo do secador elétrico foi de 56,69°C às 17h30min do dia 17 de janeiro de 2017, enquanto a mínima foi de 53,56°C às 12h00min, verificando-se uma variação de 3,13°C, entre a máxima e a mínima temperatura registrada. Com este nível de variação, observa-se o equilíbrio térmico do sistema. Na manutenção das condições apropriadas do ar de secagem, este equilíbrio térmico permitiu que o modelo matemático proposto por Page se ajustasse bem aos dados experimentais da cinética de secagem do produto, como pode se visto na Figura 4.41. Outro dado a ser observado é que a variação da temperatura ambiente no decorrer do experimento que teve como máxima de 29,60°C às 13h30min e a mínima de 25,37°C às 19h00min, provocando uma variação de 4,23°C na temperatura ambiente, não interferiu na temperatura do processo, como já era esperado, comprovando a eficiência do sistema de controle do secador elétrico.

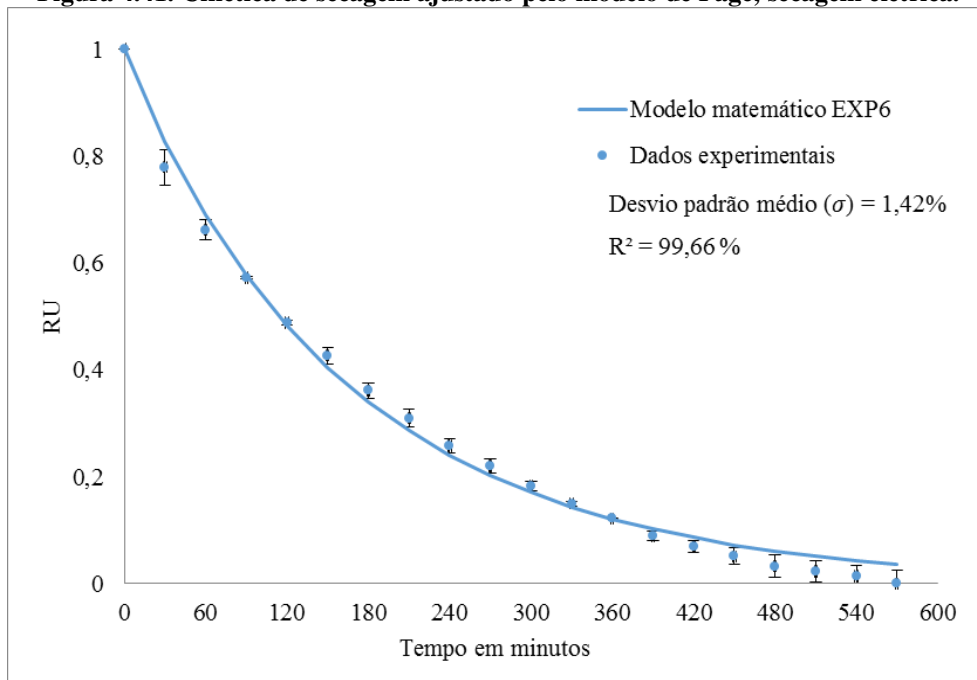
Com os valores da variação da massa da banana coletados a cada meia hora, sendo a primeira medição às 09h30min e a última às 19h00min do dia 17 de janeiro de 2017, foi obtida a curva de secagem apresentada na Figura 4.41, onde os pontos representam os valores de razão de umidade obtidos experimentalmente e a curva em linha cheia representa a cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page.

Para este experimento, o teor de umidade inicial da banana em base úmida foi de 70,59% e que, após nove horas e trinta minutos de secagem, o teor de umidade final ficou em 21,26%.

Nota-se que os valores experimentais obtidos no início do experimento se encontram próximos da linha do modelo matemático (modelo de Page), enquanto que os do final do experimento encontram-se um pouco abaixo da linha. Isto indica que a taxa de secagem nas primeiras horas é maior, pois foram retiradas mais gramas de água da banana, enquanto nas horas finais foram retirados menos gramas de água da banana. Isto ocorreu devido a facilidade

de remoção da água no início do processo, quando o teor de umidade ainda está muito elevado.

Figura 4.41. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, secagem elétrica.

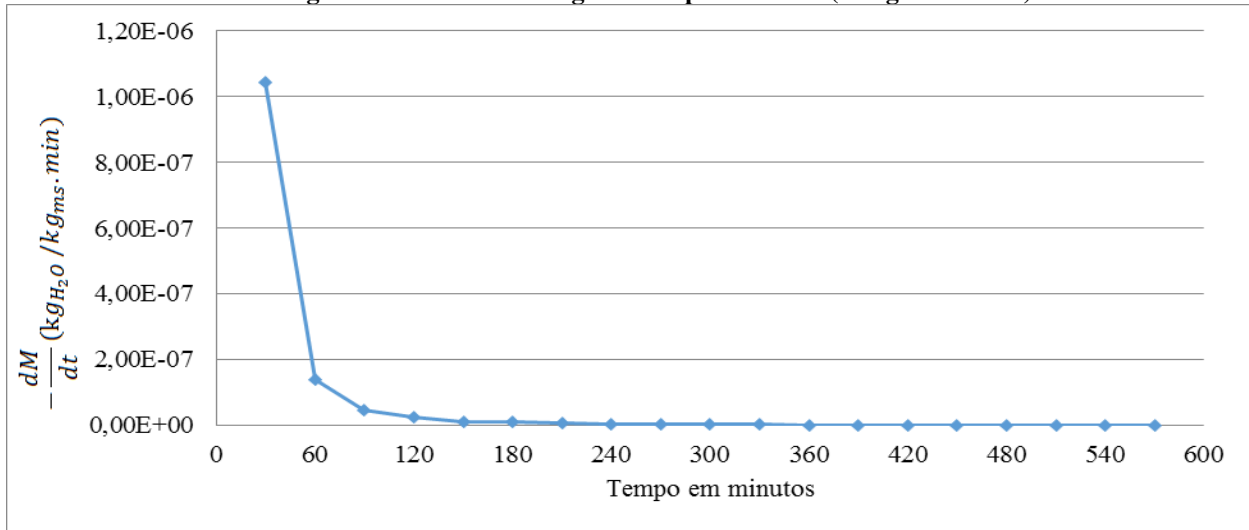


Com relação ao desvio padrão observado ao longo do experimento 6 (secagem elétrica), observou-se que os dados experimentais em comparação com o modelo matemático utilizado para análises dos resultados, apresentou um desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 1,42%. Ao longo do experimento foram observados algumas dispersões dos dados experimentais em comparação com o modelo matemático que destoaram do desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) do experimento. Entre os primeiro 30 minutos e 90 minutos do experimento, os dados experimentais e o modelo matemático apresentaram o desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 1,84% que foi também a maior média registrada do desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) do experimento. Já a menor média registrada do desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) do experimento foi entre 120 e 300 minutos do experimento, no qual os dados experimentais e o modelo matemático apresentaram o desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 1,22%. No tempo entre 330 e 570 minutos, o desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) registrado foi de 1,43%.

A Figura 4.42 representa a taxa de secagem do experimento 6 (secagem elétrica), observou-se que inicialmente a variação da taxa de secagem decresce de forma linear rapidamente até o tempo de 60 minutos do experimento. Em seguida, a taxa de secagem

descreve um comportamento exponencial até o tempo de 390 minutos de experimento e a partir deste ponto a variação da taxa de secagem permanece praticamente constante até o final do experimento apresentando apenas pequenas variações.

Figura 4.42. Taxa de secagem do experimento 6 (secagem elétrica)



Para o cálculo da eficiência mássica do processo de secagem em EXP6, foi utilizada a equação 3.40. Na Tabela 4.16 pode ser observado os valores da massa inicial, massa final, massa de água e eficiência mássica do processo de secagem do experimento 6 (secagem elétrica).

Tabela 4.16 Valores da massa inicial, massa final, massa de água e eficiência mássica do processo de secagem elétrica (experimento 6).

m_{inicial} (g)	m_{final} (g)	$m_{\text{água}}$ (g)	η_{p1} (%)
34,0	12,7	24,48	87,00

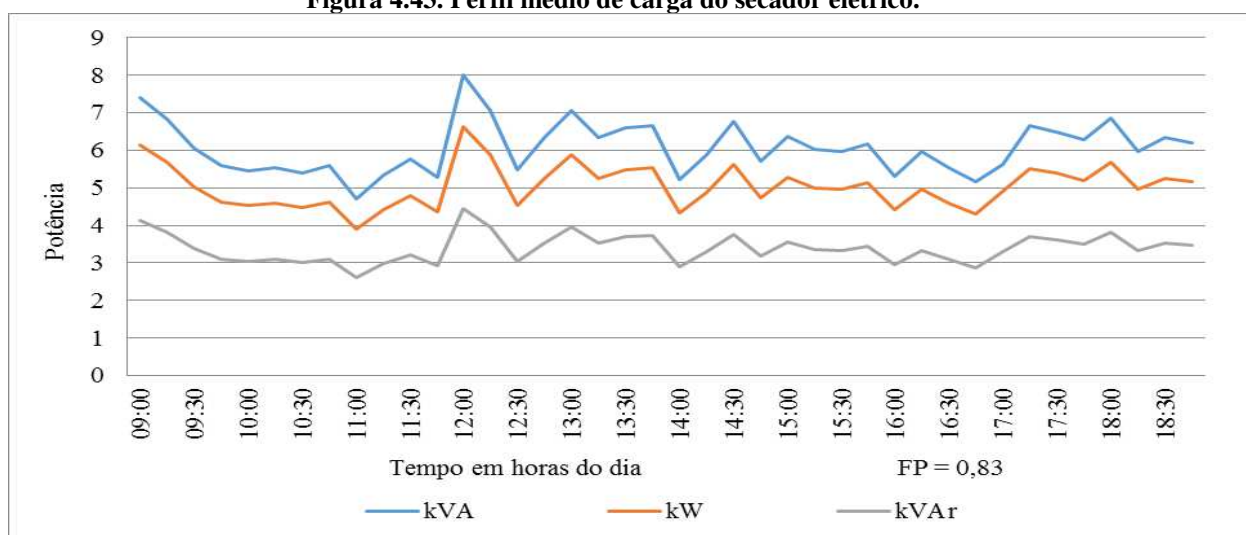
A elevada eficiência mássica do processo de secagem obtida no experimento 6 a exemplo da obtida no experimento 1, foi um indicativo importante da eficiência do processo utilizado, que em conjunto com outros indicativos avaliou o sistema de secagem elétrica na transferência de energia para o processo

O secador elétrico, por ter uma fonte de alimentação que apresenta pequenas variações e um sistema de controle que possibilita a correção das propriedades termodinâmicas do ar de secagem no decorrer do processo, tem um excelente desempenho no critério estabilidade, podendo promover a secagem dos produtos com as propriedades termodinâmicas

praticamente constantes ao longo de todo processo, contribuindo para que o modelo matemático proposto por Page se ajusta mais facilmente aos dados experimentais.

O sistema de secagem elétrico estudado neste trabalho apresenta características elétricas bastantes peculiares, com variações bastante acentuadas da potência instantânea. Nas Figuras 4.43 e 4.44 podem ser observados os gráficos do perfil médio e instantâneo da carga durante todo o experimento e durante a primeira hora do experimento, respectivamente. A potência média do sistema de secagem elétrica durante as 10 horas de funcionamento foi determinada com médias de potência realizadas em intervalos de 15 minutos. Nos primeiros trinta minutos de funcionamento, foi observado que a potência média deste período é bem maior do que nos períodos seguintes. Isto ocorre devido ao estado transitório, compreendido pelo início do processo de aquecimento e partida dos diversos sistemas que compõem o secador, até atingirem as condições de equilíbrio ajustadas para o início do processo de secagem.

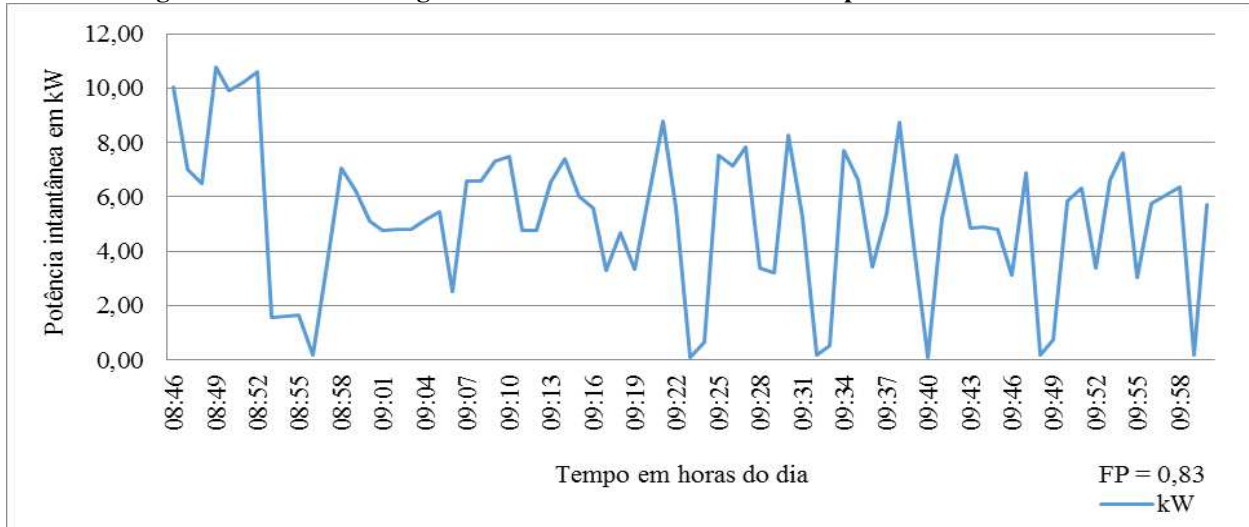
Figura 4.43. Perfil médio de carga do secador elétrico.



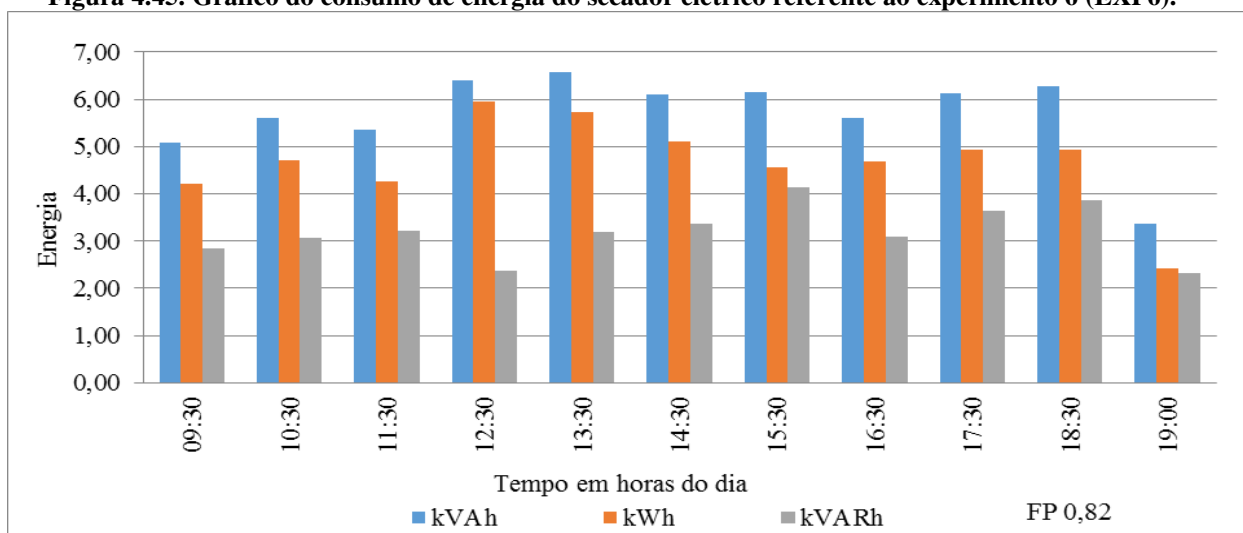
Na Figura 4.44, pode ser observado o comportamento da carga através da potência instantânea. O perfil de carga neste gráfico mostra as potências instantâneas integralizadas a cada um minuto, período compreendido pela aquisição e registros dos dados pelo analisador de qualidade de energia, apresentado na Figura 3.34. Analisando o gráfico, é possível observar que nos primeiros 30 minutos foi o período que houve uma maior oscilação da potência requerida pela carga. Esta variação ocorreu decorrente do estado transitório, período onde os diversos sistemas que compõem o secador elétrico são acionados, alguns

simultaneamente. Este estado permanece até a estabilização das propriedades termodinâmicas em torno dos parâmetros pré-definidos no início do processo, neste caso, temperatura de 55°C e umidade de 30%.

Figura 4.44. Perfil de carga instantâneo do secador elétrico no período de uma hora.



Na Figura 4.45, é apresentado o gráfico de consumo de energia utilizada no experimento 6. Neste gráfico podem ser observadas algumas informações relevantes ao processo. Os primeiros 45 minutos, período inicial de funcionamento, observou-se um consumo de energia de $E_S = 5,07$ kVAh, $E_P = 4,2$ kWh e $E_Q = 2,84$ kVAr. Apesar de numericamente inferior a média de consumo apresentada no gráfico, e bastante significativa por se tratar de 45 minutos de funcionamento, este valor acentuado no consumo de energia deve-se ao fato da energização dos sistemas que compõem o secador, já comentado anteriormente.

Figura 4.45. Gráfico do consumo de energia do secador elétrico referente ao experimento 6 (EXP6).

O secador elétrico durante o experimento 6, apresentou uma média horária de consumo de energia elétrica de $E_S = 5,93$ kVAh, $E_P = 4,91$ kWh e $E_Q = 3,27$ kVArh, e um consumo total de $E_S = 62,61$ kVAh, $E_P = 51,34$ kWh e $E_Q = 35,84$ kVArh, apresentando um fator de potência médio aproximado (FP) de 0,83, compreendendo o período de estabilização e o de processo de secagem, totalizando dez horas e quinze minutos de funcionamento ininterruptos. O menor consumo de energia foi de $E_S = 5,35$ kVAh, $E_P = 4,27$ kWh e $E_Q = 2,36$ kVArh, no horário entre 10h30min e 11h30min e o maior foi entre as 12h30min e 13h30min com potências na ordem de $E_S = 6,56$ kVAh, $E_P = 5,73$ kWh e $E_Q = 3,19$ kVArh. Neste período foi também onde houve o melhor aproveitamento da energia entregue ao sistema de secagem. O fator de potência (FP) registrado do período foi de 0,93, característica de carga mais resistiva do que indutiva. A variação máxima do consumo de energia durante o experimento foi de $E_S = 1,21$ kVAh, $E_P = 1,46$ kWh, comprovando que quando o secador atinge o seu estágio de equilíbrio, a variação média da energia consumida é pequena, apesar da variação instantânea da potência ao longo do experimento ser bastante acentuada, como mostrado na Figura 4.44, onde podem ser observadas variações em torno de 6 kW na potência instantânea. Isto ocorre devido aos diversos sistemas que compõem o secador elétrico atuarem em muitos casos simultaneamente para a manutenção do controle das propriedades termodinâmicas.

Para fins de avaliação econômica do sistema de secagem elétrico, bem como avaliações comparativas com outros sistemas, será considerado como energia útil ao processo, apenas aquela que foi desprendida efetivamente para a secagem do produto. Sendo assim, a

potência utilizada na fase inicial não será contabilizada neste primeiro momento, considerando-se apenas a energia desprendida na secagem do produto até o valor imediatamente inferior a 25% da umidade em base úmida. Estes critérios visam poder avaliar comparativamente de forma mais aproximada da realidade os sistemas de secagem solar, secagem mista e secagem elétrica. Outro dado importante de ser mencionado é que para o cálculo do consumo específico de energia foi utilizado a energia ativa (E_p) expressa em kWh, porque a energia aparente (E_s) expressa em kVAh pode ser reduzida com a redução da energia reativa (E_Q) feito com a correção do fator de potência (FP).

Considerando estes critérios, o período a ser analisado é compreendido entre as 09h30min a 18h00min do dia 17 de janeiro de 2017, totalizando oito horas e trinta minutos de funcionamento do secador elétrico, que de acordo com os dados mostrados na Figura 4.45, representa um consumo de $E_p = 42,39$ kWh. Com base nestas informações é possível determinar o consumo específico de energia (CEE) do secador elétrico, que forneceu informações relevantes para a avaliação econômica do sistema de secagem elétrica.

Com o auxílio da Equação 3.16 foi possível determinar o consumo específico de energia. Na Tabela 4.17 são apresentados os valores da energia consumida, umidade inicial do produto, umidade final do produto massa do inicial produto e consumo específico de energia do processo de secagem do experimento 6 (secagem elétrica).

Tabela 4.17 Valores da energia consumida, teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final do produto, massa inicial do produto e consumo específico de energia do processo de secagem elétrica - EXP6

Informações elétricas do secador				Dados do processo				
E_s (kVAh)	E_p (kWh)	E_Q (kVArh)	FP	EC (kWh)	U_i (%)	U_f (%)	M_i (kg)	CEE (kW/kg)
62,61	51,34	35,84	0,82	42,39	70,59	24,24	0,3	225,54

O CEE do experimento 6 foi de 225,54 kWh/kg de energia por ciclo (batelada). Com esse valor é possível avaliar comparativamente a viabilidade econômica dos sistemas de secagem envolvidos nesta pesquisa.

4.2 Análise energética do sistema de secagem solar

A análise energética do sistema de secagem solar foi realizada para os experimentos 3 (EXP3) e 4 (EXP4), experimentos realizados com a adoção de estratégia de controle da convecção do ar de secagem e sem a estratégia mencionada. A análise energética será feita mediante os cálculos utilizando as propriedades termodinâmicas do ar de secagem (temperatura e umidade relativa) medidas nas partes que compõe o secador solar (coletor solar e câmara de secagem), essas propriedades foram medidas na entrada e na saída do coletor solar, bem como na entrada e na saída da câmara de secagem. Com o auxílio do programa CATT, determinou-se as entalpias nas entradas e saídas do coletor solar e da câmara de secagem.

4.2.1 Eficiência do sistema de secagem solar no EXP3.

4.2.1.1 Eficiência térmica do coletor solar

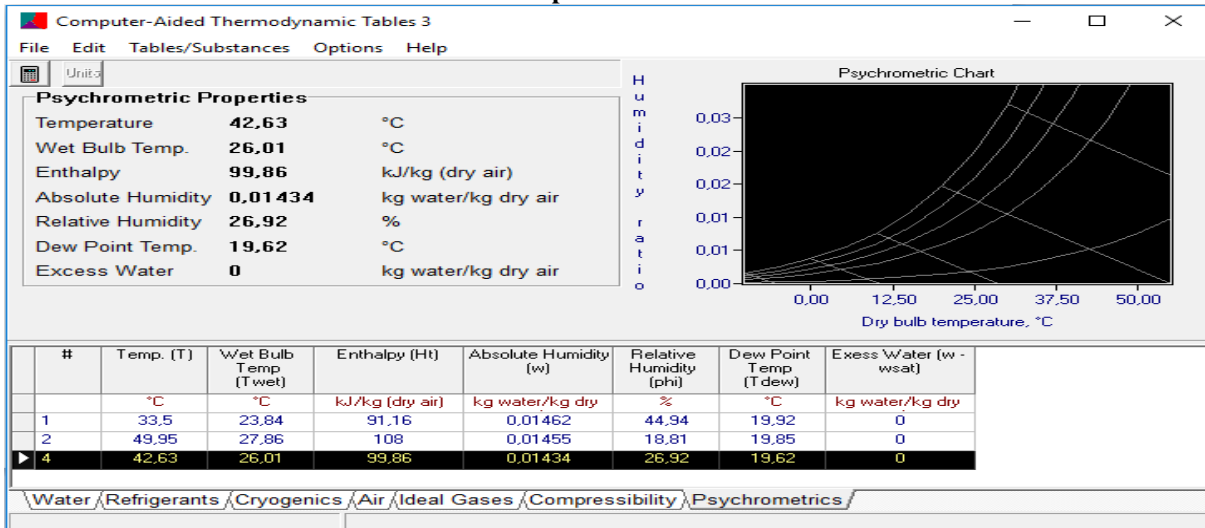
Na Tabela 4.18, pode ser observados os valores, da vazão mássica do ar de secagem, da entrada e na saída do coletor solar. Os valores das entalpias de entrada e saída (h_1 e h_2) do coletor solar, calculadas pelo *Computer Aided Thermodynamic Tables* (CATT), utilizando apenas os dados das médias da temperatura e da umidade relativa do ar medidos durante a realização do experimento 3.

Tabela 4.18. Dados obtidos do processo de secagem do experimento 3- (secagem solar com controle): vazão mássica, média da irradiação solar, entalpias de entrada e saída do coletor, área de incidência do coletor solar, rendimento térmico do secador.

$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ (kg/s)	\bar{G} (W/m ²)	h_1 (kJ/kg)	h_2 (kJ/kg)	A (m ²)	η_{coletor} (%)
0,009795	592,32	91,16	108	1	27,85

O CATT, mostrado na Figura 4.46, apresenta como resultado os valores de entalpia e as demais propriedades termodinâmicas resultantes das medições realizadas. Com os valores obtidos e substituídos na Equação 3.31 foi calculado o rendimento térmico do coletor (η_{coletor}).

Figura 4.46. Dados das propriedades termodinâmicas do ar de secagem, obtidos com uso do CATT, Experimento 3.



4.2.1.2 Eficiência térmica da câmara de secagem

A Equação 3.37, é obtida como resultado da aplicação da primeira lei da termodinâmica ao volume de controle aplicado na câmara de secagem, mostrado na Figura, 3.46. Substituindo os valores obtidos, mostrados na Figura 4.46, onde h_3 e h_4 são as entalpias de entrada e saída do ar na câmara de secagem, calculadas pelo CATT e h_v obtido do trabalho de Moran e Shapiro, 2009. Com esses dados foi possível determinar o rendimento da câmara de secagem ($\eta_{câmara}$), apresentado na Tabela 4.19.

Tabela 4.19. Dados obtidos do processo de secagem do experimento 3- (secagem solar com controle): vasão mássica, entalpias de entrada e saída do câmara, massa de água retirada, rendimento térmico da câmara.

$\dot{m}_2 = \dot{m}_3$ (kg/s)	\dot{m}_4 (kg/s)	$\dot{m}_{\text{massa de água}}$ (kg/s)	h_v (kJ/kg)	\dot{E}_b (kJ/s)	$h_3 = h_2$ (kJ/kg)	h_4 (kJ/kg)	$\eta_{câmara}$ (%)
0,009795	0,0097953	$3,571 \times 10^{-6}$	2.578,75	$9,209821 \times 10^{-3}$	108	99,86	93,33

4.2.1.3 Eficiência térmica do secador solar no EXP3:

A Equação 3.39, é obtida como resultado da aplicação da primeira lei da termodinâmica ao volume de controle aplicado no secador solar, Figura 3.46. Substituindo os valores de rendimento, já calculados para o coletor solar, tem-se que o rendimento do secador solar é o mesmo rendimento do coletor solar, que no experimento 3 apresentou rendimento de 27,85%.

4.2.2 Eficiência do sistema de secagem solar no EXP4.

4.2.2.1 Eficiência térmica do coletor solar

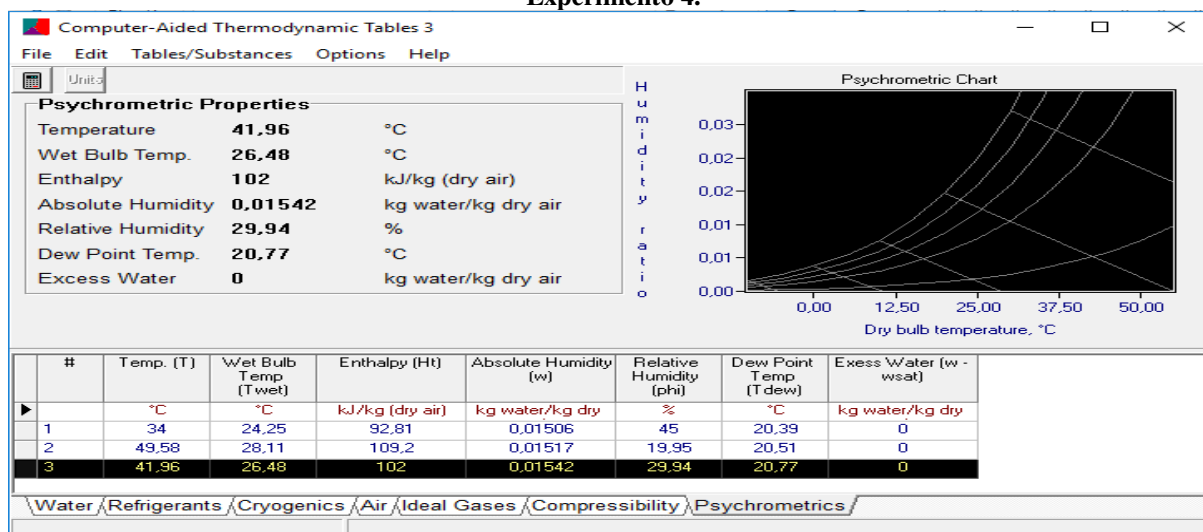
Na Tabela 4.20, pode ser observados os valores, da vazão mássica do ar de secagem, da entrada e na saída do coletor solar. Os valores das entalpias de entrada e saída (h_1 e h_2) do coletor solar, calculadas pelo *Computer Aided Thermodynamic Tables* (CATT), utilizando apenas os dados das médias da temperatura e da umidade relativa do ar medidos durante a realização do experimento 4.

Tabela 4.20. Dados obtidos do processo de secagem do experimento 4 (secagem solar sem controle): vazão mássica, média da irradiação solar, entalpias de entrada e saída do coletor, área de incidência do coletor solar, rendimento térmico do secador.

$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ (kg/s)	\bar{G} (W/m ²)	h_1 kJ/kg	h_2 kJ/kg	A (m ²)	η_{coletor} (%)
0,01071	572,62	92,81	109,2	1	30,65

O CATT, mostrado na Figura 3.47, apresenta como resultado os valores de entalpia e as demais propriedades termodinâmicas resultantes das medições realizadas. Com os valores obtidos e substituídos na Equação 3.31 foi calculado o rendimento térmico do coletor (η_{coletor}).

Figura 4.47. Dados das propriedades termodinâmicas do ar de secagem, obtidos com uso do CATT, Experimento 4.



4.2.2.2 Eficiência térmica da câmara de secagem

A Equação 3.37, é obtida como resultado da aplicação da primeira lei da termodinâmica ao volume de controle aplicado na câmara de secagem, mostrado na Figura, 3.46. Substituindo os valores obtidos, mostrados na Figura 4.47, onde h_3 e h_4 são as entalpias de entrada e saída do ar na câmara de secagem, calculadas pelo CATT, h_v foi obtido do trabalho de Moran e Shapiro, 2009. Com esses dados foi possível determinar o rendimento da câmara de secagem ($\eta_{câmara}$), apresentado na Tabela 4.21.

Tabela 4.21. Dados obtidos do processo de secagem do experimento 4 (secagem solar sem controle): vazão mássica, entalpias de entrada e saída do câmara, massa de água retirada, rendimento térmico da câmara.

$\dot{m}_2 = \dot{m}_3$ (kg/s)	\dot{m}_4 (kg/s)	$\dot{m}_{\text{massa de água}}$ (kg/s)	h_v (kJ/kg)	\dot{E}_b (kJ/s)	$h_3 = h_2$ (kJ/kg)	h_4 (kJ/kg)	$\eta_{câmara}$ (%)
0,01071	0,010713	$3,571 \times 10^{-6}$	2.578,75	$9,209821 \times 10^{-3}$	109,2	102	94,22

4.2.2.3 Eficiência térmica do secador solar no EXP4:

A Equação 3.39, é obtida como resultado da aplicação da primeira lei da termodinâmica ao volume de controle aplicado no secador solar, Figura 3.46. Substituindo os valores de rendimento, já calculados para o coletor solar, tem-se que o rendimento do secador solar é o mesmo rendimento do coletor solar, que para o experimento 4 apresentou rendimento de 30,65%.

Como pode ser visto, o rendimento térmico obtido a partir dos dados de medição da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem, na entrada e na saída do coletor solar foi de 27,85 % para o experimento 3 e 30,65% para o experimento 4. Verifica-se que os valores do cálculo do rendimento térmico para os ambos os experimentos foram elevados, apesar das condições atípicas em que foram realizados os experimentos, mas ligeiramente acima dos reportados na literatura por (FUDHOLI et al., 2014).

4.2.3 Rendimento médio do secador solar

Para os cálculos dos rendimentos do coletor solar, experimentos de 3 a 5, foi feita uma média das temperaturas do ar de secagem na entrada e na saída do coletor solar, conforme Equação 3.41.

Portanto, na Tabela 4.22 estão alguns parâmetros das condições de secagem encontradas em cada processo.

Tabela 4.22. Parâmetros de Secagem.

Experimentos	Datas do Processo	\bar{R}_{med} [W/m ²]	$\bar{T}_{ent.col}$ [°C]	$\bar{T}_{sai.col}$ [°C]	$\bar{\Delta T}$ [°C]	\bar{V}_{ar} [m/s]
3	15 a 16 / 06 / 2016	592,32	30,38	49,76	19,38	0,320
4	07 e 08 / 07 / 2016	572,62	32,49	49,96	17,47	0,360

Na Tabela 4.23, são apresentados os dados referentes às propriedades do ar de secagem.

Tabela 4.23. Propriedade do ar de secagem.

Parâmetro	Valor	Unidade
Massa específica	1,2754	kg/m ³
Calor específico	1,0048	kJ/kg.K

Dessa forma, tem-se, na Tabela 4.24, os valores referentes à potência transferida ao fluido de trabalho durante cada processo e, por conseguinte, o rendimento térmico do equipamento.

Tabela 4.24. Potência útil e rendimento do coletor solar para cada processo.

Experimentos	Datas do Processo	$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$ [W]	$\eta_t = \frac{P_u}{A_1 \cdot \bar{G}} \cdot 100$ [%]
3	15 a 16 / 06 / 2016	177,02	29,88
4	07 e 08 / 07 / 2016	167,66	29,27

A Tabela 4.25 mostra as eficiências térmicas (reais) do coletor solar, e, portanto, do secador solar dadas pelas Equações 3.31, 3.37 e 3.39, respectivamente.

Tabela 4.25. Eficiências térmicas do coletor solar.

Experimentos	$\eta_{coletor}$ [%]
EXP3	27,85
EXP4	30,65

4.3 Análises dos resultados dos experimentos EXP1, EXP2, EXP3, EXP4, EXP5 e EXP6.

A análise dos resultados dos experimentos foi feita observando os critérios da análise da cinética de secagem por meio do gráfico que representa o modelo matemático modificado por Page, do consumo específico de energia, do cálculo da eficiência mássica do processo de secagem, tempo de processo e aspecto visual do produto.

4.3.1 Análise comparativa dos gráficos que representam a cinética de secagem.

Na Figura 4.48, pode ser observado os gráficos das cinéticas de secagem dos experimentos 1, 2 e 5. No experimento 1 (EXP1) utilizando a secagem elétrica, pode-se observar que os valores experimentais encontram-se sobre a linha do modelo matemático (modelo de Page). Este comportamento ocorre durante praticamente todo o período de realização do experimento, a resposta dos controles as variações das propriedades termodinâmicas do secador elétrico, são rápidas e eficientes na correção e na manutenção das propriedades envolvidas no processo de secagem. As condições de temperatura e umidade se mantiveram praticamente inalteradas, durante todo o processo de secagem. Observa-se que os pontos que representam os valores experimentais começaram afastar-se do modelo matemático no tempo de 840 minutos ou quatorze horas de experimento, neste período o produto já apresentava um teor de umidade da ordem de 24,70%, atendendo já as especificações da norma vigente e ao final do processo de secagem o produto registrou um teor de umidade de em base úmida de 20,74 %.

No gráfico que representa a cinética de secagem do experimento 2 (EXP 2), secagem mista (secagem solar seguida de secagem elétrica), observa-se um comportamento distinto nas duas partes do experimento. Na primeira parte do experimento a secagem foi realizada em um

sistema de secagem variável, devido a variação da temperatura ocasionada pelo fator intermitente da irradiação solar. Observa-se, mesmo com essas características intermitente da irradiação solar, o sistema de controle da convecção forçada atuou e manteve a estabilidade térmica do sistema, apresentando um desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 2,45%, dos dados experimentais em relação ao modelo matemático.

Do início do experimento até o período de 240 minutos os pontos correspondentes aos dados experimentais estavam ligeiramente abaixo da linha que representa o modelo matemático de Page, com um desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 2,34%, dos dados experimentais em relação ao modelo matemático. Devido principalmente a atuação do sistema de controle da temperatura e melhoria das condições meteorológicas, não ocorreu uma maior dispersão dos dados e o modelo pode se ajustar melhor aos dados experimentais.

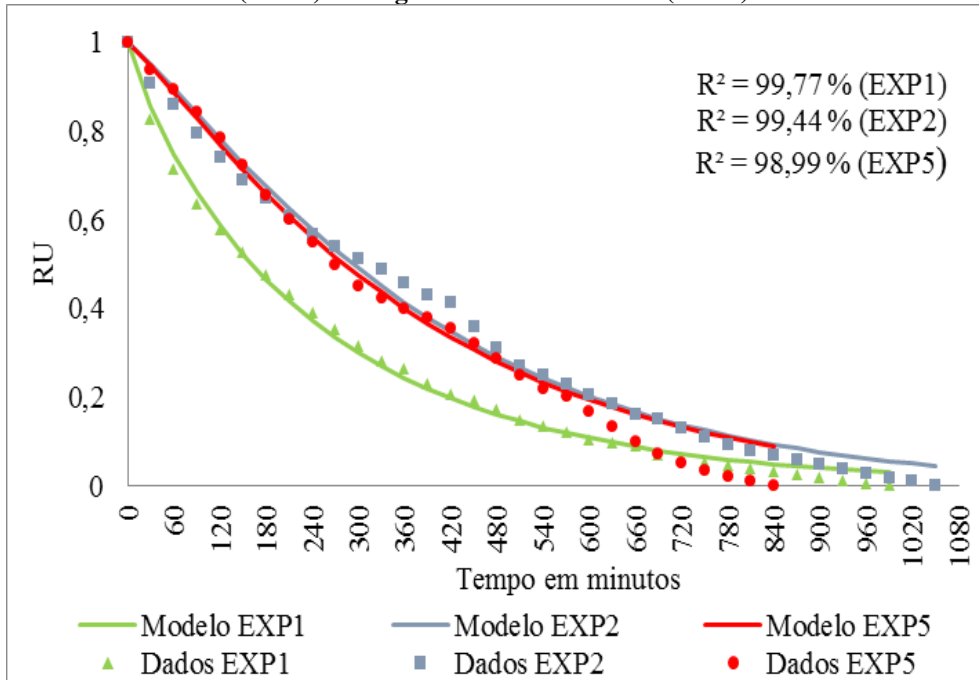
Entre o período de 270 e 420 minutos foi registrado o maior desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) da primeira parte do experimento, da ordem de 2,6%. Neste momento os dados experimentais estavam ligeiramente acima da linha que representa o modelo matemático, com cinética de secagem em taxa constante, devido principalmente a atuação do sistema de controle da temperatura, que neste período estava atuando no intuito de manter a temperatura mais estável no interior da câmara. Neste intervalo o sistema de convecção forçada estava desligado e a convecção do ar ocorreu de forma natural.

Na segunda parte do experimento realizada no secador elétrico, onde registrou-se pequenas oscilações da temperatura em torno dos parâmetros ajustados no processo, o modelo matemático passa a se ajustar melhor aos dados experimentais com desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 1,41%. No intervalo entre 450 e 720 minutos o desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) foi de 0,67%, o que indica que o modelo matemático estava se ajustando bem aos dados experimentais. No intervalo de 750 a 1050 minutos o desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) foi de 2,1%, neste período a cinética de secagem estava mais lenta em decorrência do baixo teor de umidade do produto.

No gráfico que representa o experimento 5, realizado exclusivamente com energia solar e com o controle da convecção, observa-se que os pontos que representa os valores experimentais permanecem próximos a linha que representa o modelo matemático. Este fato

ocorreu principalmente, pela a ação do sistema de controle que atuou na estabilização da temperatura do interior da câmara de secagem, garantindo a estabilidade do sistema.

Figura 4.48. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, secagem elétrica (EXP1), secagem mista (EXP2) e secagem solar com controle (EXP5).



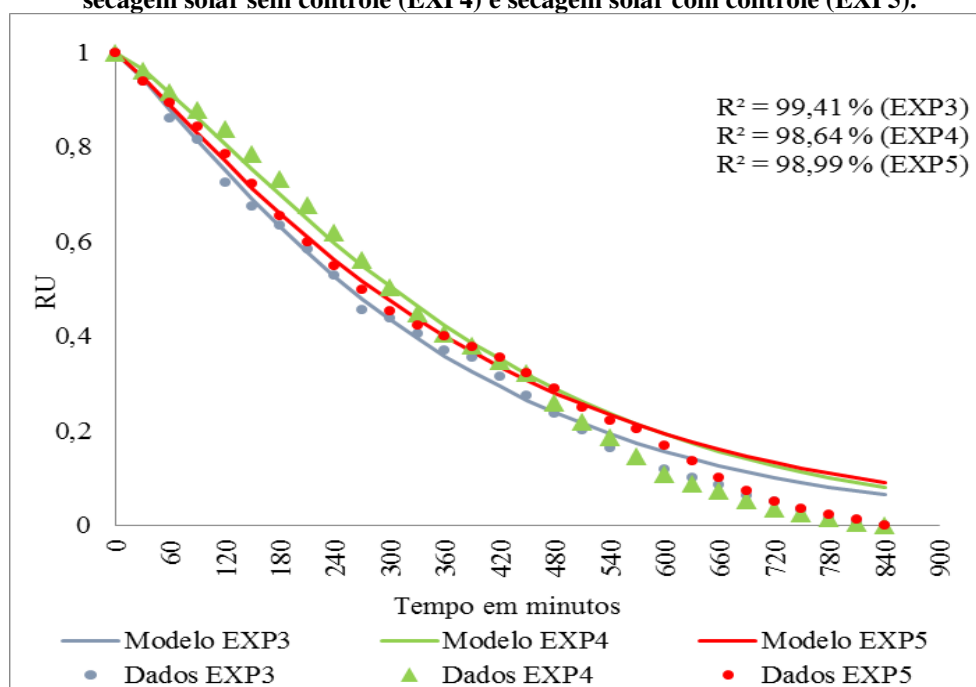
Comparando o desvio padrão médio dados experimentais em relação ao modelo matemático utilizado nos experimentos 1, 2, e 5, pode-se verificar que o modelo matemático se ajustou melhor aos dados do experimento 1 (secagem elétrica) com desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 1%.

Na sequência, aos dados do experimento 2 (secagem mista) com desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) 1,83% e por fim aos dados do experimento 5 (secagem solar com controle) com desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 2,16%. Mesmo apresentando a maior média do desvio padrão dos três experimentos, pode-se observar que a diferença do desvio padrão do experimento 5 em comparação com os demais não é muito grande, sendo um percentual de 1,16% a mais em comparação com a secagem elétrica e 0,33% a mais em comparação com a secagem mista.

Como pôde ser observado comparativamente, a cinética de secagem apresentada no experimento 1, é a que o modelo matemático proposto por Page melhor se ajustou, que doravante será utilizada como referencial para a análises dos demais experimentos realizados neste trabalho.

Na Figura 4.49, pode ser observado os gráficos das cinéticas de secagem dos experimentos 3, 4 e 5 (EXP3, EXP4 e EXP5) respectivamente. Nestes experimentos foi utilizada apenas a energia solar no processo de secagem. Nos experimento 3 e 5, foi introduzido uma estratégia de controle da temperatura da câmara de secagem do secador solar, esta aplicação nestes experimentos teve como objetivo manter a temperatura do ar no interior da câmara dentro de níveis mais estáveis possíveis. A utilização desta estratégia nestes dois experimentos teve como finalidade testar o seu funcionamento em duas estações do ano, que nestes casos foram final do outono, onde as condições meteorológicas são menos propícias devido a baixas temperaturas e baixos níveis de incidência de irradiação solar. A outra estação foi a primavera, onde as condições de temperatura são melhores, mas apresentou como singularidade, uma baixa incidência de irradiação solar devido a uma grande nebulosidade predominante da estação.

Figura 4.49. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, secagem solar com controle (EXP3), secagem solar sem controle (EXP4) e secagem solar com controle (EXP5).



Nestas condições foram realizados os experimentos três e cinco. O experimento quatro foi realizado quando a estação do inverno já havia iniciado. Neste experimento especificamente não foi adotada a estratégia de controle da temperatura da câmara de secagem do secador, ao contrário dos experimentos três e cinco. Esta não utilização do sistema de controle adotado nos experimentos mencionado teve por finalidade fazer uma análise comparativa da funcionalidade da estratégia de controle sugerida, que tem como proposta

promover a manutenção da estabilidade da temperatura da câmara de secagem em condições adversas.

Analisando o resultado destes três experimentos, pode-se verificar que a estratégia adotada é bastante eficiente no que se propõe, mas que depende das condições climáticas que apresentam características intermitentes ao longo do dia e das estações do ano. Os resultados comprovam que a estratégia de controle da convecção forçada do secador consegue manter um equilíbrio melhor da temperatura interna da câmara de secagem, inibindo o fluxo de ar no interior da câmara de secagem quando a temperatura está abaixo das condições consideradas adequadas para secagem. Esta alegação tem por base a análise do gráfico que representa a cinética de secagem nos experimentos EXP3, EXP4 e EXP5 e o desvio padrão médio dos dados experimentais em relação ao modelo matemático utilizado.

Analisando os gráficos dos experimentos três, quatro e cinco apresentados na Figura 4.49, observa-se que no início do processo de secagem quando o teor de umidade no produto é maior, a cinética de secagem tem um comportamento muito parecido devido à facilidade da retirada da água onde não requer muito energia do sistema de secagem. Ao serem comparados, é possível observar que nos experimentos 3 e 5 onde o sistema de controle de temperatura estava atuando, o modelo matemático proposto por Page ajustou-se bem aos pontos que representam os dados experimentais da razão de umidade. Este comportamento foi observado no experimento 3 até o tempo de 660 minutos (onze horas) de experimento e a partir deste momento o modelo matemático não mais se ajustou aos dados experimentais. No experimento 5 o modelo matemático se ajustou aos dados experimentais até o tempo de 600 minutos (dez horas) de experimento, este fato se deve principalmente pela atuação do sistema de controle na manutenção e estabilização da temperatura no interior da câmara de secagem.

No experimento 4 (experimento de secagem solar sem utilização de estratégia de controle), o modelo matemático se ajustou aos dados experimentais apenas no primeiro dia, justamente no período onde o produto apresenta maior teor de umidade e que apresentou menor variação de temperatura. Assim pode-se concluir que o sistema de controle da temperatura da câmara de secagem do secador solar nos experimentos 3 e 5, contribui na tentativa de manter as condições de temperatura interna da câmara de secagem mais estáveis possível. Comparando os gráficos da cinética de secagem dos três experimentos (EXP3, EXP4 e EXP5) com o gráfico que representa a cinética de secagem do experimento 1 (EXP1),

secagem elétrica, pode-se observar que os gráficos dos experimentos três e cinco, que foram adotada a estratégia de controle da convecção da câmara de secagem, foram os que mais se aproximaram da cinética de secagem realizada pelo secador elétrico.

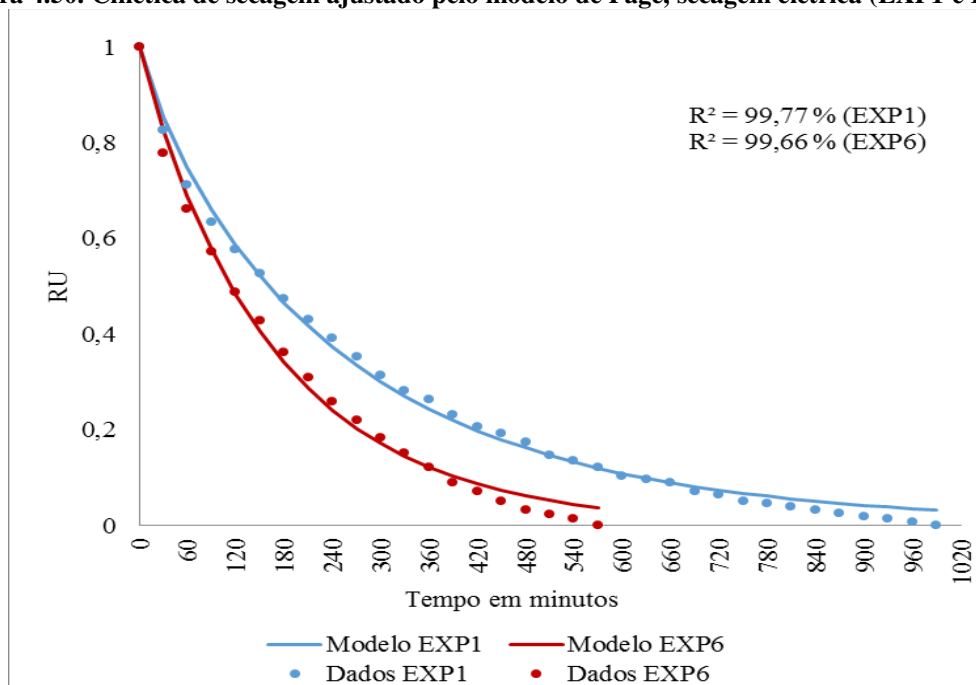
Comparando o desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) dos dados experimentais em relação ao modelo matemático utilizado nos experimentos 3, 4, e 5 pode-se verificar que o modelo matemático ajustou-se melhor aos dados do experimento 3 (secagem solar com controle) com desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 1,9%. Na sequência, aos dados do experimento 5 (secagem solar com controle) com desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 2,16% e por fim aos dados do experimento 4 (secagem solar sem controle) com desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 3,05%. Observa-se que os experimentos 3 e 5 (secagem solar com controle) apresentaram um menor desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) dos dados experimentais em relação ao modelo matemático proposto por Page. Este fato se deu em decorrência da estratégia de controle ter garantido uma maior estabilidade da temperatura de processo nos referidos experimentos.

Na Figura 4.50, pode ser observado os gráficos das cinéticas de secagem dos experimentos 1 e 6, secagens elétricas. No experimento 6 (EXP6) os parâmetros de temperatura e umidade foram ajustados para 55°C e 30% respectivamente, enquanto no experimento 1 as propriedades termodinâmicas foram ajustadas em 45°C, a temperatura e 30%, a umidade. Esta modificação nas condições de operação do sistema de secagem elétrica teve como objetivo avaliar a influência da temperatura no tempo de secagem, bem como no consumo específico de energia do sistema. Analisando os gráficos com relação à cinética de secagem, pode-se observar que nos dois experimentos os valores experimentais encontram-se sobre a linha do modelo matemático (modelo de Page). Este comportamento ocorre durante praticamente todo o período de realização dos experimentos, demonstrando que o modelo matemático proposto por Page se ajustou bem aos dados experimentais devido principalmente a respostas rápidas e eficientes dos controles das variações das propriedades termodinâmicas do secador elétrico nos dois experimentos, na correção e na manutenção das propriedades envolvidas no processo de secagem. As condições de temperatura e umidade se mantiveram praticamente inalteradas, durante todo o processo de secagem, em ambos os experimentos. Observa-se que o modelo matemático começa a não mais acompanhar os pontos que representam os valores experimentais no tempo de 840 minutos ou quatorze horas no experimento 1. Neste período o produto já apresentava um teor de umidade da ordem de

24,70%, atendendo já as especificações da norma vigente, Ao final do processo de secagem, o produto registrou um teor de umidade em base úmida de 20,74%. No experimento 6 o modelo começou a se afastar dos dados experimentais com 450 minutos do experimento, neste período o teor de umidade ainda não havia atingido o percentual de 25% em base úmida, esse percentual foi atingido com 480 minutos do experimento. Ao final do processo o produto atingiu um percentual de 21,26% de teor de umidade em base úmida.

Comparativamente pode-se observar que o modelo matemático proposto por Page se ajustou bem as cinéticas de secagens apresentadas nos experimentos 1 e 6. Isto se deu principalmente pelo equilíbrio das propriedades termodinâmicas apresentadas em ambos experimentos.

Figura 4.50. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, secagem elétrica (EXP1 e EXP6).



Comparando o desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) dos dados experimentais em relação ao modelo matemático utilizado nós experimento 1 e 6 pode-se verificar que o modelo matemático ajustou-se melhor aos dados do experimento 1 (secagem elétrica) com desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 1,0% e na sequência aos dados do experimento 6 (secagem elétrica) com desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) de 1,42%.

4.3.1.1 Análise comparativa dos gráficos de temperatura e irradiação solar.

O experimento 3 (EXP3) apresentou uma temperatura média no interior da câmara de secagem do secador nos dois dias de realização do experimento de 41,31°C e de 42,62°C, e média de irradiação solar de 601,33 W/m² e 583,31 W/m², respectivamente. O tempo de acionamento da convecção forçada no experimento três foi de sete horas e quarenta e oito minutos, de um total de quatorze horas de experimento.

No experimento quatro (EXP4), as médias das temperaturas registradas no interior da câmara de secagem nos dois dias de experimento foram de 37,98°C e 46,14°C e média da irradiação solar de 518,84 W/m² e 626,41 W/m², respectivamente. Um fato relevante a ser informado é que durante a realização deste experimento, o segundo dia apresentou um excepcional índice de irradiação solar para a estação, como pode ser observado nos gráficos das Figuras 4.26 exceto na última hora do experimento, mas que não teve relevância, pois o produto já havia atingido o percentual exigido pela Resolução RDC nº 272, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Desconsiderando esta última hora do experimento, a média de irradiação solar do último dia foi de 700 W/m² e com média de temperatura neste mesmo período na ordem de 48°C. Neste experimento, a convecção forçada ficou acionada durante todo o período que durou o experimento, quatorze horas no total.

Durante a realização do experimento cinco (EXP5), as médias das temperaturas registradas no interior da câmara de secagem foram de 40,74°C e 37,79°C e média de irradiação solar de 665,92 W/m² e 545,57 W/m², respectivamente. O tempo de acionamento da convecção forçada no experimento cinco foi de sete horas e quarenta e seis minutos, de um total de quatorze horas de experimento.

4.3.2 Análise comparativa do consumo específico de energia (CEE).

Analisando os seis experimentos segundo o aspecto energético pode-se observar que no experimento 1 (EXP1), secagem elétrica, teve duração de dezesseis horas e meia, mas para fins de cálculo do consumo de energia foi considerado apenas o tempo necessário para a secagem do produto que atendesse o percentual de 25%, resultando em quatorze horas de

experimento. Este experimento apresentou um consumo específico de energia (CEE) de $379,33 \frac{kWh}{kg}$, ou seja, 379,33 kWh de energia por ciclo (batelada).

No experimento dois (EXP2) secagem mista (secagem solar seguida de elétrica), o tempo de processo foi de dezessete horas, sendo sete horas de secagem solar e dez horas de secagem elétrica para atingir o percentual especificado pela norma vigente de 25% de umidade em base úmida. O consumo específico de energia neste experimento foi de $295,87 \frac{kWh}{kg}$, ou seja, 295,87 kWh de energia por ciclo (batelada). A secagem solar contribui com 8,19 % e secagem elétrica com 91,81 % da energia fornecida ao processo de secagem mista que, em comparação com o experimento 1, secagem elétrica, pode-se observar uma redução de 77,46 kWh/kg de energia que representa um percentual de redução de 20,42% do total da energia utilizada no experimento 1.

O experimento três (EXP3) secagem solar com utilização da estratégia de controle do sistema de exaustão, teve uma duração de quatorze horas, o consumo específico de energia (CEE) foi de $47,96 \frac{kWh}{kg}$, ou seja, 47,96 kWh de energia por ciclo (batelada) com massa de 300g. Neste experimento o produto atingiu um percentual de 24,15 % de umidade em base úmida.

O experimento quatro (EXP4) é o de secagem solar sem adoção de estratégia de controle do sistema de exaustão. Neste experimento o sistema de exaustão não sofreu nenhuma intervenção, ficou conectado diretamente ao painel fotovoltaico, dependendo exclusivamente da energia solar fotovoltaica para funcionar. Este experimento teve uma duração de quatorze horas e o seu consumo específico de energia foi de $42,73 \frac{kWh}{kg}$, ou seja, 42,73 kWh de energia por ciclo (batelada). Neste experimento o produto atingiu um percentual de 17,44 % de umidade em base úmida.

O experimento cinco (EXP5), secagem solar com utilização da estratégia de controle do sistema de exaustão, teve uma duração de quatorze horas, e o consumo específico de energia (CEE) foi de $46,73 \frac{kWh}{kg}$, ou seja, 46,73 kWh de energia por ciclo (batelada). Neste experimento o produto atingiu um percentual de 24,22 % de umidade em base úmida.

Analisando comparativamente os experimento 1 e 6, segundo o aspecto energético pode-se observar que os experimentos 1 e 6, tiveram uma duração de dezesseis horas e meia, e nove horas e meia, respectivamente. Mas para fins de cálculo do consumo de específico de energia foi considerado apenas o tempo necessário para a secagem do produto que atendesse o percentual de 25%, resultando em quatorze horas para o experimento 1 e oito horas e meia para o experimento 6. Estes experimentos apresentaram um consumo específico de energia (CEE) de $379,33 \frac{kWh}{kg}$, e $225,54 \frac{kWh}{kg}$ respectivamente.

Estes experimentos tiveram um consumo médio de energia elétrica durante a realização dos mesmos, de 4,89 kWh e 4,91 kWh, respectivamente e uma diferença do consumo específico de energia de $153,79 \frac{kWh}{kg}$, que representa uma redução de 40,59% no consumo específico de energia, demonstrando que o consumo de energia elétrica destinada ao aquecimento se manteve o mesmo, apesar da diferença de 10°C na temperatura de processo. O maior consumo do secador elétrico apresentado no experimento 1, foi devido ao tempo de processo ter excedido em 5h30min o tempo de processo do experimento 6, que representa um percentual de 39,28 % a mais no tempo de processo.

Comparando o experimento 6 com o experimento 2 (secagem mista), observa-se que o consumo específico de energia nas condições em que foram realizados foi menor no experimento 6, devido principalmente ao tempo de funcionamento do secador ter excedido em 15% no experimento 2. Este fato se deu principalmente porque a cinética de secagem no experimento 2 foi mais lenta em decorrência dos parâmetros de temperatura ajustados no processo ter sido inferior em 10°C, em comparação com a temperatura de processo do experimento 6, no referido experimento a temperatura de processo foi ajustada em 55°C.

Na Tabela 4.26 é apresentado o resumo dos dados do consumo específico de energia dos processos de secagem.

Tabela 4.26. Resumo do consumo específico de energia dos processos de secagem.

Experimentos	Processo	Data do processo	CEE - kWh/ciclo		
			Solar	Elétrico	Misto
1	Elétrico	24 a 25 / 03 / 2016	-	379,33	-
2	Misto	30 / 06 a 01 / 07 / 2016	24,23	271,64	295,87
3	Solar	15 e 16 / 06 / 2016	47,96	-	-
4	Solar	07 e 08 / 07 / 2016	42,73	-	-
5	Solar	03 e 04 / 10 / 2016	46,73	-	-
6	Elétrico	17/01/2016	-	225,54	-

4.3.3 Tempo de processo

A avaliação do tempo de processo nos seis experimentos será feita tomando como base o tempo necessário que a secagem levou para que o produto atingisse o percentual imediatamente inferior a 25 % de umidade em base úmida, com o objetivo de avaliar os processos em iguais condições.

No processo de secagem elétrica a temperatura e a umidade foram ajustadas em 45 °C e 30 %, estes valores tiveram como referência os valores médios de temperatura e umidade de processo do secador solar em estudo neste trabalho.

Analisando os dados do experimento 1, observa-se que o tempo de processo para atingir o percentual de 24,70 % em base úmida foi de 840 minutos (quatorze horas) e o tempo total de processo foi de 990 minutos (16 horas e 30 minutos) para que o produto atingisse um teor de umidade final de 20,74 %.

O experimento 2 (secagem mista) foi realizado no dia 30 de junho de 2016. Neste experimento foi adotada a estratégia de controle da convecção forçada do ar de secagem, para fins de controle da temperatura interna da câmara de secagem. Neste experimento o tempo de processo para o produto atingir o percentual de umidade de 24,63% foi de 1020 minutos (dezessete horas), e o tempo total de processo foi de 1050 minutos (dezessete horas e trinta minutos), o teor de umidade do produto ao final do experimento foi de 24%. O tempo total de processo foi de dezessete horas e trinta minutos, sendo sete horas de secagem solar e dez horas e trinta minutos de secagem elétrica.

Um dado importante de ser mencionado no experimento 2 é que comparando o teor de umidade final da primeira parte do experimento, realizado no secador solar, com os dados de processo do experimento 1, pode-se observar que o teor de umidade de 53,47%, atingidos com sete horas de secagem solar, correspondem a três horas e meia de secagem elétrica. Comparando este teor de umidade da primeira parte do experimento 2 com os dados correspondente aos experimentos três, quatro e cinco, respectivamente (experimentos realizados exclusivamente com energia solar). Verifica-se que os tempos de processo dos demais experimentos para atingir o mesmo percentual de umidade, da primeira parte do experimento 2, foram de quatro horas e trinta minutos no experimento 3, cinco horas e trinta minutos no experimento 4 e cinco horas e trinta minutos no experimento 5. Com essas informações pode-se chegar à conclusão de que às dezessete horas de processo do experimento 2 (secagem mista) foi em decorrência das baixas condições meteorológicas característica da estação do inverno a qual foi realizado o experimento.

Analisando os dados do experimento 3, secagem solar com utilização de estratégia de controle da convecção forçada, verifica-se que o teor de umidade final do produto foi de 24,15% com tempo de processo de 840 minutos (quatorze horas). O teor de umidade atingido no primeiro dia do experimento 3 foi de 46,99%, que corresponde a cinco horas processo de secagem elétrica (experimento 1), comprovando que dependendo das condições climáticas a secagem solar associada a secagem elétrica pode ser uma alternativa bastante viável para a diminuição do custo de produção de banana passa.

Ao analisar os dados de processo do experimento 4, secagem solar sem utilização de estratégia de controle da convecção do ar secagem, verifica-se que neste experimento o tempo de processo para o produto atingir um percentual de umidade de 24,53% foi de 690 minutos (onze horas e meia) e o tempo total de processo 840 minutos (quatorze horas) para atingir um percentual de umidade final do produto de 17,44%. Neste experimento especificamente, as condições meteorológicas foram bastante distintas nos dois dias de experimento. No primeiro dia as temperaturas e a irradiação solar foram de baixa intensidade como pode ser observado nas Figuras 4.24 e 4.26. Ao fim do primeiro dia do experimento 4, o produto apresentava um percentual de umidade de 48,62%. No segundo dia, as condições climáticas foram excelentes para o processo de secagem solar com uma média de irradiação solar de 700 W/m² e média de temperatura no interior da Câmara de secagem na ordem de 48°C.

Observando os dados do experimento 5, secagem solar com utilização de estratégia de controle da convecção forçada, verifica-se que neste experimento o teor de umidade final do produto foi de 24,22% com tempo de processo de 840 minutos (quatorze horas).

Fazendo uma análise comparativa de todos os experimentos podemos observar que o experimento 1 que corresponde a secagem elétrica com as propriedades termodinâmicas ajustadas para operar com as mesmas condições da secagem solar teve um tempo de processo semelhante aos experimentos 3 e 5, nos quais utilizou apenas energia solar no processo de secagem. Comparando o tempo de secagem elétrica com a secagem mista, observou-se que o tempo de secagem mista foi bem maior, cerca de três horas a mais de processo, fato justificado pelas condições meteorológicas da primeira parte do experimento 2, que é realizado com secagem solar. Comparando o tempo de processo dos experimentos que utiliza exclusivamente energia solar, observa-se que nos experimentos 3 e 5, o percentual de umidade exigido pela Resolução RDC nº 272, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária para produtos secos, foram os mesmos. No experimento 4, como já mencionado anteriormente, as condições meteorológicas foram bastante propícias, o que proporcionou ao processo de secagem a obtenção de um produto final com baixo teor de umidade.

Comparando o tempo de processo do experimento 6 com o tempo de processo no experimento 1, observa-se uma redução de 39,28% do tempo, considerada bastante significativa. No experimento 6, a cinética de secagem foi mais rápida do que no experimento 1, este fato ocorreu devido principalmente ao aumento da temperatura de processo em 10°C, saindo de 45°C no experimento 1, para 55°C no experimento 6.

Nas condições em que foi realizado o experimento 6 (secagem elétrica), comparativamente se for realizado uma secagem mista, acarretará uma redução bastante significativa, para tanto basta observar o teor de umidade em base úmida, atingido na primeira parte do experimento 2 (secagem mista), que foi de 53,47% atingidos com sete horas de secagem solar correspondem a duas horas e meia da secagem elétrica no experimento 6, acarretaria uma redução de 28,19% no CEE do experimento 6, ou seja, sairia dos atuais $224,58 \frac{kWh}{kg}$ para $161,96 \frac{kWh}{kg}$, com as condições meteorológicas em que foram realizados o experimento 2 (inverno).

Em outras condições como apresentado nos experimentos 3, 4 e 5, a redução do consumo específico de energia seria mais significativas, analisando os dados do teor de umidade do produto no final do primeiro dia dos experimentos 3, 4 e 5, observa-se que os percentuais de redução do consumo específico de energia seriam ainda maiores, em torno de 48,73%, 41,96% e 35,22% respectivamente.

A secagem mista com a temperatura de processo maior na segunda parte realizada no secador elétrico, torna-se uma solução bastante viável e aponta como uma das possíveis soluções para garantir produtividade com o custo de produção menor em comparação com os sistemas tradicionais de produção.

Na Tabela 4.27 é apresentado o resumo dos tempos dos processos de secagem.

Tabela 4.27. Resumo dos tempos de processos de secagem.

Experimentos	Processo	Data do processo	Tempo total de processo
1	Elétrico	24 a 25 / 03 / 2016	16h30min
2	Misto	30 / 06 a 01 / 07 / 2016	17h30min
3	Solar	15 e 16 / 06 / 2016	14h00min
4	Solar	07 e 08 / 07 / 2016	14h00min
5	Solar	03 e 04 / 10 / 2016	14h00min
6	Elétrico	17/01/2017	9h30min

4.3.4 Eficiência mássica do processo de secagem

Na Tabela 4.28 são apresentados os dados de teor de umidade alcançados (X_{buf}), bem como, as massas inicial e final dos produtos em cada processo de secagem com suas respectivas massas de água e, conseqüentemente, a eficiência de cada processo de secagem.

Tabela 4.28. Resumo das eficiências mássica dos processos de secagem.

Experimentos	Data do processo	X_{buf} [%]	$m_{inicial}$ [g]	m_{final} [g]	m_{H_2O} [g]	η_p [%]
1	24 / 03 / 2016	20,74	25,10	9,50	17,57	88,78
2	30 / 06 / 2016	24,00	30,40	12,00	21,28	86,46
3	15 a 16 / 06 / 2016	24,15	30,80	13,00	20,94	85,00
4	07 a 08 / 06 / 2016	17,44	32,20	11,70	22,54	90,95
5	03 a 04 / 10 / 2016	24,22	29,30	11,60	20,51	86,30
6	17/01/2017	21,26	34,00	12,70	24,48	87,00

Observa-se que, a eficiência mássica dos processos de secagem elétrica, mista e solar realizada nos secadores elétrico e solar, apresentam valores muito próximos como podem ser visto na Tabela 4.28. Os processos de secagem solar e elétrico como comprovados, são eficientes. A combinação destes processos neste trabalho é denominado secagem mista e identificado como experimento 2, reunindo condições e características dos dois tipos de secagem, viabilidade econômica quando comparado com o processo de secagem elétrica e menor dependência das condições climáticas quando comparado ao processo de secagem solar. No entanto este trabalho não se propõe a determinar qual dos processo de secagem é mais viável, tem o objetivo de analisar cada processo de secagem com o intuito de apontar alternativas que viabilize o desenvolvimento de equipamentos que possam ser viáveis economicamente com boa produtividade em todo o período do ano.

4.3.5 Correlação estatística para os ajustes das cinéticas de secagem

Para verificação da significância da correlação obtida entre os valores preditos e os valores obtidos experimentalmente faz-se necessário analisar os valores encontrados como coeficientes de determinação (R^2). Na Tabela 4.29 são apresentados os valores de R^2 para cada experimento em função do modelo matemático adotado para equação da cinética de secagem, como também o desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) dos dados experimentais em relação ao modelo de Page.

Tabela 4.29. Resumo dos parâmetros e coeficientes de determinação obtidos para cada experimento, ajustado pelo modelo de Page.

Experimentos	n	k	R ² [%]	($\bar{\sigma}$) [%]
1	0,884085	0,007765	99,77	1,00
2	1,16501	0,000927	99,44	1,83
3	1,157016	0,001132	99,41	1,90
4	1,296007	0,000510	98,64	3,05
5	1,137354	0,001135	98,99	2,16
6	0,968012	0,007072	99,66	1,42

Segundo Rodrigues e Iemma (2009), para que uma equação possa ser utilizada na predição de um processo, o coeficiente de correlação deve ser superior a 95%. Portanto, o modelo matemático analisado serve para prever o momento no qual o processo atinge o teor de umidade desejado. O modelo matemático de Page apresentou uma significância estatística média, acima de 99% e, portanto, o modelo é recomendado para análise dos processos de secagem solar, elétrico e misto na produção de banana passa estudados neste trabalho.

Na Tabela 4.30 é apresentado o resumo dos parâmetros dos processos de secagem.

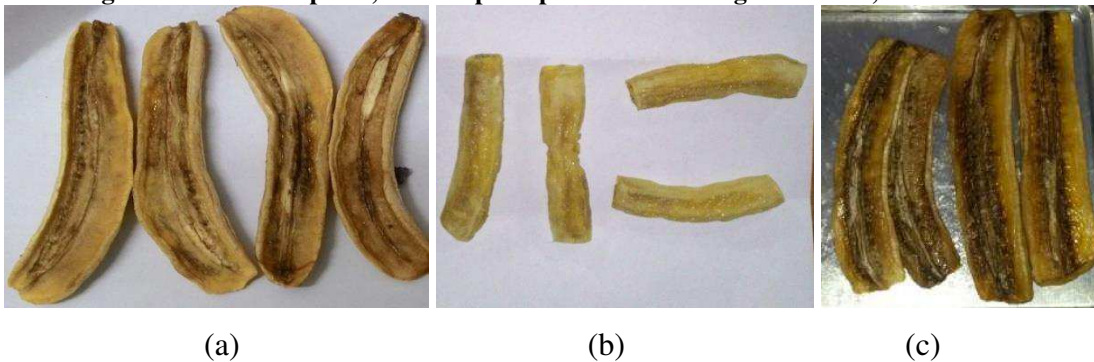
Tabela 4.30. Resumo dos parâmetros dos processos de secagem.

Experimentos	Processo	Data do processo	Tempo total de processo	X _{buf} [%]	η_p [%]	$\eta_{coletor}$ [%]
1	Elétrico	24 a 25 / 03 /2016	16h30min	20,74	88,78	-
2	Misto	30 / 06 a 01/07 /2016	17h30min	24,00	86,46	-
3	Solar com controle	15 e 16 / 06 /2016	14h00min	24,15	85,00	27,85
4	Solar sem controle	07 e 08 / 07 /2016	14h00min	17,44	90,95	30,65
5	Solar com controle	03 e 04 / 10 /2016	14h00min	24,22	86,30	27,85
6	Elétrico	17/01/2017	09h30min	21,26	87,29	

4.3.6 Aspecto visual do produto ao final dos três processos de secagem

Os três processos de secagem apresentaram ao final um produto de boa qualidade e um aspecto visual excelente, com coloração e umidade dentro dos padrões exigidos para comercialização. Quanto à coloração, pode-se dizer que a secagem mista apresenta um produto final com a cor mais clara (b), a secagem solar um pouco mais escura (c) e a secagem elétrica apresenta um produto final com uma tonalidade intermediária (a) entre as outras duas já mencionadas.

Figura 4.51 Banana passa, obtidas pelos processos de secagem elétrico, misto e solar



CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

O produto final obtido, a banana passa, pelos três sistemas de secagem, apresentaram boa qualidade em relação ao aspecto visual e um percentual de umidade em base úmida menor que 25%, compatível com a Resolução RDC n° 272/05 da ANVISA. Portanto dentro dos padrões exigidos para comercialização.

O sistema de aquisição e controle de dados, implementado como inovação no secador solar, utilizando a plataforma Arduino, garantiu a medição de temperatura e umidade relativa do ar de secagem na entrada e saída do coletor solar e da câmara de secagem.

O sistema desenvolvido, também garantiu o acionamento e o controle da convecção forçada do ar de secagem, para a manutenção e estabilização da temperatura no interior da câmara de secagem do secador solar, na faixa de temperatura compreendida entre 40°C e 60°C, como foram observados nos experimentos 3 e 5. No EXP4, onde o secador solar não teve controle da convecção forçada, a temperatura no interior da câmara variou muito ficando várias vezes inferior a 40°C.

Por meio dos experimentos com o secador solar e com o secador elétrico foram obtidas as curvas que representam a cinética de secagem da banana. Os resultados foram comparados e mostraram que o modelo matemático de Page é apropriado para prever o tempo de secagem. O coeficiente de determinação (R^2) obtido na secagem elétrica, na secagem mista e na secagem solar com controle, foram superiores ao obtido na secagem solar sem controle, como também, o desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) nos referidos experimentos foram inferiores ao registrado pela referida secagem solar. Isso demonstra a importância do controle das propriedades termodinâmicas nos processos de secagem.

Com relação ao consumo específico de energia (CEE), o processo de secagem elétrico apresentou um CEE de 379,33 kWh por ciclo, o processo de secagem mista apresentou um CEE de 295,87 kWh por ciclo e o processo de secagem solar apresentou um CEE médio de

45,81 kWh por ciclo. Isso mostra a grande vantagem comparativa do secador solar em relação ao secador elétrico.

Com o aumento da temperatura de processo de 45°C para 55°C no secador elétrico observou-se, uma redução do tempo de processo em 39,28%, acarretando, uma redução de 40,59% no consumo específico de energia. Assim, com os resultados apresentados no experimento 6 (secagem elétrica), é possível concluir que a secagem mista (solar seguida de elétrica), é uma solução viável para redução do custo de produção, bastando para isso ajustar os parâmetros da segunda parte do processo, realizada no secador elétrico, para valores compatíveis com os ajustados no experimento 6, ou seja, temperatura de processo em 55°C e umidade relativa do ar em 30%.

Com relação ao tempo de secagem para obtenção do teor de umidade da banana passa em torno de 25%, nos três processos de secagem, o tempo foi de 510 minutos (oito horas e trinta minutos) para o processo de secagem elétrica com temperatura de processo em 55°C, 840 minutos (quatorze horas) para o processo de secagem elétrica com temperatura de 45°C, o mesmo tempo de 840 minutos (quatorze horas) também foi registrado no processo de secagem solar, no processo de secagem mista (experimento 2) o tempo de processo foi de 1020 minutos (dezessete horas) com temperatura de 45°C.

Com relação ao rendimento térmico do secador solar, obtido nos experimentos 3, 4 e 5, respectivamente 27,85%, 30,65% e 27,85% mostram que os resultados obtidos são ligeiramente superiores aos reportados na literatura (FUDHOLI et al., 2014), o que indica que o secador solar desenvolvido na UFCG apresenta boa eficiência e qualidade para realizar a secagem de banana, além de ser fácil de construir e operar.

Outros fatores importantes observados além das conclusões já relatadas são:

- Observa-se a total dependência da secagem solar das condições meteorológicas. O fator intermitente da energia solar durante a realização dos processos de secagem é um problema para realização da secagem utilizando apenas essa fonte de energia. A impossibilidade da realização da secagem durante os períodos de chuva, durante a

noite, e em determinadas épocas do ano, apontam para necessidade de uso do processo misto ou do uso de um secador híbrido (solar e elétrico ou solar e gás);

- A secagem elétrica apresentou um produto final de boa qualidade, e com total controle das características termodinâmicas do ar de secagem, mas com um elevado custo de produção, por isso a secagem mista é uma alternativa para reduzir custos mantendo o elevado padrão de qualidade do produto final;

- A secagem mista apresenta-se como a melhor alternativa para produção da banana passa porque garante a comercialização da produção, em qualquer época do ano, com custos intermediários e total independência das condições meteorológicas. Para a obtenção de uma maior rentabilidade, preferencialmente deve-se utilizar a secagem mista no inverno e a solar nas demais estações do ano.

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS

ALONSO, Luís Felipe Toro. **Algoritmo de Seleção e Dimensionamento de Secadores**. Campinas, SP. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, 2001, 124p.

ALVES. E. J. **A cultura da banana: aspectos técnicos, socioeconômicos e agroindustrial**. 2ª edição. Embrapa – SPI: Brasília, 1999, pp. 27-34, 85-86, 90-91, 471-473, 533-542, 545-547, 564, 574.

ALZAMORA, S.M.; CHIRIFE, J.; VIOLLAZ, P.E. A simplified model for predicting the temperatures of foods during air dehydration. **Journal of Food Technology**, 14:4, 1979, p. 369-380.

ALMEIDA, C. A.; GOUVEIA, J. P. G.; ALMEIDA, F. A.; SILVA, L. F. H. Avaliação da cinética de secagem em frutos de acerola. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 6, n. 1, 2006.

AMER, A. L.; HADIDI, N. Composition and Analysis Food. **Journal of Food**. vol. 14, 2001, p.59-67.

ANVISA, Brasil. **Resolução RDC nº 272, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária**. Aprova o regulamento técnico para produtos de vegetais, produtos de frutas e cogumelos comestíveis. Diário Oficial: Brasília, 23 de set. 2005.

ARAGÃO, Renato Fonseca. **Secagem de fatias de caju (*Anacardium occidentale L.*) em secador de bandejas**. Campina Grande, PB. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2007, 126p.

BASÍLIO, Emiliana Pereira; CHARBEL, Andrea Lúcia Teixeira; FERREIRA, André Guimarães. **Avaliação da secagem de morangos em estufa e em secador híbrido solar-elétrico**. Revista Acadêmica Conecta FASF (Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras do Alto São Francisco, Luz, MG), vol. 1, n.1 2016.

BECKER, HA; SALLANS, H. R. A study of internal moisture movement in the drying of the wheat kernel. **Cereal Chemistry**, 32, 1955, p. 212-216.

BECKER, HA. A study of diffusion in solids of arbitrary shape, with application to the drying of the wheat kernel. **Journal of Applied Polymer Science**, 1959.

BORGES, Soraia Vilela; MANCINI, Maurício Cordeiro; CORRÊA, Jefferson Luiz Gomes; LEITE, Julia. Secagem de banana prata e banana d'água por convecção forçada. Campinas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, vol. 30(3), 2010, p.605-612.

BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F. W., HALL, C. W. **Drying and storage of grain and oilseeds**. The AVI Publishing, New York, 1992, 450p.

BRUNELLO, G. **Verificação de novo modelo aplicável à secagem de cereais: secagem de milho em leito com jorro**. 1º Congresso Brasileiro de Engenharia Química, São Paulo, Brasil, 1976.

BRUNELLO, G.; NASCIMENTO, C. A. O. Drying of cereal grain: two internal resistances model. **Revista latinoamericana de transferência de calor e massa**, 1979, p.115-126.

CANO-CHAUCA, M., RAMOS, A. M., STRINGHETA, P. C., MARQUES, J. A., SILVA, P. I. **Curvas de secagem e avaliação da atividade de água da banana passa**. Boletim Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos, v.22, n.1, 2004, p.121-132.

CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **Estimativa da área tecnificada nas principais regiões produtoras**. In: Almeida, C. A. Banana: mercado atual e perspectiva no setor, 2007.

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**, second Ed. Oxford University Press, London, 1975.

CHU, S. T.; HUSTRULID, A. Numerical solution of diffusion equation. **Transactions of the ASAE**, 11, 1968, p. 705-708.

FACCIN, F. **Abordagem Inovadora no Projeto de Controladores PID**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

FARIAS, Raimundo Pereira de. **Secagem de banana em estufa: efeitos térmicos e geométricos**. Campina Grande, PB. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2011, 135p.

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

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, 2010, p.1 – 30.

FUDHOLI, A., SOPIAN, K., YAZDI, M. H., RUSLAN, M. H., GABBASA, M., KAZEM, H. A. Performance analysis of solar drying system for red chili. **Solar Energy**. v.99, 2014, p.47-54.

GOMES, Dalmo G. **Otimização teórica/experimental de um coletor de energia solar plano**. Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2007.

GOUVEIA, Josivanda Palmeiras Gomes de; ALMEIDA, Francisco de Assis Cardoso; FARIAS, Eliana da Silva; SILVA, Manassés Mesquita da; CHAVES, Maria da Conceição Veloso; REIS, Ligia Sampaio. Determinação das curvas de secagem em frutos de cajá. Campina Grande, PB. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, N.1, 2003, p.65-68.

GRILO, Marcelo Bezerra. **Fundamentos da energia solar: radiação solar e o coletor solar plano. conceitos básicos e aplicações**. Campina Grande, PB: Editora da UFCG, 2007. 60p.

GRILO, Marcelo Bezerra; LEITE, Antônio Pralon Ferreira; ANDRADE, Rodrigo Ronelli Duarte; BELO, Francisco Antonio; MEUNIER, Francis. Experimental thermodynamic cycles and performance analysis of a solar powered adsorptive icemaker in hot humid climate. **Renewable Energy**, vol. 32, 2009, p.697 – 712.

GRILO, Marcelo Bezerra; LACERDA, Angelina Farias. **Secador Solar: Cartilha para produção de banana-passa**. Campina Grande, PB: editora da UFCG, 2013, 10p.

GUERRA, M. I. S., VARELLA, F. K. O. M. Análise do desempenho térmico de um sistema de aquecimento solar de baixo custo na cidade de Mossoró, RN. Mossoró, RN. **Revista Holos**, v.4, 2014, p.241-268.

GUERRA, M. P. **Tópicos sobre a cultura da bananeira**. Apostila da disciplina de horticultura aplicada segmento fruticultura – Bananicultura, Florianópolis, SC. UFSC/CCA – Departamento de Fitotecnia, 2004.

HUBACKOVA, A., KUCEROVA, I., CHRUN, R., CHALOUPOKOVA, P., BANOUT, J. Development of solar drying model for selected cambodian fish species. **The Scientific World Journal**. v.2014, 2014, 10p.

IBRAF – Instituto Brasileiro de Frutas. **Panorama da cadeia produtiva das frutas em 2012 e projeções para 2015**. Brasília, 2015.

ISQUIERDO, Eder Pedrosa. **Cinética de secagem de café natural e suas relações com a qualidade para diferentes temperaturas e umidade relativa do ar**. Lavras, MG. Tese de doutorado em ciências dos alimentos. Universidade Federal de Lavras, 2011.

JIANG, Hao; ZHANG, Min; MUJUMDAR, Arun S. Microwave freeze-drying characteristics of Banana Crisps. **Drying Technology**, vol. 28, 2010, p.1377-1384.

JOSHI, C. B; GEWALI, M. B; BHANDARI, R. C. Performance of solar drying: A case Study of Nepal. **IE(I)-Journal-ID**, vol.85, 2005, p.53-57.

JUAMILY, K. E. J; KHALIFA, Abdul Jabbar. N; YASSEN, T. A. Testing of the performance of a fruit and vegetable solar drying system in Iraq. **Desalination**. v. 209, n.(1–3), 2007, p.163–170.

LEITE, J. B.; MANCINI, Mauricio. C.; BORGES, S. V. Effect of drying temperature on the quality of dried bananas cv. Prata and d'água. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technology**, vol. 40, n. 2, 2007, p.319-323.

LEWIS, W.K. The rate of drying of solids material. In: The Sympositmt on Drying. **The Journal of I. & E. Ch.**, U:5, 427-432, 1921.

LI, H.; MOREY, R. V. Thin layer drying of yellow dent com. **Transactions ASAE**, 27, 1984, p.581-585.

LIMA, Antônio Gilson Barbosa; NEBRA, Silvia Azucena; QUEIROZ, Marlene Rita. Aspectos científico e tecnológico da banana. Comunicado técnico. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, PB, vol.2, n.1, 2000, p.87-101.

LOURENÇO, J. **Sintonia de Controladores PID**. Manaus: Escola Superior de Tecnologia, 1997.

LOZANO, J.E.; ROTSTEIN, E.; URBICAIN, M.J. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. **Journal of Food Science**, 48:5, 1983, 1497-1553.

MACHADO, Antônio Vitor; OLIVEIRA, Edson Leandro; SANTOS, Everaldo Silviano; OLIVEIRA, Jackson Araújo **Influência da espessura com o tempo de secagem em sistemas solar de radiação direta e indireta**. Congresso Brasileiro de Ciências e Tecnologia de Alimentos (CBCTA), Belo Horizonte, MG, vol.3. 2008, p.44-51.

MACHADO, Antônio Vitor. OLIVEIRA, Edson Leandro de; SANTOS, Everaldo Silviano dos; OLIVEIRA, Jackson Araújo de; FREITA, Laerte Moura de. Estudo cinético da secagem do pedúnculo de caju em um secador convencional. **Revista verde**, Mossoró, RN, v. 5, n.1, 2010, p. 36-42.

MADAMBA, Ponciano S.; DRISCOLLB, Robert H.; BUCKLE, Ken A. The thin-layer drying characteristics – of garlies lices. **Journal of Food Engineering**. vol.29, 2007, p.75-97.

MADHLOPA, A e NGWALO, G. Solar dryer with thermal storage and biomass-backup heater. **Solar Energy**. v.81, n.(4), 2007, p.449–462.

MUSTAPHA, M. K., SALAKO A. F., ADEMOLA, S. K., ADEFILA I. A. Qualitative performance and economic analysis flowcost solar fish driers in Sub-Saharan Africa. **Journal Fish**, v.2, n.(1), 2014, p.64–69.

MISRA, R.N.; YOUNG, J.H. Numerical solution of simultaneous moisture diffusion and shrinkage during soybean drying. **Transactions of the ASAE**, 23:5, 1980, p.1277-1282.

MISRA, M.K.; BROOKER, D.B. Thin layer and rewetting equation for shelled yellow com. **Transactions of the ASAE**, 23:5, 1980, p.1254-1260.

MORAN, M. J., SHAPIRO, H. N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 6ª edição, Rio de Janeiro, LTC, 2009.

NACHTIGAL, Jair costa; FACHINELLO, Jose Carlos. [Online] // Site da Embrapa – Janeiro de 2015 – <http://www.cpact.embrapa.br/publicacoes/livros/fundamentos-fruticultura/l.j.htm/> >Acesso em: 20 de dezembro. 2016

NAYAK. J. K; SUKHATME, S. P.; LIMAYE, R. G.; BOPSHETTY, S. V. Performance studies on solar concrete collectors. **Solar Energy**, vol.72, n. 1, 2007, p.45-56.

NGUYEN, Minh-Hue; PRICE, William E. Air-drying of banana: Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. **Journal of Food Engineering**, vol. 79, n. 1, 2007, p.200-207.

NIJMEH, M. N.; RAGAB, A. S.; EMEISH, M. S.; JUBRAND, B. A. Design and testing of solar dryers for processing food wastes. **Applied Thermal Engineering**, vol. 18, 2006, p.1337-1346.

NUNES, Antonio. Gomes; GOMES, Ítalo de Andrade; GRILO, Marcelo Bezerra. Estudo para Determinação do Modelo Matemático Representativo de Experimentos com Secagem de

Banana Usando Energia Solar e Gás Liquefeito de Petróleo. **Revista Magistra**, Ilhéus, Bahia, v. 25, ISSN 2236-4420, setembro, 2013.

NUNES, Antonio Gomes; LIMA, Wellington Sousa; GRILO, Marcelo Bezerra. **Novas tecnologias: desenvolvimento de um secador solar usado para desidratação de frutas**. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, CONTEC, 2015, Fortaleza, CE. Inovação Tecnológica para o Desenvolvimento Nacional. vol. 2, 2015, p.1-4.

NUNES, António Gomes. **Desenvolvimento experimental de um secador solar multienergético para secagem de frutas**. Campina Grande, PB. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016, 206p.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1985.

ONU, Fundo de População das Nações Unidas. (2015). Relatório “Perspectivas da População Mundial: A Revisão de 2015”, “**World Population Prospects: The 2015 Revision**”<https://dalilabalekjian.wordpress.com/2015/07/30/populacao-mundial-revisao-2015-onu/>>Acesso em: 23 de dezembro. 2016.

ORIKASA, T., WUB, L., SHIINA, T., TAGAWA, A. Drying characteristics of kiwifruit during hot air drying. **Journal of Food Engineering**. v.85, n.2, 2008, p.303-308.

PAGE, G.E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled com in thin layers** . Lafayette, Mechanical Engineering Department, 1949. Thesis (M.S.)- Purdue University, Indiana.

PAN, Zhongli; SHIH, Connie; MCHUGH, Tara H.; HIRSCHBERG, Edward. Study of Banana dehydration using sequential infrared radiation hearing and freeze-drying. **LTW, Food Science and Technology**, vol. 41, 2008, p.194-195.

PARIKH, D e AGRAWAL, G. Solar drying in hot and dry climate of Jaipur, India. **International Renewable Energy Research**. v.1, n.(4), 2011, p.224–31.

PARK, Kil Jin; COLATO, Graziella Antônio; OLIVEIRA, Rafael Augusto de; PARK, Kil Jin Brandini. **Conceitos de processos e equipamentos de secagem**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2007.

PARTI, M. E DUGMANICS, I. Diffusion coefficient for corn drying. **Transaction ASAE**. vol. 33, nº 5, 1990, p.1652-1656.

PENEIRO, Júlio César de; MELO, Liliane Pimenta de; CORADI, Thiago Bilatto. Construção de Aquecedor Solar de Baixo Custo sem Cobertura: Análise Experimental da Eficiência Térmica para Vários Ensaios. **Revista de Ciência & Tecnologia**, Nova Iguaçu, RJ, vol.10, n.1, 2010, p.18-34.

PHOONGCHANDAG. S; WOODS, J. L. Moisture Diffusion and Desorption Isotherms for Banana. **Journal of Food Science**, vol. 65, 2000, p.651-657.

PISKE, Oriana. **O processo de globalização e a necessária sustentabilidade ambiental**. Tribunal de Justiça do Distrito Federal e dos Territórios, Poder Judiciário da União, Brasil. <http://www.tjdft.jus.br/institucional/imprensa/artigos/2011> />Acesso em: 23 de dezembro de 2016.

PLOTTER, K.; SIPPEL, C. M; BECK, A; FRICKE, J. Optimized finned absorber geometries for solar air heating collectors. **Solar Energy**, vol. 67, nº 3, 2006, p.35-52p.

PRAKASH, Om; KUMAR, Anil; Solar greenhouse drying: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 29, 2013, p.905-910.

PRATOTO. A; DAGUENET, M.; ZEGHMATI, B. Sizing solar-assisted natural rubber dryers. **Solar Energy**. V. 61. 2007, p.287-291.

RIBEIRO, M. A. **Controle de Processos: Teoria e Aplicações**. 7 ed. Salvador: s.n, 2001.

RICCI, Mayara Rohenkohl ; BATTISTI, Juliane de Freitas ; SCHMIDT, Carla Adriana Pizarro. **Secador solar: Processo de desidratação de frutas com diferentes tratamentos osmóticos**. V Encontro Regional de Agroecologia, Medianeira, PR, 2012.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos**. 2ª ed., São Paulo, SP, 2009, 358p.

SANTOS, Jailson Charles; SANTOS, Rodolfo de Sousa; BARROS, Glauco Demóclito Tavares de; SANTOS, Jacques César dos; GURGEL, José Maurício; MARCONDES, Francisco. **Estudo Numérico da Cinética de Secagem em Bananas**, IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), Universidade Federal de Campina Grande, PB, 2010.

SAVICKI, Darci Luiz. **Análise numérica tridimensional e investigação experimental do comportamento térmico e hidrodinâmico de reservatórios térmicos cilíndricos**. Porto Alegre, RS. Tese de Doutorado, PROMEC, UFRGS, 2007.

SHERWOOD, T. K. The drying of solids: part-A. *Industrial and Engineering Chemistry*, 21:10, 1929, p.12-16.

SHERWOOD, T. K. The drying of solids: part-B. *Industrial and Engineering Chemistry*, 21:10, 1929, p.976-980.

SILVA, Juarez de Sousa. **Secagem e armazenamento de produtos agrícolas**. In:.(org). *Secagem e Secadores*, Viçosa, MG: Aprenda Fácil, 2008, p.109-146.

SMITABHINDU, R.: JANJAI, S.; CHANKONK, V. Optimization of a solar-assisted for drying banana. **Renewable Energy**, vol. 33, 2008, p.1523-1531.

SOKHANSANJ, Shahab; JAYAS, Digivir S. **Drying of foodstuffs**. In: Mujumdar. A.S. *Handbook of industrial drying*.2.ed. New York: Marcel Dekker, v.1, 2006, p.589-626.

STILING, J., LI, S, STROEVE, P., THOMPSON, J., MJAWA, B., KONBLUTH, K., BARRET, D. M. Performance evaluation of an enhanced fruit solar dryer using concentrating panels. **Energy for Sustainable Development**. v.16, 2012, p.224-230.

SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P. E.; CHIRIFE, J. Diffusional analysis of air drying of grain sorghum. **Journal of Food Technology**, 15:5, 1980, p.523-531.

SUN, L. M.; MEUNIER, F. A detailed model for nonisothermal sorption in porous dsorbents. **Chemical Engineering Science**, v. 11., 1987, p.1585-1593.

TOLABA, M. P.; SUAREZ, C. Simulation of the thin-layer drying of com by means of the diffusional model. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie**, 2.1:2, 1988, p.83-86.

UNCTAD. Info Comm Market Information in the Commodities Area, 2007. Disponivel em http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/INFOCOMM_cp01_Banana_en.pdf United National Conference on Trade and Development. />Acesso em: 20 de fevereiro de 2017

VACCAREZZA, L. M.; LOMBARDI, J. L.; CHIRIFE, J. Kinetics of moisture movement during air drying of sugar beet root. **Journal of Food Technology**, 9, 1974, p.317-27.

VIEIRA, Luiz Marcelino. **Brasil é o terceiro maior produtor de banana**. 2015, <http://www.revistacampoenegocios.com.br/brasil-e-o-terceiro-maior-produtor-de-banana/>
>Acesso em: 20 de fevereiro de 2017.

VIOLLAZ, P. E.; SUAREZ, C. Drying of shrinkíng bodies. **AIChE Journal**, n:9, 1985, p.1566-1568.

APÊNDICES

Apêndice I Tabelas com os valores medidos das: grandezas elétricas, temperatura e umidade relativa do ar de secagem durante os experimentos EXP1, EXP2 e temperatura e umidade relativa do ar de secagem durante os experimentos EXP3, EXP4, EXP5.

Apêndice II Projeto do secador solar utilizado na pesquisa.

APÊNDICE I

Tabelas com os valores medidos das: grandezas elétricas, temperatura e umidade relativa do ar de secagem durante os experimentos EXP1, EXP2 e temperatura e umidade relativa do ar de secagem durante os experimentos EXP3, EXP4, EXP5.

46	03/25/16	04:29:00	6,9	8,28	7,52	220,07	215,17	220,99	10,22	8,72	12,06	29,38	0	0	0
45	03/25/16	04:30:00	2,88	3,98	4,07	220,67	217,65	221,41	8,13	6,66	11,03	0	0	0	0
44	03/25/16	04:31:00	12,26	12,92	13,27	218,22	214,94	218,99	5	18,5	4,44	0	0	0	0
43	03/25/16	04:32:00	7,41	7,77	7,59	220,23	216,49	221,03	4,78	19,06	4,38	0	0	0	0
42	03/25/16	04:33:00	7,41	7,77	7,59	221,87	218,17	222,59	7,03	11,34	5,94	0	0	0	0
41	03/25/16	04:34:00	7,41	7,77	7,59	221,81	218,97	222,39	0	0	0	0	0	0	0
40	03/25/16	04:35:00	12,09	14,25	13,44	219,17	213,83	219,71	26,66	19,41	26,28	23,91	0	0	0
39	03/25/16	04:36:00	7,98	9,44	8,73	219,38	214,21	220,08	17,28	14,88	14,91	28,69	0	0	0
38	03/25/16	04:37:00	7,95	9,26	8,67	219,67	213,96	220,16	11,31	8,69	11,13	27,94	0	0	0
37	03/25/16	04:38:00	14,08	16,21	15,65	217,76	212,36	218,08	18,44	13,97	19	25,97	0	0	0
36	03/25/16	04:39:00	9,23	10,9	10,49	219,22	213,9	219,55	17,88	14,69	19	25,41	0	0	0
35	03/25/16	04:40:00	7,83	9,12	8,48	219,43	214,41	220,01	9,97	8,34	9,69	30,09	0	0	0
34	03/25/16	04:41:00	12,71	14,91	14,25	218,26	212,34	218,77	12,03	11,5	15,94	24,34	0	0	0
33	03/25/16	04:42:00	2,65	2,73	2,83	220,27	216,93	220,86	4,91	8,41	4,78	0	0	0	0
32	03/25/16	04:43:00	2,65	2,99	2,83	220,07	217,14	220,73	9,53	13	6,41	0	0	0	0
31	03/25/16	04:44:00	6,17	6,63	7,02	219,22	216,52	220,2	10,34	8,5	8,44	0	0	0	0
30	03/25/16	04:45:00	11,81	12,48	12,81	217,49	214,58	218,35	4,59	18,25	4,5	0	0	0	0
29	03/25/16	04:46:00	2,69	3,02	2,88	219,9	216,41	220,87	15,06	22,31	19,88	0	0	0	0
28	03/25/16	04:47:00	2,69	3,06	2,89	219,53	216,65	220,53	6,5	6,97	6,59	0	0	0	0
27	03/25/16	04:48:00	8,03	9,24	8,82	218,09	213,35	219,24	18,44	14,56	18,34	12,44	0	0	0
26	03/25/16	04:49:00	14,12	16,01	15,43	216,1	211,06	218,37	18,78	13,84	18	25,47	0	0	0
25	03/25/16	04:50:00	8,46	9,8	9,09	217,45	211,89	219,65	18,38	13,88	18,28	25,19	0	0	0
24	03/25/16	04:51:00	7,89	9,35	8,8	217,57	212,12	219,9	11,94	9,47	11,31	31,13	0	0	0
25	03/25/16	04:50:00	8,46	9,8	9,09	217,45	211,89	219,65	18,38	13,88	18,28	25,19	0	0	0
24	03/25/16	04:51:00	7,89	9,35	8,8	217,57	212,12	219,9	11,94	9,47	11,31	31,13	0	0	0
23	03/25/16	04:52:00	12,4	14,58	13,87	216,71	211,39	217,73	27,38	19,22	27,19	23,66	0	0	0
22	03/25/16	04:53:00	12,04	14,44	13,65	216,63	211,27	217,34	24,94	19,38	26,09	22,88	0	0	0
21	03/25/16	04:54:00	3,89	4,98	4,35	218,33	213,48	219,3	18,16	12,75	18,09	10,09	0	0	0
20	03/25/16	04:55:00	7,49	7,85	8,2	217,29	213,56	218,29	11,44	11,44	7,59	0	0	0	0
19	03/25/16	04:56:00	10,06	10,24	10,37	216,35	213,16	217,26	5,22	18,81	4,56	0	0	0	0
18	03/25/16	04:57:00	2,62	2,98	2,82	218,1	214,99	218,9	11,53	8,72	7,22	0	0	0	0
17	03/25/16	04:58:00	7,5	8,07	7,72	217,16	213,97	218,06	7	10,03	11,31	0	0	0	0
16	03/25/16	04:59:00	11,73	12,39	12,71	215,89	212,01	216,62	4,59	18,59	4,5	0	0	0	0
15	03/25/16	05:00:00	2,66	2,66	2,85	218,03	214,76	219,04	4,81	8,78	4,5	0	0	0	0

Tabela I.2 Temperatura do processo de secagem elétrica e temperatura ambiente nos dias 24 e 25 de março

Horário	T. Secador Elétrico em °C	Temperatura Ambiente em °C
12h30min	44,50	32,06
13h00min	45,90	31,57
13h30min	44,10	31,94
14h00min	45,90	31,86
14h30min	44,40	31,90
15h00min	45,90	31,63
15h30min	45,80	31,51
16h00min	44,80	30,75
16h30min	44,90	29,88
17h00min	44,70	28,60
17h30min	44,20	27,60
18h00min	45,50	26,75
18h30min	44,40	26,08
19h00min	44,00	25,48
19h30min	45,60	24,98
20h00min	45,20	24,68
20h30min	43,70	24,30
21h00min	45,20	24,02
21h30min	45,30	23,85
22h00min	44,20	23,72
22h30min	46,10	23,60
23h00min	45,60	23,53
23h30min	44,60	23,44
00h00min	45,30	23,34
00h30min	44,20	23,22
01h00min	43,80	23,11
01h30min	45,70	23,09
02h00min	45,40	22,99

02h30min	44,80	22,83
03h00min	44,70	22,88
03h30min	45,80	22,96
04h00min	44,00	22,99
04h30min	44,50	23,04
05h00min	46,00	22,96

Tabela I.3. Valores obtidos no experimento realizado nos dias 24 e 25 de março de 2016.

Dia	Horário	Tempo (min)	Produto (g)	Massa Seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$	Dados do modelo	Desvio padrão (σ)
	12h30min	0	25,1	7,53	0,7000	2,3333	1	1	0
	13h00min	30	22,4	7,53	0,6638	1,9748	0,8269	0,8547	0,0196
	13h30min	60	20,6	7,53	0,6345	1,7357	0,7115	0,7484	0,0261
	14h00min	90	19,4	7,53	0,6119	1,5764	0,6346	0,6605	0,0183
	14h30min	120	18,5	7,53	0,5930	1,4568	0,5769	0,5857	0,0062
	15h00min	150	17,7	7,53	0,5746	1,3506	0,5256	0,5212	0,0031
	15h30min	180	16,9	7,53	0,5544	1,2444	0,4744	0,4651	0,0066
	16h00min	210	16,2	7,53	0,5352	1,1514	0,4295	0,4159	0,0096
	16h30min	240	15,6	7,53	0,5173	1,0717	0,3910	0,3726	0,0130
	17h00min	270	15,0	7,53	0,4980	0,9920	0,3526	0,3343	0,0129
	17h30min	300	14,4	7,53	0,4771	0,9124	0,3141	0,3004	0,0097
24/03/2016	18h00min	330	13,9	7,53	0,4583	0,8459	0,2821	0,2703	0,0084
	18h30min	360	13,6	7,53	0,4463	0,8061	0,2628	0,2434	0,0137
	19h00min	390	13,1	7,53	0,4252	0,7397	0,2308	0,2195	0,0080
	19h30min	420	12,7	7,53	0,4071	0,6866	0,2051	0,198	0,0050
	20h00min	450	12,5	7,53	0,3976	0,6600	0,1923	0,1789	0,0095
	20h30min	480	12,2	7,53	0,3828	0,6202	0,1731	0,1617	0,0081
	21h00min	510	11,8	7,53	0,3619	0,5671	0,1474	0,1462	0,0008
	21h30min	540	11,6	7,53	0,3509	0,5405	0,1346	0,1324	0,0016
	22h00min	570	11,4	7,53	0,3395	0,5139	0,1218	0,1199	0,0013
	22h30min	600	11,1	7,53	0,3216	0,4741	0,1026	0,1087	0,0043
	23h00min	630	11,0	7,53	0,3155	0,4608	0,0962	0,0985	0,0016
	23h30min	660	10,9	7,53	0,3092	0,4475	0,0897	0,0894	0,0002
	00h00min	690	10,6	7,53	0,2896	0,4077	0,0705	0,0812	0,0075
	00h30min	720	10,5	7,53	0,2829	0,3944	0,0641	0,0737	0,0068
	01h00min	750	10,3	7,53	0,2689	0,3679	0,0513	0,067	0,0111
	01h30min	780	10,2	7,53	0,2618	0,3546	0,0449	0,0609	0,0113
25/03/2016	02h00min	810	10,1	7,53	0,2545	0,3413	0,0385	0,0554	0,0119
	02h30min	840	10,0	7,53	0,2470	0,3280	0,0321	0,0504	0,0129
	03h00min	870	9,9	7,53	0,2394	0,3147	0,0256	0,0458	0,0143
	03h30min	900	9,8	7,53	0,2316	0,3015	0,0192	0,0417	0,0159
	04h00min	930	9,7	7,53	0,2237	0,2882	0,0128	0,038	0,0178
	04h30min	960	9,6	7,53	0,2156	0,2749	0,0064	0,0346	0,0200
	05h00min	990	9,5	7,53	0,2074	0,2616	0,0000	0,0316	0,0223

Tabela I.4. Valores médios de potência do experimento realizado nos dias 24 e 25 de março de 2016.

Horário	kVA	kW	kVAr
12h15min:00	8,89	7,47	4,83
12h30min:00	6,93	5,82	3,76
12h45min:00	6,22	5,23	3,38
13h00min:00	5,38	4,52	2,92
13h15min:00	6,60	5,54	3,58
13h30min:00	6,19	5,20	3,36
13h45min:00	5,95	5,00	3,23
14h00min:00	5,72	4,81	3,11
14h15min:00	5,74	4,83	3,12
14h30min:00	5,73	4,82	3,11
14h45min:00	5,35	4,50	2,90
15h00min:00	6,16	5,18	3,34
15h15min:00	6,56	5,51	3,56
15h30min:00	5,21	4,38	2,83
15h45min:00	5,91	4,97	3,21

16h00min:00	5,72	4,80	3,10
16h15min:00	5,97	5,01	3,24
16h30min:00	5,54	4,65	3,00
16h45min:00	5,79	4,86	3,14
17h00min:00	4,10	3,44	2,22
17h15min:00	6,91	5,80	3,75
17h30min:00	6,52	5,48	3,54
17h45min:00	5,12	4,30	2,78
18h00min:00	5,17	4,34	2,81
18h15min:00	4,95	4,16	2,69
18h30min:00	6,20	5,21	3,37
18h45min:00	6,01	5,05	3,26
19h00min:00	6,58	5,53	3,57
19h15min:00	5,76	4,48	3,13
19h30min:00	5,68	4,77	3,08
19h45min:00	6,05	5,08	3,28
20h00min:00	5,65	4,75	3,07
20h15min:00	5,94	4,99	3,22
20h30min:00	6,13	5,15	3,33
20h45min:00	5,69	4,78	3,09
21h00min:00	5,80	4,87	3,15
21h15min:00	5,13	4,31	2,78
21h30min:00	5,76	4,84	3,13
21h45min:00	5,73	4,82	3,11
22h00min:00	6,16	5,18	3,34
22h15min:00	6,60	5,54	3,58
22h30min:00	5,09	4,28	2,76
22h45min:00	5,98	5,02	3,24
23h00min:00	5,74	4,82	3,11
23h15min:00	5,43	4,56	2,95
23h30min:00	5,92	4,97	3,21
23h45min:00	5,86	4,92	3,18
00h00min:00	4,64	3,90	2,52
00h15min:00	6,19	5,20	3,36
00h30min:00	5,82	4,89	3,16
00h45min:00	6,25	5,25	3,39
01h00min:00	5,87	4,93	3,19
01h15min:00	5,66	4,75	3,07
01h30min:00	5,54	4,65	3,00
01h45min:00	5,62	4,72	3,05
02h00min:00	6,25	5,25	3,39
02h15min:00	6,17	5,63	3,64
02h30min:00	6,06	5,09	3,29
02h45min:00	6,19	5,20	3,36
03h00min:00	5,14	4,31	2,79
03h15min:00	5,34	4,49	2,90

03h30min:00	6,05	5,09	3,29
03h45min:00	5,37	4,51	2,91
04h00min:00	6,02	5,06	3,27
04h15min:00	6,43	5,40	3,49
04h30min:00	6,00	5,04	3,25
04h45min:00	5,66	4,76	3,07
05h00min:00	5,71	4,79	3,10

Tabela I.5. Valores de potência referente ao perfil de carga instantâneo do secador elétrico no período de uma hora.

Horário	kW
12h03min	10,83
12h04min	10,64
12h05min	10,60
12h06min	10,48
12h07min	9,86
12h08min	4,45
12h09min	4,77
12h10min	4,72
12h11min	4,74
12h12min	6,59
12h13min	6,28
12h14min	5,69
12h15min	4,74
12h16min	4,74
12h17min	5,24
12h18min	8,61
12h19min	8,74
12h20min	4,41
12h21min	3,87
12h22min	4,37
12h23min	8,81
12h24min	5,76
12h25min	4,74
12h26min	4,74
12h27min	7,49
12h28min	6,36
12h29min	4,69
12h30min	4,90
12h31min	8,47
12h32min	5,29
12h33min	1,58
12h34min	5,48
12h35min	6,88
12h36min	1,59
12h37min	2,59
12h38min	8,15
12h39min	4,73
12h40min	4,75

12h41min	8,36
12h42min	5,98
12h43min	3,92
12h44min	5,77
12h45min	1,54
12h46min	1,60
12h47min	3,91
12h48min	7,66
12h49min	4,75
12h50min	4,72
12h51min	5,23
12h52min	8,43
12h53min	4,51
12h54min	4,42
12h55min	6,24
12h56min	1,50
12h57min	5,85
12h58min	5,78
12h59min	1,58
13h00min	5,57

Tabela I.6. Consumo de energia registrado durante a realização do experimento 1 (EXP 1).

Horário	kVAh	kWh	kVArh
12h00min às 12h30min	3,90	3,28	2,12
12h30min às 13h30min	6,10	5,12	3,31
13h30min às 14h30min	5,79	4,86	3,14
14h30min às 15h30min	5,82	4,89	3,16
15h30min às 16h30min	5,79	4,86	3,14
16h30min às 17h30min	5,83	4,90	3,16
17h30min às 18h30min	5,36	4,50	2,91
18h30min às 19h30min	6,01	5,05	3,26
19h30min às 20h30min	5,95	4,99	3,23
20h30min às 21h30min	5,60	4,70	3,04
21h30min às 22h30min	5,90	4,95	3,20
22h30min às 23h30min	5,77	4,84	3,13
23h30min às 00h30min	5,63	4,73	3,05
00h30min às 01h30min	5,83	4,90	3,16
01h30min às 02h30min	6,16	5,17	3,34
02h30min às 03h30min	5,68	4,77	3,08
03h30min às 04h30min	5,95	5,00	3,23
04h30min às 05h00min	2,84	2,39	1,54
Consumo total de energia	99,91	83,90	54,20

Tabela I.7. Distribuição dos dados elétricos (correntes, tensões e taxa de distorção harmônica) do secador elétrico, medidos durante a realização do experimento de secagem mista - experimento EXP2, realizado nos dias 30 de junho de 2016.

Nº	DATE	TIME	CURRENT IA RMS	CURREN T IB RMS	CUREN T IC RMS	VOLTAGE VAN RMS	VOLTAGE VBN RMS	VOLTAGE VCN	THD GIA	THD GIB	THD GIC	THD GIN	WH3 NET	WH3 NET UC	UH3 DEL	UH3 REC
651	06/30/16	17:18:00	7,94	9,32	8,02	222,85	218,45	222,64	19,09	15,94	20,25	23,03	0	0	0	0
650	06/30/16	17:19:00	7,83	9,08	7,84	223,22	218,57	222,67	19,13	14,34	19,38	23,41	0	0	0	0
649	06/30/16	17:20:00	7,72	9,03	7,85	223,44	218,83	222,84	18,03	15,44	19,59	21,53	0	0	0	0
648	06/30/16	17:21:00	7,77	9,04	7,77	223,45	218,13	223,8	18,16	14,88	18,63	23,63	0	0	0	0
647	06/30/16	17:22:00	7,76	9,18	7,96	223,09	218,65	223,73	17,63	14,91	19,31	23,81	0	0	0	0
646	06/30/16	17:23:00	7,73	9	7,87	223,67	218,78	222,7	17,84	14,19	15,69	23,91	0	0	0	0
645	06/30/16	17:24:00	7,15	8,43	7,15	224,09	219,14	223,57	8,22	7,53	9,31	21,91	0	0	0	0
644	06/30/16	17:25:00	6,58	7,83	6,8	223,84	219,79	223,16	11,72	10,06	12,72	15,91	0	0	0	0
643	06/30/16	17:26:00	15,2	17,36	15,78	221,37	216,69	221,5	11,53	9,28	11,94	21,03	0	0	0	0
642	06/30/16	17:27:00	15,28	15,67	14,15	223,46	218,81	221,86	3,56	5,66	7,09	67,88	0	0	0	0
641	06/30/16	17:28:00	8,9	9,27	8,72	223,39	220,06	221,87	10,34	11,16	7,66	89,38	0	0	0	0
640	06/30/16	17:29:00	13,67	15,96	13,91	221,77	216,91	219,93	11,75	10,5	13,5	21,03	0	0	0	0
639	06/30/16	17:30:00	12,06	12,57	11,98	221,56	217,65	220,18	19,31	15,25	13,25	115,66	0	0	0	0
638	06/30/16	17:31:00	5,45	6,66	5,68	223,72	218,29	222,88	26,72	20,97	27,59	15,53	0	0	0	0
637	06/30/16	17:32:00	13,21	13,3	13,02	220,61	216,14	221,44	5,03	25,13	4,78	110,34	0	0	0	0
636	06/30/16	17:33:00	15,28	16,74	15,46	221,29	214,17	220	17,34	14,81	19,03	23,38	0	0	0	0
635	06/30/16	17:34:00	8,26	8,81	8,35	222,84	219,39	221,17	4,78	23,63	4,78	113,78	0	0	0	0
634	06/30/16	17:35:00	8,36	9,74	8,47	222,55	217,46	221,5	16,63	12,5	14,88	23,31	0	0	0	0
633	06/30/16	17:36:00	5,53	7,08	5,62	223,2	218,58	222,07	13,31	12,19	11,91	22,53	0	0	0	0
632	06/30/16	17:37:00	5,48	6,74	5,61	222,87	219,04	221,97	27,19	20,38	29,22	16,31	0	0	0	0
631	06/30/16	17:38:00	12,33	14,44	12,67	220,98	217,84	220,03	19,56	16,91	22,59	23,19	0	0	0	0
630	06/30/16	17:39:00	14,63	16,76	15,38	220,64	216,18	219,02	27,38	20,41	27,59	24,78	0	0	0	0
629	06/30/16	17:40:00	12,37	14,36	12,78	221,36	216,79	220,76	22,72	17,91	23,28	24,84	0	0	0	0
628	06/30/16	17:41:00	9,96	11,84	10,58	221,72	216,89	222,1	19,16	16,63	12,44	24,94	0	0	0	0
627	06/30/16	17:42:00	6,69	8,2	6,98	222,36	218,58	223,01	12,38	8,78	10,47	23,59	0	0	0	0
626	06/30/16	17:43:00	2,8	3,21	2,82	223,71	221,41	222,92	4,81	8,19	4,66	72,16	0	0	0	0
625	06/30/16	17:44:00	7,89	9,7	8,14	223,44	219,09	222,52	15,16	9,88	16,13	22,13	0	0	0	0
624	06/30/16	17:45:00	13,63	15,67	14,21	222,14	217,52	220,32	29	19,84	34,75	23,75	0	0	0	0
623	06/30/16	17:46:00	13,72	15,89	14	221,95	218,27	220,2	27,22	21,44	29,56	24,94	0	0	0	0
622	06/30/16	17:47:00	8,88	10,55	9,33	223,24	220,11	222,17	28,22	24,06	29,97	25	0	0	0	0
621	06/30/16	17:48:00	4,58	5,83	4,81	224,3	220,29	223,82	23,84	16,97	23,63	15,88	0	0	0	0
620	06/30/16	17:49:00	6,51	8,02	6,73	223,85	219,24	223,41	8,06	5,38	7,78	21,28	0	0	0	0
619	06/30/16	17:50:00	12,69	14,43	13,19	222,33	217,68	221,68	11,94	10,78	11,69	20,78	0	0	0	0
618	06/30/16	17:51:00	13,07	13,49	13,08	221,91	218,83	221,75	6,13	23,81	6,13	113,06	0	0	0	0
617	06/30/16	17:52:00	14,9	16,29	15,02	222,29	217,63	221,22	18,09	14,84	19	24	0	0	0	0
616	06/30/16	17:53:00	5,68	7,16	5,72	225,2	221,18	223,59	23,69	17,25	19,44	25,03	0	0	0	0
615	06/30/16	17:54:00	5,55	6,64	5,54	225,98	221,72	223,79	28,59	20,47	28,63	16,75	0	0	0	0
614	06/30/16	17:55:00	5,4	6,98	5,49	226,31	221,59	224,23	13,75	11,72	12,09	23,03	0	0	0	0
613	06/30/16	17:56:00	12,5	14,33	12,91	224,85	219,23	222,73	15,59	16,88	19,44	23,31	0	0	0	0
612	06/30/16	17:57:00	9,39	11,25	9,57	225,39	220,3	224,87	20,53	18,81	21,94	25,44	0	0	0	0
611	06/30/16	17:58:00	11,35	11,8	11,34	224,13	221,2	223,4	6,28	24,34	5,03	110,84	0	0	0	0
610	06/30/16	17:59:00	8,3	9,56	8,39	224,84	219,94	224,36	13,41	11,63	14,88	23,25	0	0	0	0
609	06/30/16	18:00:00	2,79	2,88	2,78	225,93	224,19	224,19	4,84	15,06	4,66	0	0	0	0	0
608	06/30/16	18:01:00	13,58	15,62	14,06	223,68	218,22	221,39	26,75	20,16	27,47	24	0	0	0	0
607	06/30/16	18:02:00	8,07	9,74	8,54	224,83	220,14	221,82	27,09	21,56	30,09	25,41	0	0	0	0
606	06/30/16	18:03:00	13,2	14,95	13,35	223,16	217,31	222,41	27,94	21,38	29,34	25,28	0	0	0	0
605	06/30/16	18:04:00	5,46	6,88	5,67	224,74	219,63	224,28	22,25	15,03	22,97	24,25	0	0	0	0
604	06/30/16	18:05:00	5,36	6,82	5,57	225,3	219,53	224,9	10,06	10,47	11,13	22,81	0	0	0	0
603	06/30/16	18:06:00	11,79	13,39	11,95	223,48	218,02	222,5	12,13	9,5	10,19	19,63	0	0	0	0
602	06/30/16	18:07:00	15,78	18,12	16,45	221,83	218	220,53	11,28	12,5	12,16	23,59	0	0	0	0
601	06/30/16	18:08:00	8,41	8,74	8,06	224,19	222,65	222,93	6,13	24,34	4,84	107,69	0	0	0	0
600	06/30/16	18:09:00	6,81	8,38	6,98	224,38	221,31	223,56	10,03	8,69	11,97	23,81	0	0	0	0
599	06/30/16	18:10:00	0	1,13	0	225,71	222,58	225,52	7,03	9,16	7,63	85,13	0	0	0	0
598	06/30/16	18:11:00	5,7	6,88	5,92	224,62	220,4	224,56	26,97	21	27,84	16,38	0	0	0	0
597	06/30/16	18:12:00	11,49	13,24	11,59	223,25	218,66	222,26	28,16	20,94	28,09	24,81	0	0	0	0
596	06/30/16	18:13:00	5,48	6,89	5,65	224,42	220,31	223,75	17,59	13,09	16,03	25	0	0	0	0
595	06/30/16	18:14:00	7,51	9,22	7,88	223,55	220,2	222,69	10	7,91	9,63	21,56	0	0	0	0
594	06/30/16	18:15:00	14,21	16,05	14,43	221,76	218,46	221,71	16,34	10,5	13,72	22,69	0	0	0	0
593	06/30/16	18:16:00	15,07	17,37	15,41	221,26	218,52	221,41	11,09	12,22	12,16	25,38	0	0	0	0
592	06/30/16	18:17:00	2,78	2,91	2,81	224,14	222,82	224,28	4,84	15,84	5,84	0	0	0	0	0
591	06/30/16	18:18:00	4,66	6,13	4,84	224,54	220,82	223,64	12,19	8,19	11,44	24,13	0	0	0	0
590	06/30/16	18:19:00	0	9,05	8,58	223,59	220,94	222,42	16,63	18,16	24,09	110,06	0	0	0	0
589	06/30/16	18:20:00	12,92	14,74	13,18	222,6	218,83	221,03	27,09	20,44	28,81	25,75	0	0	0	0
588	06/30/16	18:21:00	5,46	7,18	5,74	224,44	221,36	224,19	17,5	14,94	18,16	24	0	0	0	0
587	06/30/16	18:22:00	5,55	7,03	5,62	224,62	221,31	224,43	10,84	9,75	12,38	21,38	0	0	0	0
586	06/30/16	18:23:00	7,92	9	8,2	223,57	220,48	223,94	18,34	15,31	19,13	15,03	0	0	0	0
585	06/30/16	18:24:00	9,39	10,78	9,37	223,99	219,73	223,04	15,09	13,38	17,31	24,81	0	0	0	0
584	06/30/16	18:25:00	6,69	8,14	6,85	224,47	220,76	223,56	6,5	7,09	7,13	22,63	0	0	0	0
583	06/30/16	18:26:00	10,33	10,95	10,68	223,27	222,38	221,17	13,13	9,53	13,91	85,81	0	0	0	0
582	06/30/16	18:27:00	7,46	9,47	7,65	224,35	221,42	224,56	10,94	10,81	12,28	21,38	0	0	0	0
581	06/30/16	18:28:00	10,65	11,15	10,56	222,93	221,44	223,01	0	127,88	0	127,75	0	0	0	0
580	06/30/16	18:29:00	7	8,89	7,24	225,56	220,57	224,17	27,47	20,91	28,28	22,28	0	0	0	0
579	06/30/16	18:30:00	5,78	7,22	5,85	225,77	221,03	224,15	11,59	10,44	11,69	23,25	0	0	0	0
.
.
.												

56	07/01/2016	03:13:00	13,01	13,47	13,23	220,95	219,37	219,19	34,47	28,84	15,59	0	0	0	0	0	0
55	07/01/2016	03:14:00	11,64	13,32	12,09	222,18	218,57	220,58	16,69	13,41	17,31	21,03	0	0	0	0	0
54	07/01/2016	03:15:00	8,18	9,3	8,47	222,56	219,35	222,08	18,19	14,53	19,06	8,34	0	0	0	0	0
53	07/01/2016	03:16:00	9,76	11,81	10,6	222,48	218,95	221,75	17,06	13,22	17,22	18,69	0	0	0	0	0
52	07/01/2016	03:17:00	13,44	15,65	13,76	221,12	217,67	220,72	27,38	20,78	28,88	21,34	0	0	0	0	0
51	07/01/2016	03:18:00	13,86	15,83	14,16	221,22	216,42	220,8	27,69	20,63	27,63	21,88	0	0	0	0	0
50	07/01/2016	03:19:00	7,3	8,81	7,51	223,52	219,06	222,17	28,25	16,44	27,88	22,22	0	0	0	0	0
49	07/01/2016	03:20:00	4,41	5,67	4,46	224,21	219,59	222,77	8,31	6,78	8,88	19,31	0	0	0	0	0
48	07/01/2016	03:21:00	0	0,29	0	224,64	223,14	222,79	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	07/01/2016	03:22:00	9,63	10,01	9,47	222,37	220,59	220,77	4,59	21,22	5	0	0	0	0	0	0
46	07/01/2016	03:23:00	11,29	11,53	11	221,52	220,36	220,22	4,78	21	4,88	0	0	0	0	0	0
45	07/01/2016	03:24:00	2,76	3,22	2,78	223,75	222,02	222,91	12,53	10,34	7,5	73,56	0	0	0	0	0
44	07/01/2016	03:25:00	7,28	9,03	7,65	223,6	219,11	222,68	12,56	11,75	12,47	18,5	0	0	0	0	0
43	07/01/2016	03:26:00	13,59	15,62	14,25	221,45	217,7	220,51	27,44	19,63	28,09	21,41	0	0	0	0	0
42	07/01/2016	03:27:00	5,48	6,41	5,51	223,72	219,7	222,4	27,84	19,34	27,34	9,5	0	0	0	0	0
41	07/01/2016	03:28:00	8,42	10,25	9,08	223,37	218,61	222,5	27,34	20,66	29,38	22,81	0	0	0	0	0
40	07/01/2016	03:29:00	4,78	6,26	4,92	224,59	219,76	222,92	13,97	8,56	11,22	20,06	0	0	0	0	0
39	07/01/2016	03:30:00	12,12	14,01	12,43	222,25	218,52	220,45	16,22	15,19	15,81	20,25	0	0	0	0	0
38	07/01/2016	03:31:00	12,13	12,34	11,98	221,78	219,97	219,81	4,81	21,91	5,03	107,16	0	0	0	0	0
37	07/01/2016	03:32:00	3,94	4,28	4,22	223,9	221,64	222,97	12,91	12,19	16,63	92,91	0	0	0	0	0
36	07/01/2016	03:33:00	2,77	3,06	2,77	223,9	222,46	222,4	7,91	7,34	8,16	57,63	0	0	0	0	0
35	07/01/2016	03:34:00	6,66	7,08	0	223,72	222,05	222,25	14,72	9,53	12,88	86,75	0	0	0	0	0
34	07/01/2016	03:35:00	13,61	15,91	14,2	221,39	217,75	220,63	26,88	20,06	28,81	21,28	0	0	0	0	0
33	07/01/2016	03:36:00	9,84	11,73	10,47	222,8	218,16	222,08	27,84	19,53	28,06	20,34	0	0	0	0	0
32	07/01/2016	03:37:00	5,4	6,84	5,6	224,12	219,44	222,38	13,72	13,06	12,84	20,19	0	0	0	0	0
31	07/01/2016	03:38:00	5,37	6,5	5,4	224,13	219,15	222,32	27,25	18,97	28,06	9,63	0	0	0	0	0
30	07/01/2016	03:39:00	12,5	14,61	13,08	222,01	218,39	220,03	25,59	20,66	28,09	21,16	0	0	0	0	0
29	07/01/2016	03:40:00	6,95	8,37	7,11	223,27	219,77	222,67	9,78	12,66	11,81	20,5	0	0	0	0	0
28	07/01/2016	03:41:00	5,15	5,9	5,61	223,4	221,65	222,69	17,66	17,06	10,38	92,75	0	0	0	0	0
27	07/01/2016	03:42:00	2,76	3,17	2,79	223,83	222,11	223,02	6,28	4,06	6,03	61,13	0	0	0	0	0
26	07/01/2016	03:43:00	9,87	10,32	9,81	222,51	220,65	221,52	23,22	16,13	19,47	0	0	0	0	0	0
25	07/01/2016	03:44:00	0	0,29	0	224,87	223,24	222,93	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	07/01/2016	03:45:00	5,54	7	5,66	224,17	218,85	222,56	23,41	19,16	26,69	22,56	0	0	0	0	0
23	07/01/2016	03:46:00	5,58	6,96	5,74	224,15	219,46	222,49	12,75	9,19	11,28	18,94	0	0	0	0	0
22	07/01/2016	03:47:00	11,37	12,91	11,61	222,59	217,88	221,88	20,41	14,66	19,63	19,53	0	0	0	0	0
21	07/01/2016	03:48:00	12,51	14,27	12,64	222,09	218,55	220,57	26,81	19,88	29,44	20,34	0	0	0	0	0
20	07/01/2016	03:49:00	7,69	9,16	8,03	223,19	219,71	222,58	10,03	9,88	10,28	18,75	0	0	0	0	0
19	07/01/2016	03:50:00	7,19	8,4	7,51	223,03	220,06	222,59	15,44	12,66	16,13	8,25	0	0	0	0	0
18	07/01/2016	03:51:00	13,93	14,31	13,72	220,72	219,12	220,01	4,47	19,59	4,84	0	0	0	0	0	0
17	07/01/2016	03:52:00	0	1,9	1,64	222,51	223,38	223,38	11,16	20,53	11,88	94,53	0	0	0	0	0
16	07/01/2016	03:53:00	6,38	6,73	6,33	224,11	222,21	222,33	77,06	44,22	98,31	0	0	0	0	0	0
15	07/01/2016	03:54:00	0	0,86	0	225,34	222,45	223,71	8,06	5,97	7,72	74,34	0	0	0	0	0
14	07/01/2016	03:55:00	10,34	12	10,71	223,07	218,38	222,67	19,06	12,41	16,81	18,94	0	0	0	0	0
13	07/01/2016	03:56:00	5,57	6,68	5,77	223,91	219,44	223,5	28,06	20,47	28,72	17,19	0	0	0	0	0
12	07/01/2016	03:57:00	6,29	8,02	6,34	223,86	220,06	223,14	30,63	26	27,47	21,31	0	0	0	0	0
11	07/01/2016	03:58:00	7,88	9,26	8,17	223,12	219,44	222,42	11,91	9,56	11,09	17,91	0	0	0	0	0
10	07/01/2016	03:59:00	12,35	14,3	13,01	222,2	217,95	221,44	12,31	11,47	14,13	18,28	0	0	0	0	0
9	07/01/2016	04:00:00	16,71	18,75	17,24	220,21	216,69	219,66	16,16	13	16,75	20,44	0	0	0	0	0

Tabela I.8. Distribuição de temperatura na câmara de secagem do coletor solar, temperatura ambiente e câmara de secagem do secador elétrico – EXP2 (secagem mista).

Tipo de secagem	Hora do dia	Temperatura da câmara do secador solar (°C)	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura do ar de secagem do secador elétrico (°C)	
Secagem solar	09h30min	33,33	23,63	-	
	10h00min	39,67	24,43	-	
	10h30min	45,33	25,14	-	
	11h00min	42,67	25,70	-	
	11h30min	45,00	26,08	-	
	12h00min	42,33	26,29	-	
	12h30min	39,67	26,89	-	
	13h00min	40,00	27,08	-	
	13h30min	39,67	27,33	-	
	14h00min	38,67	27,53	-	
	14h30min	38,00	27,64	-	
	15h00min	38,67	27,75	-	
	15h30min	35,00	27,30	-	
	16h00min	32,00	26,92	-	
	Secagem elétrica	17h30min	-	24,09	42,90
		18h00min	-	23,82	44,70
18h30min		-	23,27	45,70	
19h00min		-	22,78	45,30	
19h30min		-	22,31	44,90	
20h00min		-	22,01	44,20	

20h30min	-	21,84	44,20
21h00min	-	21,83	44,00
21h30min	-	21,27	44,00
22h00min	-	20,73	46,00
22h30min	-	20,68	46,10
23h00min	-	20,70	45,70
23h30min	-	20,79	46,10
00h00min	-	20,69	45,90
00h30min	-	20,59	46,10
01h00min	-	20,46	44,90
01h30min	-	20,39	45,60
02h00min	-	20,47	44,20
02h30min	-	20,50	44,40
03h00min	-	20,26	44,40
03h30min	-	20,17	44,10
04h00min	-	20,20	45,00

Tabela I.9. Temperatura média da câmara de secagem do secador solar realizada em intervalos de dez minutos (secagem mista) com dados coletado do experimento 2 com estratégia de controle embarcada.

Horário	Temperatura °C
09h10min	33
09h20min	33
09h30min	34
09h40min	39
09h50min	41
10h00min	39
10h10min	45
10h20min	46
10h30min	45
10h40min	43
10h50min	43
11h00min	42
11h10min	46
11h20min	46
11h30min	43
11h40min	43
11h50min	42
12h00min	42
12h10min	38
12h20min	42
12h30min	39
12h40min	41
12h50min	41
13h00min	38
13h10min	39
13h20min	41
13h30min	39
13h40min	39
13h50min	39

14h00min	38
14h10min	39
14h20min	36
14h30min	39
14h40min	39
14h50min	38
15h00min	39
15h10min	36
15h20min	35
15h30min	34
15h40min	33
15h50min	32
16h00min	31

Tabela I.10. Intensidade média de irradiação solar medida durante a realização do experimento 2 na UFCG em intervalos de trinta minutos.

Horário	W/m ²
09h30min	557,74
10h00min	686,42
10h30min	803,77
11h00min	847,59
11h30min	779,08
12h00min	639,48
12h30min	762,86
13h00min	574,79
13h30min	654,97
14h00min	655,64
14h30min	578,11
15h00min	523,29
15h30min	385,53
16h00min	300,88
Média	625,01

Tabela I.11. Intensidade média de irradiação solar medida durante a realização do experimento 2 na UFCG em intervalos de uma hora.

Horário	W/m ² - Média horária
10h00min	621,02
11h00min	825,32
12h00min	710,42
13h00min	670,37
14h00min	655,30
15h00min	551,15
16h00min	343,90
Somatório total da energia recebida no período	4.377,48

Tabela I.12. Valores obtidos no experimento realizado nos dias 30 de junho de 2016.

Dia	Horário	Tempo (min)	Produto (g)	Massa Seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	RU $\frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$	Dados do	Desvio padrão
								modelo matemático	(σ)
30/06/2016 Solar	09h00min	0	30,4	9,12	0,7000	2,3333	1,0000	1,0000	0,0000
	09h30min	30	28,7	9,12	0,6822	2,1469	0,9076	0,9524	0,0317
	10h00min	60	27,8	9,12	0,6719	2,0482	0,8587	0,8965	0,0267
	10h30min	90	26,6	9,12	0,6571	1,9167	0,7935	0,8392	0,0323
	11h00min	120	25,6	9,12	0,6438	1,8070	0,7391	0,7826	0,0308
	11h30min	150	24,7	9,12	0,6308	1,7083	0,6902	0,7277	0,0265
	12h00min	180	23,9	9,12	0,6184	1,6206	0,6467	0,6750	0,0200
	12h30min	210	23,2	9,12	0,6069	1,5439	0,6087	0,6247	0,0113
	13h00min	240	22,4	9,12	0,5929	1,4561	0,5652	0,5772	0,0085
	13h30min	270	21,9	9,12	0,5836	1,4013	0,5380	0,5324	0,0040
	14h00min	300	21,4	9,12	0,5738	1,3465	0,5109	0,4903	0,0146
	14h30min	330	21,0	9,12	0,5657	1,3026	0,4891	0,4509	0,0270
	15h00min	360	20,4	9,12	0,5529	1,2368	0,4565	0,4142	0,0299
	15h30min	390	19,9	9,12	0,5417	1,1820	0,4293	0,3800	0,0349
	16h00min	420	19,6	9,12	0,5347	1,1491	0,4130	0,3482	0,0458
	30/06/2016 Elétrico	18h00min	450	186	9,12	0,4989	0,9956	0,3587	0,3188
18h30min		480	17,7	9,12	0,4847	0,9408	0,3098	0,2916	0,0129
19h00min		510	17,0	9,12	0,4635	0,8640	0,2717	0,2664	0,0037
19h30min		540	16,6	9,12	0,4506	0,8202	0,2500	0,2433	0,0048
20h00min		570	16,2	9,12	0,4370	0,7763	0,2283	0,2219	0,0045
20h30min		600	15,8	9,12	0,4228	0,7325	0,2065	0,2022	0,0030
21h00min		630	15,4	9,12	0,4078	0,6886	0,1848	0,1842	0,0004
21h30min		660	15,0	9,12	0,3920	0,6447	0,1630	0,1676	0,0033
22h00min		690	14,8	9,12	0,3838	0,6228	0,1522	0,1525	0,0002
22h30min		720	14,4	9,12	0,3667	0,5789	0,1304	0,1386	0,0058
23h00min		750	14,0	9,12	0,3486	0,5351	0,1087	0,1258	0,0121
23h30min		780	13,7	9,12	0,3343	0,5022	0,0924	0,1142	0,0154
00h00min		810	13,5	9,12	0,3244	0,4803	0,0800	0,1036	0,0167
00h30min		840	13,3	9,12	0,3143	0,4583	0,0700	0,0939	0,0169
01/07/2016 Elétrico	01h00min	870	13,1	9,12	0,3038	0,4364	0,0600	0,0851	0,0177
	01h30min	900	12,9	9,12	0,2930	0,4145	0,0500	0,0770	0,0191
	02h00min	930	12,7	9,12	0,2819	0,3925	0,0400	0,0697	0,0210
	02h30min	960	12,5	9,12	0,2704	0,3706	0,0300	0,0631	0,0234
	03h00min	990	12,4	9,12	0,2645	0,3596	0,0200	0,0570	0,0262
	03h30min	1020	12,1	9,12	0,2463	0,3268	0,0100	0,0515	0,0294
	04h00min	1050	12,0	9,12	0,2400	0,3158	0,0000	0,0465	0,0329

Tabela I.13. Consumo de energia registrado durante a realização do experimento 2 (EXP 2) (experimento misto) solar seguido de elétrico.

Horário	kVAh	kWh	kVArh
17h00min às 17h30min	3,29	2,79	1,73
17h30min às 18h30min	6,26	5,32	3,3
18h30min às 19h30min	5,7	4,84	3
19h30min às 20h30min	5,96	5,07	3,14
20h30min às 21h30min	5,64	4,8	2,97
21h30min às 22h30min	5,92	5,03	3,12
22h30min às 23h30min	5,9	5,02	3,11
23h30min às 00h30min	5,44	4,62	2,86
00h30min às 01h30min	5,76	4,9	3,04
01h30min às 02h30min	5,52	4,69	2,91
02h30min às 03h30min	5,16	4,76	2,95
03h30min às 04h00min	2,59	2,20	1,36
Consumo total de energia	63,14	54,04	33,49

Tabela I.14. Distribuição da umidade relativa e temperatura do ar de secagem no secador solar do experimento EXP2, realizado nos dias 30 de junho de 2016. Com a média dos valores da umidade relativa do ar de secagem e da temperatura realizadas a cada 10 minutos.

Tempo (min)	Umidade Relativa			Temperatura		
	Sensor A	Sensor B	Sensor C	Sensor A	Sensor B	Sensor C
10	53	23	32	28	41	34
20	45	24	35	30	44	33
30	40	23	34	25	40	33
40	46	21	34	27	46	34
50	46	20	29	27	49	39
60	43	19	28	27	51	41
70	42	20	29	27	47	39
80	40	16	25	29	55	45
90	40	16	25	29	55	46
100	40	17	25	34	53	45
110	40	19	27	32	51	43
120	40	19	26	32	51	43
130	39	18	26	34	48	42
140	37	17	25	31	55	46
150	36	17	25	29	53	46
160	36	18	26	27	47	43
170	37	19	27	29	51	43
180	37	20	27	34	49	42
190	38	19	26	29	47	42
200	39	21	28	29	43	38
210	41	19	26	30	48	42
220	41	21	28	28	45	39
230	41	21	27	30	47	41
240	41	20	27	29	46	41
250	38	21	28	27	43	38
260	37	21	28	29	45	39
270	39	21	27	30	47	41
280	37	21	28	30	43	39
290	36	21	27	29	45	39
300	35	22	29	29	44	39
310	36	22	28	29	42	38
320	40	21	28	30	46	39
330	30	25	30	29	39	36
340	33	21	28	30	46	39
350	35	21	28	30	47	39
360	36	22	29	29	43	38

370	37	21	28	31	45	39
380	39	24	30	27	39	36
390	41	24	30	27	41	35
400	42	26	31	27	38	34
410	43	27	31	26	34	33
420	43	26	33	26	34	32

Tabela I.15. Temperaturas médias do processo de secagem solar e temperatura ambiente nos dias 15 e 16 de junho de 2016 (secagem solar) com estratégia de controle embarcada.

Horário	Temperatura da câmara 1º dia	Temperatura da câmara 2º dia	Temperatura Ambiente 1º dia	Temperatura Ambiente 2º dia
09h30min	35,00	39,67	24,09	23,85
10h00min	35,33	45,33	24,66	24,19
10h30min	41,00	46,67	25,63	25,36
11h00min	45,67	49,00	26,16	26,21
11h30min	42,67	48,33	26,87	26,28
12h00min	46,67	43,33	26,25	26,69
12h30min	48,00	46,33	27,32	27,30
13h00min	49,00	44,00	27,50	27,41
13h30min	45,33	42,00	27,40	27,72
14h00min	43,67	41,00	27,91	27,44
14h30min	40,33	41,67	28,05	27,58
15h00min	39,00	39,67	27,84	27,43
15h30min	34,67	36,33	27,81	26,83
16h00min	32,00	33,33	27,34	26,40

Tabela I.16. Temperatura média da câmara de secagem do coletor solar realizada em intervalos de dez minutos com dados coletado do experimento 3 nos dias 15 e 16/06/2016 com estratégia de controle embarcada.

Horário	Temperatura – 1º dia	Temperatura – 2º dia
09h10min	34	38
09h20min	35	39
09h30min	36	42
09h40min	35	43
09h50min	35	47
10h00min	36	46
10h10min	42	45
10h20min	42	46
10h30min	39	49
10h40min	44	49
10h50min	47	49
11h00min	46	49
11h10min	42	51
11h20min	45	47
11h30min	41	47
11h40min	45	43
11h50min	46	44

12h00min	49	43
12h10min	44	46
12h20min	51	46
12h30min	49	47
12h40min	47	43
12h50min	49	46
13h00min	51	43
13h10min	45	42
13h20min	46	44
13h30min	45	40
13h40min	42	39
13h50min	46	42
14h00min	43	42
14h10min	43	41
14h20min	42	42
14h30min	45	42
14h40min	39	42
14h50min	39	38
15h00min	39	39
15h10min	35	39
15h20min	35	35
15h30min	34	35
15h40min	33	34
15h50min	32	33
16h00min	31	33

Tabela I.17. Intensidade média de irradiação solar medida nos dias 15 e 16 de junho de 2016 na UFCG em intervalos de trinta minutos.

Experimento solar dias 15 e 16 de junho		
Horário	W/m ² - 1º dia	W/m ² - 2º dia
09h30min	493,01	634,61
10h00min	539,43	765,91
10h30min	766,24	808,70
11h00min	809,51	848,57
11h30min	567,76	744,16
12h00min	824,53	567,40
12h30min	752,35	741,25
13h00min	811,02	468,20
13h30min	588,64	516,99
14h00min	556,62	483,95
14h30min	600,19	591,41
15h00min	464,20	414,25
15h30min	363,60	344,70
16h00min	281,53	236,24
Média	601,33	583,31

Tabela I.18. Intensidade média de irradiação solar medida nos dias 15 e 16 de junho de 2016 na UFCG em intervalos de uma hora.

Experimento 3	Primeiro dia 15/06	Segundo dia 16/06 Wh/m ² - Média
Horário	Wh/m ² - Média horária	horaria
10h00min	516,22	700,26
11h00min	787,87	828,64
12h00min	696,15	655,78
13h00min	781,68	604,72
14h00min	572,63	500,47
15h00min	532,19	502,83
16h00min	322,57	290,47
Somatório da energia recebida nos dias de realização do experimento	4.209,31	4.083,17
Somatório total da energia recebida durante o experimento 3	8.292,48 W/m ²	

Tabela I.19. Valores obtidos no experimento realizado nos dias 15 e 16 de junho de 2016.

Dia	Horário	Tempo (min)	Produto (g)	Massa Seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	$RU = \frac{X - Xe}{X0 - Xe}$	Dados do modelo matemático	Desvio padrão (σ)
15/06/2016 1º dia	09h00min	0	30,8	9,86	0,6799	2,1237	1,0000	1,0000	0,0000
	09h30min	30	29,7	9,86	0,6680	2,0122	0,9382	0,9437	0,0039
	10h00min	60	28,3	9,86	0,6516	1,8702	0,8596	0,8788	0,0136
	10h30min	90	27,5	9,86	0,6415	1,7890	0,8146	0,8134	0,0008
	11h00min	120	25,9	9,86	0,6193	1,6268	0,7247	0,7497	0,0177
	11h30min	150	25,0	9,86	0,6056	1,5355	0,6742	0,6887	0,0103
	12h00min	180	24,3	9,86	0,5942	1,4645	0,6348	0,6310	0,0027
	12h30min	210	23,4	9,86	0,5786	1,3732	0,5843	0,5767	0,0054
	13h00min	240	22,4	9,86	0,5598	1,2718	0,5281	0,5260	0,0015
	13h30min	270	21,1	9,86	0,5327	1,1400	0,4551	0,4789	0,0169
	14h00min	300	20,8	9,86	0,5260	1,1095	0,4382	0,4354	0,0020
	14h30min	330	20,2	9,86	0,5119	1,0487	0,4045	0,3951	0,0066
	15h00min	360	19,6	9,86	0,4969	0,9878	0,3708	0,3581	0,0090
	15h30min	390	19,3	9,86	0,4891	0,9574	0,3539	0,3242	0,0210
	16h00min	420	18,6	9,86	0,4699	0,8864	0,3146	0,2931	0,0152
	16/06/2016 2º dia	09h30min	450	17,9	9,86	0,4492	0,8154	0,2753	0,2646
10h00min		480	17,2	9,86	0,4267	0,7444	0,2360	0,2387	0,0019
10h30min		510	16,6	9,86	0,4060	0,6836	0,2022	0,2151	0,0091
11h00min		540	15,9	9,86	0,3799	0,6126	0,1629	0,1937	0,0218
11h30min		570	15,4	9,86	0,3597	0,5619	0,1348	0,1742	0,0279
12h00min		600	15,1	9,86	0,3470	0,5314	0,1180	0,1565	0,0273
12h30min		630	14,8	9,86	0,3338	0,5010	0,1011	0,1406	0,0279
13h00min		660	14,5	9,86	0,3200	0,4706	0,0843	0,1261	0,0296
13h30min		690	14,1	9,86	0,3007	0,4300	0,0618	0,1131	0,0362
14h00min		720	13,9	9,86	0,2906	0,4097	0,0506	0,1013	0,0358
14h30min		750	13,6	9,86	0,2750	0,3793	0,0337	0,0907	0,0403
15h00min		780	13,2	9,86	0,2530	0,3387	0,0112	0,0811	0,0494
15h30min		810	13,1	9,86	0,2473	0,3286	0,0056	0,0725	0,0473
16h00min		840	13,0	9,86	0,2415	0,3185	0,0000	0,0648	0,0458

Tabela I.20. Distribuição da umidade relativa e temperatura do ar de secagem no secador solar do experimento EXP3, realizado nos dias 15 e 16 de junho de 2016. Com a média dos valores da umidade relativa do ar de secagem e da temperatura realizadas a cada 10 minutos.

Tempo (min)	Umidade Relativa			Temperatura		
	Sensor A	Sensor B	Sensor C	Sensor A	Sensor B	Sensor C
10	55	27	37	31	41	33
20	49	22	34	32	46	38
30	42	17	28	31	53	43
40	49	21	29	30	46	40

50	49	23	30	31	43	38
60	43	16	26	31	55	46
70	38	17	26	31	55	46
80	42	16	25	32	55	46
90	55	16	25	32	55	47
100	48	16	25	33	55	46
110	37	14	23	33	60	51
120	48	15	22	33	60	51
130	49	16	24	33	55	47
140	43	16	25	33	57	46
150	36	14	24	33	57	47
160	42	16	24	33	57	46
170	55	15	24	34	60	47
180	48	15	23	34	60	49
190	38	14	23	35	60	49
200	48	15	24	36	60	48
210	49	14	24	36	60	49
220	43	14	24	37	58	47
230	36	15	24	37	58	47
240	42	15	24	37	57	47
250	55	16	25	38	55	46
260	48	16	25	38	54	46
270	37	16	25	38	57	46
280	48	18	24	38	53	45
290	49	17	24	38	49	45
300	43	18	25	37	51	44
310	36	19	26	37	49	43
320	42	18	25	36	51	43
330	55	19	26	36	46	42
340	48	19	26	36	49	40
350	37	19	26	36	45	39
360	48	21	28	36	43	38
370	49	21	29	36	44	38
380	43	21	29	36	41	38
390	36	24	30	34	36	35
400	42	25	31	34	35	33
410	55	26	32	34	35	32
420	48	22	32	34	46	38
430	51	25	34	34	41	34
440	48	24	35	34	43	35

450	49	22	34	34	46	36
460	43	22	34	34	44	35
470	36	23	33	33	41	35
480	37	23	33	33	46	36
490	55	18	29	34	53	42
500	48	19	28	34	49	42
510	42	20	29	35	47	39
520	48	18	27	35	51	44
530	49	14	24	34	60	47
540	43	15	25	35	57	46
550	36	20	27	35	49	42
560	42	17	26	35	55	45
570	55	20	27	35	45	41
580	48	16	25	35	55	45
590	37	18	25	35	53	46
600	48	16	24	36	58	49
610	49	18	25	36	49	44
620	43	14	23	36	60	51
630	36	14	22	35	57	49
640	42	16	24	35	57	47
650	55	16	23	35	57	49
660	48	15	23	35	58	51
670	37	19	25	33	51	45
680	48	18	25	33	51	46
690	49	17	24	33	49	45
700	43	21	27	33	47	42
710	37	17	25	33	52	46
720	34	19	26	31	49	43
730	55	20	26	31	47	43
740	48	20	26	31	46	42
750	37	18	25	30	51	45
760	50	23	28	30	42	39
770	48	22	28	29	43	39
780	40	22	28	27	44	39
790	45	25	30	27	39	35
800	45	25	30	27	35	35
810	46	25	32	27	37	34
820	46	26	32	26	35	33
830	46	27	33	26	35	32
840	48	28	34	25	33	31

Tabela I.21. Temperaturas médias do processo de secagem solar e temperatura ambiente nos dias 07 e 08 de julho de 2016 (secagem solar).

Horário	Temperatura da câmara 1º dia	Temperatura da câmara 2º dia	Temperatura Ambiente 1º dia	Temperatura Ambiente 2º dia
09h30min	29,00	38,00	23,81	25,09
10h00min	28,67	46,67	24,19	25,87
10h30min	31,33	49,67	24,75	26,57
11h00min	34,00	53,00	25,25	27,38
11h30min	37,00	54,33	25,76	27,87
12h00min	41,33	53,67	26,48	28,25
12h30min	41,33	52,67	26,97	28,28
13h00min	43,33	48,00	27,50	28,50
13h30min	46,33	48,33	28,28	28,92
14h00min	45,33	46,67	28,66	29,04
14h30min	44,33	43,00	28,61	28,88
15h00min	38,00	42,00	28,10	28,97
15h30min	38,00	36,67	28,42	28,36
16h00min	33,67	33,33	27,89	28,22

Tabela I.22. Temperatura média da câmara de secagem do coletor solar realizada em intervalos de dez minutos com dados coletado do experimento 4 nos dias 07 e 08/07/2016 com estratégia de controle embarcada.

Horário	Temperatura – 1º dia	Temperatura – 2º dia
09h10min	28	36
09h20min	28	43
09h30min	28	43
09h40min	28	45
09h50min	29	46
10h00min	29	49
10h10min	30	49
10h20min	32	49
10h30min	32	51
10h40min	33	53
10h50min	34	53
11h00min	35	53
11h10min	35	54
11h20min	38	54
11h30min	38	55
11h40min	41	53
11h50min	39	55
12h00min	44	53
12h10min	42	51
12h20min	42	53
12h30min	40	54
12h40min	42	49
12h50min	43	46
13h00min	45	49
13h10min	46	47

13h20min	46	49
13h30min	47	49
13h40min	46	47
13h50min	45	47
14h00min	45	46
14h10min	45	45
14h20min	45	43
14h30min	43	41
14h40min	38	42
14h50min	38	42
15h00min	38	42
15h10min	38	38
15h20min	38	36
15h30min	38	36
15h40min	35	35
15h50min	33	33
16h00min	33	32

Tabela I.23 Intensidade média de irradiação solar medida nos dias 07 e 08 de julho de 2016 na UFCG em intervalo de trinta minutos.

Experimento solar dias 07 e 08 de julho		
Horário	W/m ² - 1º dia	W/m ² - 2º dia
09h30min	287,72	612,27
10h00min	306,45	716,12
10h30min	523,42	766,37
11h00min	547,90	813,27
11h30min	534,40	828,15
12h00min	752,58	833,51
12h30min	599,61	821,06
13h00min	738,24	577,64
13h30min	782,55	753,53
14h00min	631,08	583,23
14h30min	541,61	485,36
15h00min	348,37	512,39
15h30min	439,45	262,28
16h00min	230,34	204,62
Média	518,84	626,41

Tabela I.24. Intensidade média de irradiação solar medida nos dias 07 e 08 de julho de 2016 na UFCG em intervalos de uma hora.

Experimento 4	Primeiro dia 07/07 Wh/m ² - Média horária	Segundo dia 08/07 Wh/m ² - Média horária
Horário		
10h00min	297,09	664,2
11h00min	535,66	789,82
12h00min	643,49	830,83
13h00min	668,93	699,35
14h00min	706,82	668,38

15h00min	444,49	498,88
16h00min	334,9	233,45
Somatório da energia recebida nos dias de realização do experimento	3.631,38	4.384,91
Somatório total da energia recebida durante o experimento 4	8.161,29 W/m ²	

Tabela I.25. Valores obtidos no experimento realizado nos dias 07 e 08 de julho de 2016.

Dia	Horário	Tempo (min)	Produto (g)	Massa Seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$	Dados do modelo matemático	Desvio padrão (σ)
08/07/2016 1º dia	09h00min	0	32,2	9,66	0,7000	2,3333	1,0000	1	0
	09h30min	30	31,4	9,66	0,6924	2,2505	0,9610	0,9633	0,0016
	10h00min	60	30,5	9,66	0,6833	2,1573	0,9171	0,9142	0,0020
	10h30min	90	29,7	9,66	0,6747	2,0745	0,8780	0,8610	0,0120
	11h00min	120	28,9	9,66	0,6657	1,9917	0,8390	0,8064	0,0230
	11h30min	150	27,8	9,66	0,6525	1,8778	0,7854	0,7519	0,0237
	12h00min	180	26,7	9,66	0,6382	1,7640	0,7317	0,6984	0,0236
	12h30min	210	25,6	9,66	0,6227	1,6501	0,6780	0,6465	0,0223
	13h00min	240	24,4	9,66	0,6041	1,5259	0,6195	0,5968	0,0161
	13h30min	270	23,2	9,66	0,5836	1,4017	0,5610	0,5494	0,0082
	14h00min	300	22,0	9,66	0,5609	1,2774	0,5024	0,5045	0,0015
	14h30min	330	20,9	9,66	0,5378	1,1636	0,4488	0,4622	0,0095
	15h00min	360	20,0	9,66	0,5170	1,0704	0,4049	0,4226	0,0125
	15h30min	390	19,5	9,66	0,5046	1,0186	0,3805	0,3856	0,0036
	16h00min	420	18,8	9,66	0,4862	0,9462	0,3463	0,3512	0,0035
	08/07/2016 2º dia	09h30min	450	18,3	9,66	0,4721	0,8944	0,3220	0,3193
10h00min		480	17,0	9,66	0,4318	0,7598	0,2585	0,2898	0,0221
10h30min		510	16,2	9,66	0,4037	0,6770	0,2195	0,2626	0,0305
11h00min		540	15,5	9,66	0,3768	0,6046	0,1854	0,2376	0,0369
11h30min		570	14,7	9,66	0,3429	0,5217	0,1463	0,2147	0,0483
12h00min		600	13,9	9,66	0,3050	0,4389	0,1073	0,1937	0,0611
12h30min		630	13,5	9,66	0,2844	0,3975	0,0878	0,1745	0,0613
13h00min		660	13,2	9,66	0,2682	0,3665	0,0732	0,1570	0,0592
13h30min		690	12,8	9,66	0,2453	0,3251	0,0537	0,1411	0,0618
14h00min		720	12,4	9,66	0,2210	0,2836	0,0341	0,1266	0,0654
14h30min		750	12,2	9,66	0,2082	0,2629	0,0244	0,1135	0,0630
15h00min		780	12,0	9,66	0,1950	0,2422	0,0146	0,1016	0,0615
15h30min		810	11,8	9,66	0,1814	0,2215	0,0049	0,0909	0,0608
16h00min		840	11,7	9,66	0,1744	0,2112	0,0000	0,0812	0,0574

Tabela I.26. Distribuição da umidade relativa e temperatura do ar de secagem no secador solar do experimento EXP4, realizado nos dias 07 e 08 de julho de 2016. Com a média dos valores da umidade relativa do ar de secagem e da temperatura realizadas a cada 10 minutos.

Tempo (min)	Umidade Relativa			Temperatura		
	Sensor A	Sensor B	Sensor C	Sensor A	Sensor B	Sensor C
10	64	33	43	26	33	27
20	64	33	46	25	31	26
30	64	32	46	26	34	27
40	63	31	46	26	33	27
50	62	31	46	26	33	27
60	62	30	45	26	34	27
70	60	31	44	27	35	28
80	58	30	45	29	38	30
90	57	26	43	29	41	30
100	57	27	41	30	40	31
110	56	25	40	32	43	33
120	56	24	39	31	42	32

130	55	22	37	31	46	32
140	53	22	37	31	46	32
150	53	19	35	32	49	33
160	50	20	34	37	49	38
170	49	18	31	30	51	31
180	47	19	32	32	51	33
190	47	16	29	39	57	33
200	46	17	29	29	51	30
210	46	16	29	31	55	32
220	45	19	30	32	49	33
230	44	18	29	39	55	33
240	44	17	26	35	53	34
250	44	16	26	37	55	36
260	43	14	26	37	58	38
270	43	15	26	37	57	38
280	43	16	25	32	60	33
290	43	15	26	36	58	36
300	43	15	26	38	54	36
310	44	17	25	30	53	35
320	44	16	26	38	55	35
330	44	17	26	39	55	33
340	44	16	27	34	51	35
350	45	21	29	28	43	29
360	45	23	31	36	44	31
370	45	21	30	35	46	31
380	45	21	30	30	46	31
390	47	21	30	29	46	30
400	48	21	30	30	43	31
410	48	25	31	27	38	31
420	55	25	32	27	36	31
430	53	26	33	28	35	30
440	50	28	34	27	33	31
450	42	29	34	26	32	30
460	43	30	36	26	31	31
470	42	22	31	27	45	30
480	41	20	34	29	47	32
490	39	18	29	30	53	33
500	38	19	28	30	53	33
510	38	16	26	30	55	34
520	37	15	26	32	60	35
530	37	15	23	30	60	36

540	37	16	23	32	60	36
550	37	16	22	33	60	37
560	37	16	22	32	60	38
570	38	16	21	32	60	37
580	37	16	22	32	60	37
590	37	16	21	32	60	37
600	37	16	21	32	60	38
610	37	16	21	33	60	38
620	37	16	20	34	60	38
630	37	16	21	32	60	38
640	38	16	20	34	60	38
650	38	16	21	32	60	38
660	38	15	22	32	57	38
670	38	16	21	32	60	38
680	38	16	21	35	60	38
690	38	15	22	31	55	39
700	38	18	24	30	49	38
710	39	16	24	32	57	38
720	39	17	24	37	53	38
730	40	14	23	39	59	38
740	40	15	23	40	58	38
750	41	17	24	39	55	38
760	41	16	24	34	55	38
770	41	17	25	37	51	38
780	42	18	25	32	51	39
790	42	20	26	35	47	38
800	42	21	26	32	44	36
810	42	20	27	37	47	38
820	44	21	27	36	47	37
830	46	20	26	33	47	34
840	48	23	29	29	42	33

Tabela L.27. Temperaturas médias do processo de secagem solar e temperatura ambiente nos dia 03 e 04 de outubro de 2016 (secagem solar) com estratégia de controle embarcada.

Horário	Temperatura da câmara 1º dia	Temperatura da câmara 2º dia	Temperatura ambiente 1º dia	Temperatura ambiente 2º dia
09h30min	32,33	36,67	25,16	24,49
10h00min	31,67	38,33	25,59	25,11
10h30min	36,67	38,00	26,23	25,49
11h00min	37,00	37,67	26,88	26,26
11h30min	41,33	40,00	27,91	27,31
12h00min	43,00	46,33	28,76	28,26

12h30min	44,00	47,33	29,46	28,96
13h00min	43,67	47,33	29,54	29,20
13h30min	43,67	44,33	29,76	29,41
14h00min	40,00	43,33	29,72	29,64
14h30min	37,67	41,67	28,05	27,58
15h00min	35,00	39,67	27,84	27,43
15h30min	33,00	36,33	27,81	26,83
16h00min	30,00	33,33	27,34	26,40

Tabela I.28. Temperatura média da câmara de secagem do coletor solar realizada em intervalos de dez minutos com dados coletado do experimento 5 nos dias 03 e 04/10/2016 com estratégia de controle embarcada.

Horário	Temperatura – 1º dia	Temperatura – 2º dia
09h10min	33	35
09h20min	32	38
09h30min	32	37
09h40min	31	36
09h50min	32	41
10h00min	32	38
10h10min	38	38
10h20min	37	38
10h30min	35	38
10h40min	34	38
10h50min	38	36
11h00min	39	39
11h10min	39	39
11h20min	42	42
11h30min	43	39
11h40min	42	46
11h50min	42	46
12h00min	45	47
12h10min	42	46
12h20min	45	49
12h30min	45	47
12h40min	45	46
12h50min	43	49
13h00min	43	47
13h10min	45	45
13h20min	43	42
13h30min	43	46
13h40min	42	42
13h50min	39	42
14h00min	39	46
14h10min	38	42
14h20min	39	42
14h30min	36	42
14h40min	35	38
14h50min	35	38
15h00min	35	36

15h10min	34	37
15h20min	33	36
15h30min	32	35
15h40min	31	34
15h50min	30	33
16h00min	29	31

Tabela I.29. Intensidade média de irradiação solar medida nos dias 03 e 04 de outubro de 2016 na UFCG em intervalos de trinta minutos.

Experimento solar dias 03 e 04 de outubro		
Horário	W/m ² - 1º dia	W/m ² - 2º dia
09h30min	667,25	646,36
10h00min	501,27	558,51
10h30min	705,70	485,34
11h00min	622,54	427,09
11h30min	880,04	482,46
12h00min	820,60	763,83
12h30min	912,93	860,31
13h00min	829,09	587,76
13h30min	797,87	624,16
14h00min	792,87	614,37
14h30min	613,74	587,15
15h00min	521,42	405,64
15h30min	402,28	347,72
16h00min	255,26	247,25
Média	665,92	545,57

Tabela I.30. Intensidade média de irradiação solar medida nos dias 03 e 04 de outubro de 2016 na UFCG em intervalo de uma hora.

Experimento5	Primeiro dia	Segundo dia 04/10
	03/10	
Horário	Wh/m ² - Média horaria	Wh/m ² - Média horaria
10h00min	584,28	602,43
11h00min	664,12	456,21
12h00min	850,32	623,15
13h00min	871,01	724,04
14h00min	792,87	614,37
15h00min	568,58	496,40
16h00min	328,77	297,49
Somatório da energia recebida nos dias de realização do experimento 5.	4659,95	3814,09
Somatório total da energia recebida durante o experimento 5.	8.474,04 W/m ²	

Tabela I.31. Valores obtidos no experimento realizado nos dias 03 e 04 de outubro de 2016.

Dia	Horário	Tempo (min)	Produto (g)	Massa Seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$	Dados do modelo	Desvio padrão (σ)
03/10/2016 1º dia	09h00min	0	29,3	8,79	0,7000	2,3333	1,0000	1,0000	0,0000
	09h30min	30	28,2	8,79	0,6883	2,2082	0,9379	0,9471	0,0065
	10h00min	60	27,4	8,79	0,6792	2,1172	0,8927	0,8874	0,0038
	10h30min	90	26,5	8,79	0,6683	2,0148	0,8418	0,8274	0,0102
	11h00min	120	25,5	8,79	0,6553	1,9010	0,7853	0,7688	0,0116
	11h30min	150	24,4	8,79	0,6398	1,7759	0,7232	0,7126	0,0075
	12h00min	180	23,2	8,79	0,6211	1,6394	0,6554	0,6591	0,0026
	12h30min	210	22,2	8,79	0,6041	1,5256	0,5989	0,6085	0,0068
	13h00min	240	21,3	8,79	0,5873	1,4232	0,5480	0,5609	0,0091
	13h30min	270	20,4	8,79	0,5691	1,3208	0,4972	0,5162	0,0135
	14h00min	300	19,6	8,79	0,5515	1,2298	0,4520	0,4746	0,0160
	14h30min	330	19,1	8,79	0,5398	1,1729	0,4237	0,4357	0,0085
	15h00min	360	18,7	8,79	0,5299	1,1274	0,4011	0,3997	0,0010
	15h30min	390	18,3	8,79	0,5197	1,0819	0,3785	0,3662	0,0087
	16h00min	420	17,9	8,79	0,5089	1,0364	0,3559	0,3353	0,0146
	04/10/2016 2º dia	09h30min	450	17,3	8,79	0,4829	0,9340	0,3220	0,3066
10h00min		480	16,7	8,79	0,4737	0,8999	0,2881	0,2802	0,0056
10h30min		510	16,0	8,79	0,4506	0,8203	0,2486	0,2559	0,0052
11h00min		540	15,5	8,79	0,4329	0,7634	0,2203	0,2335	0,0094
11h30min		570	15,2	8,79	0,4217	0,7292	0,2034	0,2130	0,0068
12h00min		600	14,6	8,79	0,3979	0,6610	0,1695	0,1941	0,0174
12h30min		630	14,0	8,79	0,3721	0,5927	0,1356	0,1767	0,0291
13h00min		660	13,4	8,79	0,3440	0,5245	0,1017	0,1608	0,0418
13h30min		690	12,9	8,79	0,3186	0,4676	0,0734	0,1463	0,0515
14h00min		720	12,5	8,79	0,2968	0,4221	0,0508	0,1330	0,0581
14h30min		750	12,2	8,79	0,2795	0,3879	0,0339	0,1208	0,0615
15h00min		780	12,0	8,79	0,2675	0,3652	0,0226	0,1097	0,0616
15h30min		810	11,8	8,79	0,2551	0,3424	0,0113	0,0996	0,0624
16h00min		840	11,6	8,79	0,2422	0,3197	0,0000	0,0904	0,0639

Tabela I.32. Distribuição da umidade relativa e temperatura do ar de secagem no secador solar do experimento EXP5, realizado nos dias 03 e 04 de outubro de 2016. Com a média dos valores da umidade relativa do ar de secagem e da temperatura medidas a cada 10 minutos.

Tempo (min)	Umidade Relativa			Temperatura		
	Sensor A	Sensor B	Sensor C	Sensor A	Sensor B	Sensor C
10	55	25	32	30	43	35
20	53	26	33	27	45	38
30	50	28	34	28	43	37
40	42	29	34	31	45	36
50	43	30	36	29	47	41
60	42	22	31	28	43	38
70	41	20	34	28	45	38
80	39	18	29	30	43	38
90	38	19	28	30	46	38
100	38	16	26	30	46	38
110	37	15	26	30	43	36
120	37	15	23	32	46	39
130	37	16	23	30	45	39
140	37	16	22	31	47	42
150	37	16	22	32	45	39
160	38	16	21	35	53	46
170	37	16	22	32	53	46

180	37	16	21	35	55	47
190	37	16	21	34	51	46
200	37	16	21	35	55	49
210	37	16	20	31	54	47
220	37	16	21	32	51	46
230	38	16	20	32	49	46
240	38	16	21	32	51	46
250	38	15	22	32	49	45
260	38	16	21	32	46	42
270	38	16	21	32	51	46
280	38	15	22	31	46	42
290	38	18	24	32	46	42
300	39	16	24	35	51	46
310	39	17	24	30	45	42
320	40	14	23	32	45	42
330	40	15	23	34	46	42
340	41	17	24	29	39	38
350	41	16	24	32	41	38
360	41	17	25	30	38	36
370	42	18	25	31	39	37
380	42	20	26	30	38	36
390	42	21	26	29	38	35
400	42	20	27	30	36	34
410	44	21	27	28	34	33
420	46	20	26	27	33	31
430	55	27	37	28	40	33
440	49	22	34	30	39	32
450	42	17	28	27	38	32
460	49	21	29	29	38	31
470	49	23	30	27	38	32
480	43	16	26	32	41	32
490	38	17	26	34	47	38
500	42	16	25	29	45	37
510	55	16	25	30	42	35
520	48	16	25	30	39	34
530	37	14	23	32	46	38
540	48	15	22	32	47	39
550	49	16	24	32	47	39
560	43	16	25	32	49	42
570	36	14	24	32	49	43

580	42	16	24	33	49	42
590	55	15	24	34	49	42
600	48	15	23	34	53	45
610	38	14	23	32	48	42
620	48	15	24	32	51	45
630	49	14	24	34	53	45
640	43	14	24	34	53	45
650	36	15	24	34	49	43
660	42	15	24	32	47	43
670	55	16	25	35	53	45
680	48	16	25	32	49	43
690	37	16	25	34	49	43
700	48	18	24	32	46	42
710	49	17	24	32	43	39
720	43	18	25	32	42	39
730	36	19	26	32	41	38
740	42	18	25	32	42	39
750	55	19	26	32	38	36
760	48	19	26	30	38	35
770	37	19	26	30	38	35
780	48	21	28	31	38	35
790	49	21	29	30	36	34
800	43	21	29	28	35	33
810	36	24	30	28	34	32
820	42	25	31	27	31	31
830	55	26	32	27	31	30
840	48	22	32	26	29	29

Tabela I.33. Distribuição dos dados elétricos (correntes, tensões e taxa de distorção harmônica) do secador elétrico, medidos durante a realização do experimento de secagem elétrica - experimento EXP6, realizado no dia 17 de janeiro de 2017.

Nº	DATE	TIME	CURRENT IA RMS	CURRENT IB RMS	CURRENT IC RMS	VOLTAGE VAN RMS	VOLTAGE VBN RMS	VOLTAGE VCN	THD GIA	THD GIB	THD GIC	THD GIN	WH3 NET	WH3 NET UC	UH3 DEL	UH3 REC
620	01/17/17	08:46:00	17,92	19,42	18,28	220,19	215,18	218,42	12,88	13,25	14,41	17,03	0,56	0,56	0,59	0
619	01/17/17	08:47:00	12,2	13,73	12,53	222,54	217,18	220,59	7,28	6,19	7,75	19,53	0,88	0,88	0,95	0
618	01/17/17	08:48:00	11,24	12,74	11,38	223,51	218,34	222,24	10,94	8,47	9,19	20,59	0,84	0,84	0,92	0
617	01/17/17	08:49:00	19,04	20,85	19,51	220,71	215,89	218,76	7,09	6,13	7,53	21,44	0,88	0,88	0,95	0
616	01/17/17	08:50:00	17,47	19,32	17,8	221,41	216,25	219,34	6,97	5,56	7,03	19,09	0,96	0,96	0,99	0
615	01/17/17	08:51:00	18,01	19,92	18,44	220,9	215,94	218,74	7,47	6,88	10,66	18,53	0,97	0,97	1,02	0
614	01/17/17	08:52:00	18,83	20,55	19,14	220,52	215,75	219,06	10,47	7,53	10,5	18,75	0,84	0,84	0,91	0
613	01/17/17	08:53:00	2,75	3	2,76	225,1	222,08	223,29	4,88	20,25	4,88	0	0,39	0,39	0,45	0
612	01/17/17	08:54:00	2,78	3,05	2,79	225,28	221,95	223,03	4,84	19,78	4,84	0	0,15	0,15	0,16	0
611	01/17/17	08:55:00	2,81	3,22	2,84	225,47	221,79	223,42	6,41	9,56	5,38	96,13	0,42	0,42	0,49	0
610	01/17/17	08:56:00	0	0,96	0	226,37	223,23	224,39	7,75	13,84	9,59	106	0,43	0,43	0,5	0
609	01/17/17	08:57:00	5,86	7,34	6,06	225,07	220,26	223,82	14,69	9,97	13,53	24,16	0,29	0,29	0,37	0
608	01/17/17	08:58:00	12	13,96	12,54	223,38	218,2	221,79	27,72	20,88	28,47	24,34	0,51	0,51	0,6	0
607	01/17/17	08:59:00	10,58	12,39	10,96	223,87	218,59	222,15	27,69	20,75	29,47	24,28	0,49	0,49	0,58	0
606	01/17/17	09:00:00	8,67	10,17	8,91	224,15	219,4	221,35	22,78	15,78	24,59	23,88	0,54	0,54	0,64	0
605	01/17/17	09:01:00	8,11	9,49	8,28	224,91	219,48	221,67	16,78	11,5	16,72	23,59	0,59	0,59	0,69	0
604	01/17/17	09:02:00	8,09	9,56	8,38	224,28	218,97	223,61	13,47	9,5	12,53	22,56	0,59	0,59	0,69	0
603	01/17/17	09:03:00	8,21	9,49	8,4	224,21	218,57	223,34	9,34	7,72	10,28	22,84	0,61	0,61	0,7	0
602	01/17/17	09:04:00	8,48	10,21	9,34	223,69	218,54	223,32	10,69	7,75	10,13	21,97	0,59	0,59	0,68	0
601	01/17/17	09:05:00	9,18	10,96	9,6	224,2	218,96	222,34	12,78	10,84	10,75	22,97	0,51	0,51	0,6	0

600	01/17/17	09:06:00	4.14	5.27	4.34	224.79	220.31	223.05	19.44	14.97	19.84	15.88	0.47	0.47	0.57	0
599	01/17/17	09:07:00	11.89	12.34	11.61	222.53	219.44	220.02	24.09	40	26.31	0	0.32	0.32	0.41	0
598	01/17/17	09:08:00	11.81	12.42	11.77	222.43	219.26	220.13	0	128.53	0	0	0.22	0.22	0.29	0
597	01/17/17	09:09:00	12.57	14.69	12.82	222.48	217.58	220.92	18.78	17.25	19.28	24.97	0.32	0.32	0.4	0
596	01/17/17	09:10:00	13.13	14.66	13.27	222.21	217.37	220.3	18.25	15.34	19.5	23.69	0.43	0.43	0.52	0
595	01/17/17	09:11:00	8.12	9.6	8.39	222.45	218.51	221.79	14.31	14.38	15.31	23.47	0.59	0.59	0.68	0
594	01/17/17	09:12:00	8.15	9.68	8.2	222.62	218.46	220.73	9.69	9.22	9.34	22.41	0.63	0.63	0.72	0
593	01/17/17	09:13:00	11.28	13.02	11.64	221.62	217.36	220.85	10.06	9.38	12.69	22.31	0.61	0.61	0.69	0
592	01/17/17	09:14:00	12.82	14.8	12.99	220.65	216.62	220.66	14.72	13.31	13.56	22.84	0.51	0.51	0.6	0
591	01/17/17	09:15:00	10.76	11.3	10.85	220.33	218.63	222.28	0	124.19	0	123.88	0.38	0.38	0.48	0
590	01/17/17	09:16:00	10.01	10.56	9.92	220.39	218.47	221.79	19.31	16.5	24	0	0.2	0.2	0.27	0
589	01/17/17	09:17:00	5.3	6.84	5.68	222.65	220.26	223.12	27.22	20.25	27.72	14.38	0.22	0.22	0.3	0
588	01/17/17	09:18:00	7.94	9.57	8.07	222.72	219.82	221.47	29.25	25.94	29.03	24.97	0.48	0.48	0.57	0
587	01/17/17	09:19:00	5.42	7.11	5.66	223.17	220.52	222.95	12.03	10.25	12.59	23	0.45	0.45	0.54	0
586	01/17/17	09:20:00	10.35	11.98	10.62	222.82	218.83	222.82	15.13	11.16	13.91	22.22	0.46	0.46	0.55	0
585	01/17/17	09:21:00	15.14	17.28	15.81	220.69	216.55	220.79	26.22	20.16	26.34	24.91	0.47	0.47	0.56	0
584	01/17/17	09:22:00	9.51	11.17	9.77	223.02	218.86	223.08	35.84	18.44	32.28	25.72	0.44	0.44	0.53	0
583	01/17/17	09:23:00	0	0.54	0	224.4	222.84	226.1	0	0	0	0	0.42	0.42	0.51	0
582	01/17/17	09:24:00	0	3.55	0	224.15	222.69	226.24	7.03	9.56	11.69	98.56	0.22	0.22	0.3	0
581	01/17/17	09:25:00	12.67	14.86	13.47	221.8	217.85	223.43	20.13	16.5	21.5	24.06	0.21	0.21	0.29	0
580	01/17/17	09:26:00	12.28	14.07	12.7	222.54	217.96	222.17	28.91	20.06	28.13	24.53	0.45	0.45	0.54	0
579	01/17/17	09:27:00	13.58	15.41	13.77	222.06	217.76	221.41	27.84	20.03	28.69	24.25	0.45	0.45	0.53	0
578	01/17/17	09:28:00	5.38	7.14	5.73	224.23	220.08	223.27	18.69	16.84	19.78	26.22	0.45	0.45	0.54	0
577	01/17/17	09:29:00	5.29	6.49	5.52	223.76	220.61	223.89	28.25	20.28	28.34	17.59	0.5	0.5	0.59	0
576	01/17/17	09:30:00	14.03	16.52	14.72	221.15	217.22	221.5	22.13	18.31	25.34	24.25	0.46	0.46	0.55	0
575	01/17/17	09:31:00	9.37	9.88	9.28	222.53	220.64	223.1	0	120.25	0	127.06	0.41	0.41	0.5	0
574	01/17/17	09:32:00	0	1.03	0	224.81	222.47	224.59	8.78	16.19	9.25	108.44	0.21	0.21	0.28	0
573	01/17/17	09:33:00	0	2.89	0	226.15	222.5	224.23	7.03	10.25	11.06	101.31	0.19	0.19	0.26	0
572	01/17/17	09:34:00	13.28	15.19	13.63	223.06	217.33	222.04	26.59	19.13	25.41	24.69	0.34	0.34	0.42	0
571	01/17/17	09:35:00	11.27	13.11	11.58	223.83	219.59	222.68	28.34	21.56	28.5	24.34	0.48	0.48	0.57	0
570	01/17/17	09:36:00	5.55	7.09	5.88	223.81	220.64	225.04	12.59	13.84	14.47	24.97	0.45	0.45	0.54	0
569	01/17/17	09:37:00	8.98	10.56	9.62	223.51	220.2	223.17	15.66	9.91	14.47	23.59	0.46	0.46	0.55	0
568	01/17/17	09:38:00	14.94	17.37	15.66	221.04	217.04	220.8	25.34	20.25	27.25	25.03	0.46	0.46	0.55	0
567	01/17/17	09:39:00	7.24	8.58	7.29	223.53	220.13	223.15	12.75	16.41	16.41	26.34	0.43	0.43	0.52	0
566	01/17/17	09:40:00	0	0.55	0	224.35	222.39	223.79	0	0	0	0	0.32	0.32	0.41	0
565	01/17/17	09:41:00	9.33	9.89	9.22	222.3	219.91	222.18	17.09	14.56	20.91	120.53	0.23	0.23	0.31	0
564	01/17/17	09:42:00	12.89	15.01	13.33	221.06	216.35	223.45	24.91	19.22	25.88	24.28	0.19	0.19	0.26	0
563	01/17/17	09:43:00	8.21	9.7	8.55	221.85	218.15	225.04	16.5	13.38	15	25.22	0.48	0.48	0.57	0
562	01/17/17	09:44:00	8.11	9.73	8.63	222.17	219.2	224.67	9.78	9.13	10.09	23.28	0.58	0.58	0.67	0
561	01/17/17	09:45:00	8.21	9.62	8.34	222.57	219.53	221.02	9.09	7.63	9.16	22.53	0.59	0.59	0.68	0
560	01/17/17	09:46:00	5.07	6.46	5.43	221.92	221.27	222.29	27.19	20.94	29.25	15.63	0.48	0.48	0.57	0
559	01/17/17	09:47:00	11.84	13.68	12.25	220.28	217.88	220.93	19.84	18.81	22.34	26.34	0.46	0.46	0.55	0
558	01/17/17	09:48:00	0	1.05	0	221.93	222.79	223.98	14.75	13.72	8	105.56	0.39	0.39	0.48	0
557	01/17/17	09:49:00	0	4.15	0	221.88	222.76	224.62	10.56	9.97	9.13	99.34	0.21	0.21	0.28	0
556	01/17/17	09:50:00	10.42	10.89	10.5	219.15	220.83	223.94	31.06	30.13	20.16	116.75	0.19	0.19	0.26	0
555	01/17/17	09:51:00	10.57	12.58	11.21	219.83	218.75	224.23	28.94	19.94	26.78	24.47	0.32	0.32	0.4	0
554	01/17/17	09:52:00	5.5	6.97	5.91	221.33	220.37	223.77	29.09	21.06	29.34	14.56	0.47	0.47	0.56	0
553	01/17/17	09:53:00	11.42	13.21	11.63	221.05	218.96	221.85	16.56	15.25	15.59	24.22	0.45	0.45	0.54	0
552	01/17/17	09:54:00	13.31	15.28	13.15	221.14	218.51	219.75	28.06	20.66	30.06	25.03	0.46	0.46	0.54	0
551	01/17/17	09:55:00	4.76	6.61	5.04	223.45	220.98	222.16	13.81	12.63	15.5	25.84	0.46	0.46	0.55	0
550	01/17/17	09:56:00	9.48	11.66	10.21	222.38	220.72	221.16	11.06	7.5	11.53	23.84	0.43	0.43	0.52	0
549	01/17/17	09:57:00	10.82	11.44	10.83	220.96	220.97	221.46	0	121.03	0	124.31	0.3	0.3	0.38	0
548	01/17/17	09:58:00	11.42	11.92	11.41	221.15	221	221.59	0	120.5	0	128.06	0.25	0.25	0.33	0
547	01/17/17	09:59:00	0	1.05	0	224.13	224.15	224.4	17.59	25.91	12.84	121.28	0.18	0.18	0.25	0
546	01/17/17	10:00:00	9.38	11.48	10.15	222.33	220.34	222.35	16.13	11.78	17.47	23.69	0.43	0.43	0.51	0
545	01/17/17	10:01:00	14.22	16.6	14.52	220.16	218.74	220.11	28.59	21.25	29.38	25.44	0.45	0.45	0.53	0
544	01/17/17	10:02:00	5.43	7.21	5.8	222.86	221.23	223.44	13.34	13.31	16.38	25.09	0.45	0.45	0.54	0
543	01/17/17	10:03:00	5.27	6.55	5.52	222.89	221.95	222.2	28.38	20.78	28.59	16.59	0.47	0.47	0.56	0
542	01/17/17	10:04:00	14.12	16.5	14.52	219.94	217.67	221.6	21.03	19.13	21.13	26.59	0.48	0.48	0.58	0
541	01/17/17	10:05:00	12.08	12.49	11.88	219.79	219.35	223.13	0	119.5	0	123.09	0.4	0.4	0.5	0
540	01/17/17	10:06:00	5.92	6.15	5.71	223.07	222.25	223.7	18.13	30.84	15.34	120.25	0.21	0.21	0.28	0
539	01/17/17	10:07:00	0	1.07	0	223.84	224.97	221.93	6.94	8.72	6.84	96.72	0.2	0.2	0.27	0
538	01/17/17	10:08:00	12.86	15.21	13.53	220.48	219.48	220.67	22.91	17.63	25.22	23.94	0.28	0.28	0.36	0
537	01/17/17	10:09:00	8.11	9.56	8.6	221.2	221.06	223.95	19.94	15.13	19.41	15.97	0.6	0.6	0.69	0
536	01/17/17	10:10:00	8.26	9.81	8.37	223.74	219.12	222.05	11.22	10.5	12.31	24.94	0.61	0.61	0.7	0
535	01/17/17	10:11:00	11.79	13.83	12.09	223.76	218.34	220.07	16.09	15.16	18.34	22.56	0.5	0.5	0.59	0
534	01/17/17	10:12:00	13.32	15.09	13.61	222.85	217.1	220.9	26.19	20.34	26.75	25.13	0.46	0.46	0.55	0
533	01/17/17	10:13:00	4.02	5.7	4.49	224.08	221.7	225.25	10.81	12.09	9.88	24.72	0.43	0.43	0.52	0
532	01/17/17	10:14:00	0	5.9	0	223.86	223.29	224.71	6.66	9.84	11.34	94.09	0.32	0.32	0.4	0
531	01/17/17	10:15:00	0	0.47	0	224.78	224.75	223.78	0	0	0	0	0.24	0.24	0.32	0
530	01/17/17	10:16:00	6.92	7.26	6.91	224.12	223.31	222.4	0	124.19	0	0	0.19	0.19	0.26	0
529	01/17/17	10:17:00	5.68	7.27	5.85	224.55	220.65	222.23	13.84	9.88	15	22.75	0.41	0.41	0.49	0
528	01/17/17	10:18:00	12.27	14.22	12.56	222.6	218.88	220.99	21.03							

516	01/17/17	10:30:00	4,13	5,53	4,36	223,95	221,08	225,02	12,38	8,63	9,78	22,94	0,43	0,43	0,52	0
.
.
.
66	01/17/17	18:00:00	15,9	17,88	16,58	222,4	219,62	223,2	22,44	18,97	23,56	21,28	0,52	0,52	0,63	0
65	01/17/17	18:01:00	6,32	7,27	6,65	225,46	222,8	226,34	10,59	11,75	12,63	22,78	0,54	0,54	0,66	0
64	01/17/17	18:02:00	9,86	10,14	10,12	223,96	223,1	224,95	14,94	12,13	10,69	0	0,48	0,48	0,6	0
63	01/17/17	18:03:00	8,02	8,38	8,06	224,37	223,65	225,33	7,69	36,03	8,06	0	0,32	0,32	0,41	0
62	01/17/17	18:04:00	1,63	1,93	1,65	225,67	223,94	226,56	6,09	7,69	6,56	98,19	0,3	0,3	0,39	0
61	01/17/17	18:05:00	14,67	15,89	15	222,77	218,81	223,63	28,69	17,66	24,03	21,28	0,33	0,33	0,43	0
60	01/17/17	18:06:00	10,24	11,47	10,57	223,97	220,08	225,04	22,56	18,56	23,31	22,88	0,51	0,51	0,61	0
59	01/17/17	18:07:00	10,14	11,15	10,3	225,79	220,57	224,24	22,06	18,81	23,28	22,25	0,49	0,49	0,6	0
58	01/17/17	18:08:00	7,32	8,1	7,42	226,45	221,33	225,09	12,13	10,19	11,91	21,28	0,5	0,5	0,61	0
57	01/17/17	18:09:00	15,87	17,33	16,04	223,63	218,33	222,42	21,72	16,91	21,16	22,72	0,55	0,55	0,66	0
56	01/17/17	18:10:00	6,13	7	6,21	226,78	221,84	225,44	13,84	8,91	11,63	22,91	0,5	0,5	0,61	0
55	01/17/17	18:11:00	8,95	9,39	8,82	225,91	222,7	224,51	6,5	12,97	11	0	0,37	0,37	0,48	0
54	01/17/17	18:12:00	11,23	11,7	11,39	225,17	221,71	223,58	5,41	37,16	7,69	0	0,29	0,29	0,37	0
53	01/17/17	18:13:00	1,63	1,93	1,63	227,64	224,29	226,21	8,75	14,38	12,25	113,88	0,28	0,28	0,37	0
52	01/17/17	18:14:00	1,65	1,54	1,63	227,81	223,67	226,48	5,78	14,13	7,5	0	0,27	0,27	0,36	0
51	01/17/17	18:15:00	15,75	17,16	15,99	224,47	217,16	223,4	23,09	18,59	23,78	22,75	0,35	0,35	0,45	0
50	01/17/17	18:16:00	7,67	8,37	7,67	226,59	219,57	225,52	18,75	14,84	15,78	22,88	0,51	0,51	0,62	0
49	01/17/17	18:17:00	10,29	11,7	10,99	225,97	219,79	224,64	14,44	11,91	17,38	20,5	0,5	0,5	0,61	0
48	01/17/17	18:18:00	14,05	15,34	14,51	224,77	218,42	223,46	22,34	17,75	22,56	22,53	0,5	0,5	0,61	0
47	01/17/17	18:19:00	6,89	7,69	7,03	226,93	220,52	225,58	14,22	10,94	14,5	22,31	0,52	0,52	0,63	0
46	01/17/17	18:20:00	6,28	6,67	6,42	226,97	220,86	225,76	15,72	13,94	16,88	9,81	0,52	0,52	0,63	0
45	01/17/17	18:21:00	10,07	10,5	10,25	225,84	220,93	223,35	5,78	37,28	5,41	0	0,41	0,41	0,52	0
44	01/17/17	18:22:00	1,65	1,91	1,63	227,88	223,15	226,35	9,41	7	10,13	97,75	0,29	0,29	0,37	0
43	01/17/17	18:23:00	10,41	10,82	10,71	225,9	220,96	224,22	13,91	12,59	19,16	0	0,28	0,28	0,36	0
42	01/17/17	18:24:00	7,76	8,23	8,02	226,88	221,1	225,4	5,28	37,09	7,69	0	0,26	0,26	0,34	0
41	01/17/17	18:25:00	8,01	8,6	7,98	227,1	219,66	225,77	13,28	10,41	11,53	19,88	0,35	0,35	0,45	0
40	01/17/17	18:26:00	7,71	7,94	7,65	227,17	219,95	225,97	22,59	18,66	23,28	8,75	0,54	0,54	0,65	0
39	01/17/17	18:27:00	7,53	8,16	7,5	227,18	220,73	225,85	15,63	14,09	14,31	22,31	0,51	0,51	0,62	0
38	01/17/17	18:28:00	7,46	8,25	7,58	226,99	220,51	225,72	14,28	11,53	11,91	22,03	0,51	0,51	0,62	0
37	01/17/17	18:29:00	16,23	17,85	16,9	224,19	217,69	222,64	21,41	18,41	22,66	22,78	0,52	0,52	0,63	0
36	01/17/17	18:30:00	14,69	16,42	15,19	224,75	218,29	223,4	14,31	14,72	15,84	22,69	0,49	0,49	0,6	0
35	01/17/17	18:31:00	1,67	1,98	1,63	228,11	223,56	226,43	6,09	8,81	8,63	90,66	0,35	0,35	0,44	0
34	01/17/17	18:32:00	12,54	12,59	12,39	225,19	220,13	223,39	7,84	36,06	7,69	0	0,33	0,33	0,42	0
33	01/17/17	18:33:00	10,17	10,51	10,21	226,47	220,41	224,96	5,16	37,41	7,69	0	0,27	0,27	0,36	0
32	01/17/17	18:34:00	1,66	1,91	1,63	228,33	222,53	226,89	6,28	7,28	6,63	100,97	0,25	0,25	0,34	0
31	01/17/17	18:35:00	15,28	16,67	15,8	225,11	217,49	223,63	22,38	18,47	23,31	22,09	0,44	0,44	0,54	0
30	01/17/17	18:36:00	14,67	15,9	14,99	225,28	218,74	223,58	22,56	18,75	23,44	21,69	0,51	0,51	0,62	0
29	01/17/17	18:37:00	7,19	7,72	7,36	227,12	221,09	225,68	21,5	18,41	23,06	9,5	0,51	0,51	0,62	0
28	01/17/17	18:38:00	8,23	9,26	8,37	226,95	220,39	225,49	13,06	10,72	13,38	19,97	0,54	0,54	0,65	0
27	01/17/17	18:39:00	14,94	16,5	15,6	224,88	218,18	223,24	20,78	18,56	22,5	21,94	0,52	0,52	0,63	0
26	01/17/17	18:40:00	5,82	6,54	5,87	227,37	220,86	226,09	11,34	8,06	7,94	22,28	0,48	0,48	0,59	0
25	01/17/17	18:41:00	11,89	12,15	11,9	225,53	220,51	223,94	22,03	15,13	17,44	0	0,29	0,29	0,38	0
24	01/17/17	18:42:00	7,78	8	7,68	227,01	222,21	225,4	46,19	54,63	23,28	0	0,29	0,29	0,37	0
23	01/17/17	18:43:00	1,65	1,54	1,63	227,88	223,6	226,34	7,84	12,84	7,69	0	0,3	0,3	0,39	0
22	01/17/17	18:44:00	10,24	10,38	10,04	226,16	220,3	224,73	18,91	23,25	14,75	0	0,27	0,27	0,36	0
21	01/17/17	18:45:00	11,62	12,59	12,04	226,17	218,37	224,67	22,03	18,84	23,47	23,03	0,48	0,48	0,59	0
20	01/17/17	18:46:00	7,55	8,1	7,53	227,08	219,45	225,58	11,72	11,38	12,16	20,25	0,51	0,51	0,61	0
19	01/17/17	18:47:00	14,27	15,86	15,05	223,31	218,83	223,99	20,34	16,25	22,34	21,41	0,5	0,5	0,61	0
18	01/17/17	18:48:00	11,67	12,85	12,11	224,02	219,84	224,41	21,78	18,19	22,56	22,28	0,52	0,52	0,62	0
17	01/17/17	18:49:00	6,84	7,29	6,88	225,36	221,88	226,07	20,97	16,34	20,88	9,06	0,55	0,55	0,66	0
16	01/17/17	18:50:00	13,99	15,79	14,67	223,15	219,02	223,89	12,56	13,75	14,22	22,44	0,48	0,48	0,6	0
15	01/17/17	18:51:00	10,31	10,58	10,42	224,11	222,1	224,72	8,06	36,34	7,5	0	0,29	0,29	0,37	0
14	01/17/17	18:52:00	1,65	1,94	1,68	226,16	224,1	226,76	4,69	7,59	4,47	94,22	0,28	0,28	0,37	0
13	01/17/17	18:53:00	11,46	11,85	11,73	223,81	221,54	224,03	8,06	36,84	7,5	0	0,27	0,27	0,36	0
12	01/17/17	18:54:00	7,27	8,16	7,34	225,43	220,85	226,08	14,56	13,03	12,53	24,16	0,28	0,28	0,37	0
11	01/17/17	18:55:00	7,53	8,38	7,74	225,25	220,67	226,11	16,22	13,25	12,88	22,59	0,55	0,55	0,66	0
10	01/17/17	18:56:00	14,52	15,98	15,16	223,18	218,29	224,04	25,97	17,28	23,09	21,72	0,51	0,51	0,61	0
9	01/17/17	18:57:00	10,59	11,7	11	224,48	220,9	225,16	22,84	17,75	22,84	23,53	0,51	0,51	0,62	0
8	01/17/17	18:58:00	7,38	8,68	7,97	225,24	221,61	225,95	10,56	11,19	11,97	19,97	0,53	0,53	0,63	0
7	01/17/17	18:59:00	15,65	17,47	16,38	222,35	218,73	223,11	16,44	16,22	17,56	22,53	0,51	0,51	0,62	0
6	01/17/17	19:00:00	1,62	1,55	1,65	225,8	224,69	226,56	8,06	13,75	7,5	0	0,41	0,41	0,51	0
5	01/17/17	19:01:00	5,2	5,72	5,51	225,47	223,8	226,15	6,81	9,59	10,06	97	0,32	0,32	0,41	0
4	01/17/17	19:02:00	0	0,24	0	29,08	224,76	226,75	0	0	0	0	0,23	0,23	0,3	0
3	01/17/17	19:35:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	01/17/17	19:36:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	01/17/17	19:37:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela I.34 Temperatura do processo de secagem elétrica e temperatura ambiente no dia 17 de janeiro de 2017 (EXP6)

Horário	T. Secador Elétrico em °C	Temperatura Ambiente em °C
09h30min	55,13	25,64
10h00min	55,04	26,28
10h30min	54,96	26,72
11h00min	55,07	27,94

11h30min	55,01	28,76
12h00min	53,56	28,99
13h00min	55,92	29,57
13h30min	56,18	29,60
14h00min	55,01	29,47
14h30min	55,18	29,47
15h00min	55,89	29,50
15h30min	54,94	29,27
16h00min	54,94	29,28
16h30min	54,98	28,40
17h00min	55,01	27,65
17h30min	56,69	27,27
18h00min	55,06	26,80
18h30min	56,39	26,16
19h00min	54,95	25,37

Tabela I.35. Valores obtidos no experimento realizado no dia 17 de janeiro de 2017.

Dia	Horário	Tempo (min)	Produto (g)	Massa Seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$	Dados do modelo	Desvio padrão (σ)
17/02/2017 Secagem Elétrica	09h30min	0	34	10	0,7059	2,4	1	1,0000	0,0000
	10h00min	30	29,3	10	0,6587	1,93	0,7793	0,8267	0,03353
	10h30min	60	26,8	10	0,6269	1,68	0,6620	0,6892	0,01923
	11h00min	90	24,9	10	0,5984	1,49	0,5728	0,5763	0,00246
	11h30min	120	23,1	10	0,5671	1,31	0,4883	0,4828	0,00388
	12h00min	150	21,8	10	0,5413	1,18	0,4272	0,4051	0,01565
	12h30min	180	20,4	10	0,5098	1,04	0,3615	0,3402	0,01504
	13h00min	210	19,3	10	0,4819	0,93	0,3099	0,2860	0,01687
	13h30min	240	18,2	10	0,4505	0,82	0,2582	0,2407	0,01240
	14h00min	270	17,4	10	0,4253	0,74	0,2207	0,2026	0,01278
	14h30min	300	16,6	10	0,3976	0,66	0,1831	0,1707	0,00876
	15h00min	330	15,9	10	0,3711	0,59	0,1502	0,1439	0,00445
	15h30min	360	15,3	10	0,3464	0,53	0,1221	0,1214	0,00052
	16h00min	390	14,6	10	0,3151	0,46	0,0892	0,1024	0,00933
	16h30min	420	14,2	10	0,2958	0,42	0,0704	0,0864	0,01134
	17h00min	450	13,8	10	0,2754	0,38	0,0516	0,0730	0,01512
	17h30min	480	13,4	10	0,2537	0,34	0,0329	0,0617	0,02033
	18h00min	510	13,2	10	0,2424	0,32	0,0235	0,0521	0,02022
	18h30min	540	13	10	0,2308	0,3	0,0141	0,0440	0,02117
19h00min	570	12,7	10	0,2126	0,27	0	0,0372	0,02633	

Tabela I.36. Valores médios de potência do experimento realizado no dia 17 de janeiro de 2017

Horário	kVA	kW	kVAr
09h00min	7,39	6,14	4,12
09h15min	6,83	5,67	3,81
09h30min	6,06	5,03	3,38
09h45min	5,58	4,63	3,11
10h00min	5,45	4,53	3,04
10h15min	5,54	4,6	3,09
10h30min	5,4	4,48	3,01
10h45min	5,58	4,63	3,11
11h00min	4,7	3,9	2,62
11h15min	5,34	4,43	2,98
11h30min	5,76	4,78	3,22
11h45min	5,27	4,37	2,94
12h00min	7,99	6,63	4,46

12h15min	7,07	5,87	3,95
12h30min	5,47	4,54	3,05
12h45min	6,33	5,25	3,53
13h00min	7,07	5,87	3,95
13h15min	6,33	5,25	3,53
13h30min	6,61	5,49	3,69
13h45min	6,66	5,53	3,72
14h00min	5,21	4,33	2,91
14h15min	5,89	4,89	3,29
14h30min	6,77	5,62	3,77
14h45min	5,7	4,73	3,18
15h00min	6,37	5,29	3,56
15h15min	6,02	5	3,36
15h30min	5,97	4,96	3,33
15h45min	6,18	5,13	3,45
16h00min	5,31	4,41	2,96
16h15min	5,98	4,96	3,34
16h30min	5,55	4,6	3,09
16h45min	5,17	4,29	2,88
17h00min	5,61	4,91	3,3
17h15min	6,66	5,52	3,71
17h30min	6,48	5,38	3,61
17h45min	6,27	5,2	3,5
18h00min	6,85	5,69	3,82
18h15min	5,97	4,95	3,33
18h30min	6,33	5,25	3,53
18h45min	6,2	5,15	3,46
19h00min	6,62	5,5	3,69

Tabela I.37. Valores de potência referente ao perfil de carga instantâneo do secador elétrico no período de uma hora e 15 minutos.

08h46min:00	10,06
08h47min:00	7,02
08h48min:00	6,49
08h49min:00	10,77
08h50min:00	9,92
08h51min:00	10,22
08h52min:00	10,61
08h53min:00	1,58
08h54min:00	1,60
08h55min:00	1,65
08h56min:00	0,18
08h57min:00	3,56
08h58min:00	7,06
08h59min:00	6,23
09h00min:00	5,10

09h01min:00	4,77
09h02min:00	4,80
09h03min:00	4,81
09h04min:00	5,16
09h05min:00	5,47
09h06min:00	2,54
09h07min:00	6,56
09h08min:00	6,59
09h09min:00	7,32
09h10min:00	7,49
09h11min:00	4,78
09h12min:00	4,76
09h13min:00	6,56
09h14min:00	7,39
09h15min:00	6,02
09h16min:00	5,57
09h17min:00	3,28
09h18min:00	4,70
09h19min:00	3,35
09h20min:00	6,05
09h21min:00	8,78
09h22min:00	5,60
09h23min:00	0,10
09h24min:00	0,66
09h25min:00	7,52
09h26min:00	7,16
09h27min:00	7,82
09h28min:00	3,37
09h29min:00	3,20
09h30min:00	8,26
09h31min:00	5,26
09h32min:00	0,19
09h33min:00	0,53
09h34min:00	7,71
09h35min:00	6,62
09h36min:00	3,43
09h37min:00	5,38
09h38min:00	8,74
09h39min:00	4,26
09h40min:00	0,10
09h41min:00	5,23
09h42min:00	7,53
09h43min:00	4,87
09h44min:00	4,88
09h45min:00	4,80
09h46min:00	3,12

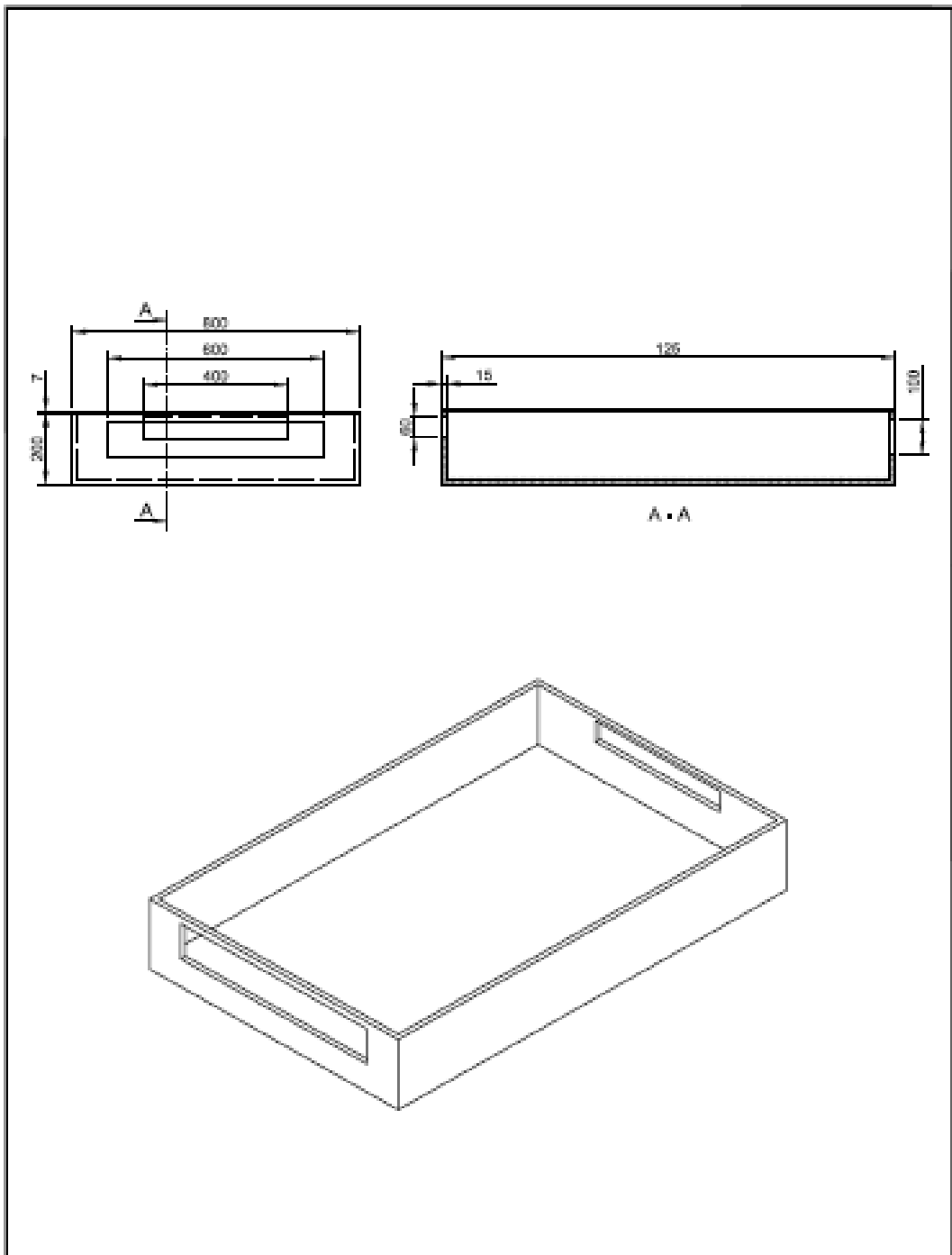
09h47min:00	6,88
09h48min:00	0,19
09h49min:00	0,77
09h50min:00	5,84
09h51min:00	6,30
09h52min:00	3,38
09h53min:00	6,64
09h54min:00	7,61
09h55min:00	3,02
09h56min:00	5,76
09h57min:00	6,07
09h58min:00	6,38
09h59min:00	0,20
10h00min:00	5,70

Tabela I.38. Consumo de energia registrado durante a realização do experimento 6 (EXP 6).

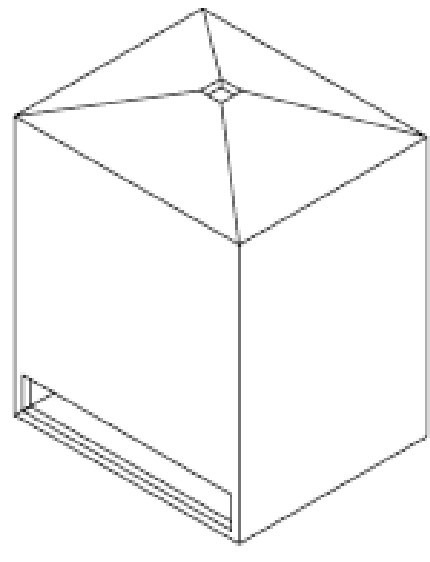
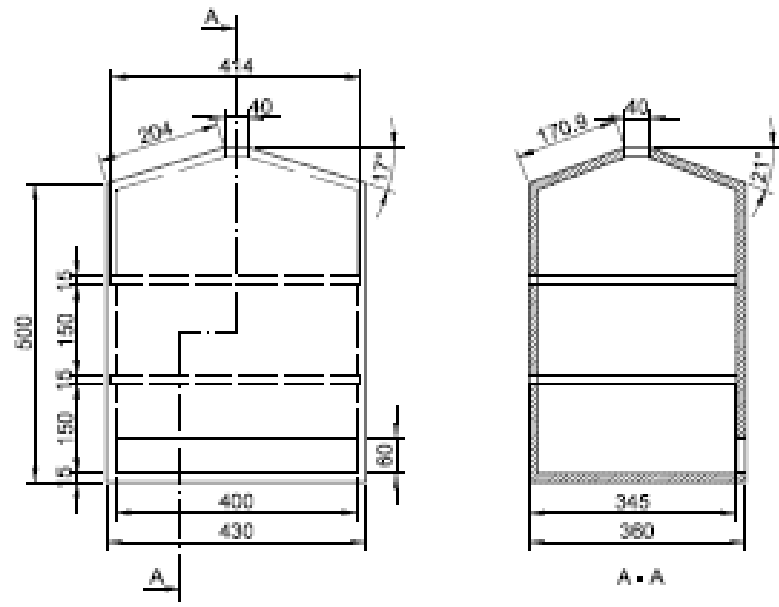
Horário	kVAh	kWh	kVArh
08h45min às 09h30min	5,07	4,2	2,84
09h30min às 10h30min	5,61	4,7	3,06
10h30min às 11h30min	5,35	4,27	3,22
11h30min às 12h30min	6,41	5,96	2,36
12h30min às 13h30min	6,56	5,73	3,19
13h30min às 14h30min	6,11	5,1	3,36
14h30min às 15h30min	6,14	4,55	4,12
15h30min às 16h30min	5,61	4,68	3,09
16h30min às 17h30min	6,12	4,93	3,63
17h30min às 18h30min	6,27	4,94	3,86
18h30min às 19h00min	3,36	2,42	2,33
Consumo total de energia	62,61	51,34	35,84


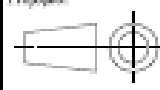
APÊNDICE II

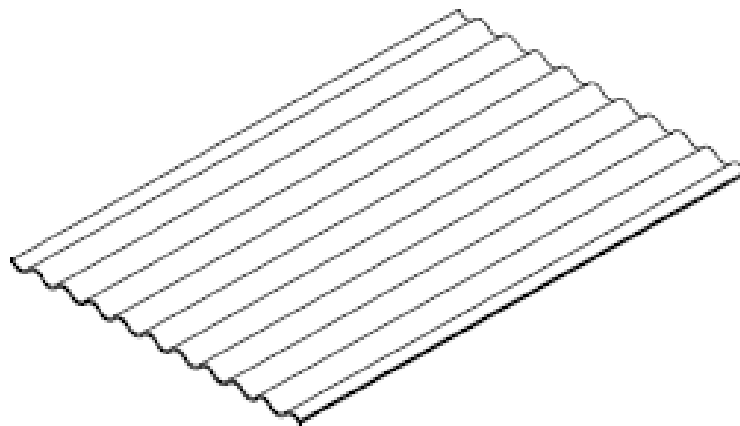
Projeto do secador solar utilizado na pesquisa.


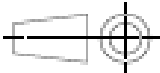


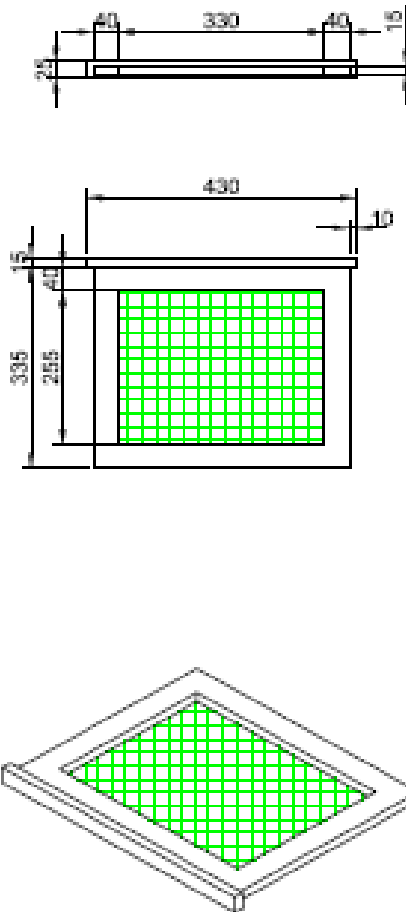
01	01	Ultra MDF		Colado/Parafusado
Item	Quantidade	Material		Fabricação
	Preço:	Coletor Solar		Marcado: 011301.1303-5
	Desenhado:	Antonio Gomes Nunes		Preços: 1
Escala: 1:15	Orientador:	Dr. Marcelo Bezerra Grilo		Projeto: 
		Unidade:	mm	



02	01	Ultra MDF	Colado/Parafusado
Item	Quantidade	Material	Fabricação
	Peça:	Câmara de Secagem	Marcado: 011301.1303-5
	Desenhado:	Antonio Gomes Nunes	Folha: 2
Escala: 1:10	Orientador:	Dr. Marcelo Bezerra Grilo	Projeto: 
		Unidade: mm	



04	01	Cimento Reforçado de Fio Sintético	-----
Item	Quantidade	Material	Fabricação
	Peça: Telha Brasilite	Marca/loja: 011301.1303-5	UFPG - CCT
	Desenhado: Antonio Gomes Nunes	Freqüência: 4	Projeto: 
Escala: 1:10	Orientador: Dr. Marcelo Bezerra Grilo	Unidade: mm	



03	02	Ultra MDF	Colado/Panfusoado
Item	Quantidade	Material	Fabricação
	Preço: Bandeija	Marca/loco: 011301.1303-5	UFPG - CCT
	Dimensionado: Antonio Gomes Nunes	Quantidade: 3	Projeto: 
Escala: 1:10	Orientado: Dr. Marcelo Bezerra Grilo	Unidade: mm	