

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

**Secador Contínuo Tipo Esteira e de Fluxos
Cruzados: Aperfeiçoamento e
Experimentação da Secagem de Semente da
Mamona**

Autor: Francisco De Assis Brasileiro Filho

Orientador: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Campina Grande-PB
Agosto de 2019

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

**Secador Contínuo Tipo Esteira e de Fluxos
Cruzados: Aperfeiçoamento e
Experimentação da Secagem da Semente da
Mamona**

Autor: Francisco De Assis Brasileiro Filho

Orientador: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Curso: Engenharia de Processos

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos

Tese de doutorado apresentada ao programa de pós-Graduação Engenharia de Processos, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.

Campina Grande-PB
Agosto de 2019

B823s

Brasileiro Filho, Francisco de Assis.

Secador contínuo tipo esteira e de fluxos cruzados: aperfeiçoamento e experimentação da secagem da semente da mamona / Francisco de Assis Brasileiro Filho. – Campina Grande, 2019.

195 f.: il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima".

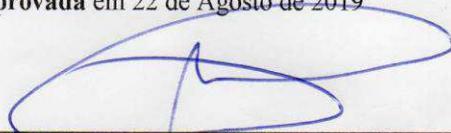
Referências.

1. Secagem. 2. Cinética. 3. Módulo. 4. Semente de Mamona. 5. Velocidades (Ar e Esteiras) e Temperaturas. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Título.

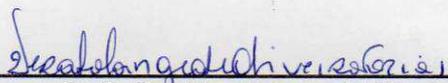
CDU 66.047(043)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE
FRANCISCO DEASSIS BRASILEIRO FILHO APRESENTADA AO PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA
GRANDE

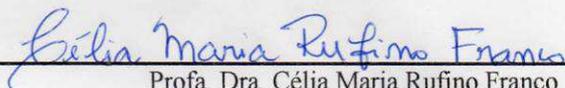
Tese de doutorado **aprovada** em 22 de Agosto de 2019



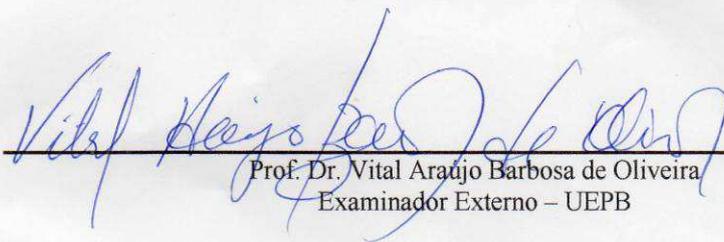
Prof. Dr. António Gilson Barbosa de Lima
Orientador – UAEM/CCT/UFCG



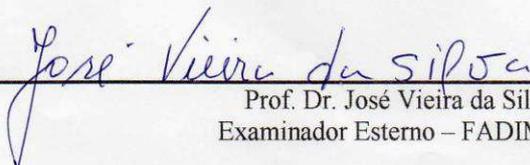
Profa. Dra. Vera Solange de Oliveira Farias
Examinadora Externa – UAFM/CES/UFCG



Profa. Dra. Célia Maria Rufino Franco
Examinadora Externa – UAFM/CES/UFCG



Prof. Dr. Vital Araújo Barbosa de Oliveira
Examinador Externo – UEPB



Prof. Dr. José Vieira da Silva
Examinador Externo – FADIMAR

Campina Grande – PB, Agosto de 2019.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus pela força dada, à minha esposa Maria de Lourdes Lopes Brasileiro, a meus filhos: Rachel, Rodrigo, Ramon, Candice, Thyago e Hayanne Lopes Brasileiro.

AGRADECIMENTOS

Um agradecimento especial ao meu orientador Professor Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima pela paciência, pela atenção e pela dedicação a mim dispensadas quanto ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, Prof. Dr. Vital Barbosa de Oliveira, Profa. Dra. Célia Maria Rufino Franco, Profa. Dra. Vera Solange de Oliveira Farias, Prof. Dr. José Vieira da Silva, Dr. Prof. Yoge Jerônimo, Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo, aos Professores, Dr. Welington Sousa Lima, Prof. Dr. Antonio Gomes Nunes, Dr. Pedro Ronaldo de Holanda, Prof., Prof. Dr. Juscelino de Farias Maribondo, Dr. Prof. Tony Herbert, Eng. Paulo Germano Pinto, Roberto Lucena, Francisco Candido, Flavio e toda turma da oficina mecânica nas pessoas de: Mario, Anchieta e Fernando pela ajuda prestada na montagem e na confecção de peças para o secador de fluxos cruzados.

Um agradecimento especial à minha esposa, Maria de Lourdes L. Brasileiro, pelo apoio incondicional e o incentivo constante, que me proporcionou o encorajamento necessário para a realização deste trabalho.

À UFCG, na pessoa do Magnífico Reitor Professor Dr. Vicemario Simões pela ajuda financeira na compra das resistências elétricas.

*Dá instrução ao sábio,
e ele se fará mais sábio;
ensina o justo e ele aumentará
em entendimento.*

Provérbios 9.9

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	26
1.1 Objetivo geral	29
1.2 Objetivos específicos	30
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1 Mamona ou carrapateira	31
2.1.1 Aspectos gerais	31
2.1.2 Origem da mamona	33
2.1.3 Descrições botânica, morfológica e fisiológica da mamoeira	33
2.1.4 Variedades mais produtivas da mamona	36
2.1.5 Época de plantio da mamona	38
2.1.6 Aspectos gerais da produção de mamona	39
2.1.6.1 Mercado nacional	39
2.1.6.2 Mercado internacional da mamona	41
2.2 A secagem	43
2.2.1 Fundamentos	43
2.2.2 Curvas de secagem	50
2.2.3 Fundamentos da migração de umidade em produtos agrícolas	52

2.2.4	Processos de adsorção e dessorção	53
2.2.4.1	Taxa de secagem em regime constante	53
2.2.4.2	Período de taxa de secagem decrescente	54
2.3	Secadores	56
2.3.1	Tipos de secadores	56
2.3.1.1	Secadores em leito fixo	56
2.3.1.2	Secagem em fluxo concorrente	57
2.3.1.3	Secador de fluxo contra concorrente	57
2.3.1.4	Secador de fluxo cruzado	57
2.3.2	Eficiência energética da secagem e dos secadores	58
2.3.3	Fontes de energia	63
	METODOLOGIA	64
3.1	Sementes de mamona material utilizado no experimento	64
3.2	Procedimento experimentais para secagem das sementes	66
3.2.1	Secagem da semente de mamona em estufa	66
3.2.2	Secagem da semente de mamona BRS 188 Paraguaçu em secador de esteira e fluxos cruzados	69
13.3	Procedimentos teóricos	71
3.3.1	Parâmetros gravimétricos	71
3.3.1.1	Massa de água total perdida	71
3.3.1.2	Teor de umidade em base úmida	72
3.3.1.3	Teor de umidade em base seca	72
3.3.1.4	Teor de umidade adimensional	72
3.3.2	Parâmetros energéticos	73
3.3.2.1	Temperatura adimensional	73
3.3.3	Parâmetros geométricos	73

3.3.3.1 Diâmetro geométrico	73
3.3.3.2 Esfericidade	74
3.3.3.3 Volume	74
3.3.3.4 Área superficial	74
3.3.3.5 Índice de contração volumétrica	75
3.4 Secador de esteira e fluxos cruzados utilizado na secagem da semente de mamona	75
3.4.1 Aspectos construtivos e funcionamento do secador	75
3.4.1.1 Base de sustentação do secador	76
3.4.1.2 Estrutura metálica	77
3.4.1.3 Confecção do chassi da esteira transportadora do secador de fluxo cruzado	78
3.4.1.4 Esteira transportadora	80
3.4.1.5 Sistema motriz das esteiras	82
3.4.1.6 Aquecedores elétrico	86
3.4.1.7 Sistema de insuflamento e exaustão de ar	89
3.4.2 Parâmetro técnico do secador	93
3.4.2.1 Cálculo do sistema de transmissão	93
3.4.2.2 Medição do consumo de energia elétrica	97
RESULTADOS E DISCUSSÕES	101
4.1 Secagem da semente de mamona em estufa	101
4.1.1 Cinética de secagem da semente de mamona	101
4.1.2 Cinética de aquecimento da semente de mamona	106
4.1.3 Dados geométricos da semente de mamona para secagem em estufa	114
4.2 Secagem da semente de mamona em secador de esteira	116
4.2.1 Cinética da secagem da semente de mamona para secagem em estufa	116
4.2.2 Cinética de aquecimento da semente de mamona	121

4.2.3 Dados geométricos da semente de mamona para secagem em secador com esteira estática	125
4.2.4 Comparação entre a secagem em estufa e secador de esteira	126
4.3 Características do secador de esteira e fluxos cruzados	131
4.3.1 Sistema de transmissão e velocidade da esteira	131
4.3.2 Sistema de aquecimento e controle da temperatura do ar de secagem.	133
4.3.3 Sistema de insuflamento e controle da velocidade do ar de secagem	136
4.3.4 Espaço Físico do secador de fluxo cruzado	138
4.3.5. Manutenção, operação e transporte do secador de fluxo cruzado	138
4.3.6 Aspectos financeiros do secador em estudo	138
4.3.6.1 Custo inicial de investimento e de manutenção	138
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	140
5.1 Conclusões	140
5.1.1 Quanto a secagem da semente de mamona em estufa	140
5.1.2 Quanto a secagem da semente de mamona no secador de fluxo cruzado	141
5.1.3 Quanto ao secador desenvolvido	141
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	142
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144
Apêndice A - Dados da secagem de semente de mamona em estufa	156
Apêndice B - Dados de sementes de mamona em secador com esteira estática	163
Apêndice C - Dados de secagem de semente de mamona em secador com esteira em movimento	170
Apêndice D - Condições do ar de secagem dentro e fora do equipamento	176
Apêndice E - Dados geométricos da semente de mamona antes e após a secagem	179
Apêndice F - Cálculo da vazão volumétrica e velocidade do ar no interior do Módulo de secagem	186
ANEXOS	190

RESUMO

BRASILEIRO FILHO, Francisco De Assis. Secador contínuo tipo esteira e de fluxos cruzados: Aperfeiçoamento e experimentação de secagem de semente de mamona. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2017, 208 p. Tese (Doutorado).

Este trabalho tem como objetivo estudar experimentalmente a secagem de sólidos úmidos em secador contínuo tipo esteira e de fluxos cruzados, com particular referência à secagem de sementes de mamona. Realizou-se o aperfeiçoamento de um protótipo de secador desenvolvido, relacionados ao sistema de transmissão (velocidade e tipo de esteira), sistema de insuflação do ar (velocidade do ar), e sistema de aquecimento (temperatura do ar). Realizaram-se testes de secagem das sementes de mamona em estufa e secador contínuo, em diferentes condições de secagem. Verificou-se que o teor de água do produto, no processo de secagem depende fortemente da temperatura e da velocidade do ar de secagem e da velocidade das esteiras. Os resultados obtidos através do desempenho do secador de fluxo contínuo foram considerados ótimos: velocidade da esteira menor que 0,001 m/s, temperatura do ar de secagem mínima de 40°C e máxima de 110°C para cada câmara, consumo de energia de 17,5 kWh e velocidade do ar de 0,56 m/s em cada módulo. O protótipo desenvolvido é versátil e de baixo custo de construção, é totalmente desmontável, tem boa mobilidade e total controle da temperatura e da velocidade do ar no interior das câmaras e da velocidade das esteiras por meio de sistemas eletrônicos.

Palavras Chave:

Cinética, módulo, secagem, semente de mamona, velocidades (ar, esteiras) e temperaturas.

ABSTRACT

BRASILEIRO FILHO, Francisco DeAssis. Continuous and cross flow belt conveyor dryer: Improvement and experimentation of castor bean drying. Post-Graduation in Process Engineering, Federal University of Campina Grande, 2019. 208 p. Thesis (Doctorate)

The objective of this work is study the drying of wet solids in a continuous and cross flow belt conveyor dryer; with particular reference to the drying of castor seeds. The improvement of the device was carried out in a developed prototype, related to the transmission systems, air blowing system, and heating system. Were carried out experiments of castor bean drying in over and dryer at different drying conditions. Was verified that the water content of the product in the drying process depends heavily on the temperature and velocity of the drying air, and on the speed of the belt conveyor. The results obtained through the performance of the continuous flow dryer has been considered optimum: belt conveyor speed less than 0.001 m/s, minimum drying air temperature of 40°C and maximum of 110°C for each chamber, energy consumption 17.5 kWh and air velocity 0.56 m/s, in each module. The prototype developed is versatile and low cost to construct, totally detachable, has good mobility, and total control of the air temperature, and velocity inside the chambers, and speed of the, by means of electronic systems.

Key Words:

Kinetics, module, drying, castor seed, velocities (air, mats) and temperatures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Pé de mamona com frutos	32
Figura 2.2 Folhas e frutos de mamona	32
Figura 2.3 Tipos de sementes da mamona	34
Figura 2.4 Tipos de sementes da mamona	34
Figura 2.5 Frutos da mamona.	35
Figura 2.6 Carrapateira ou mamona	35
Figura 2.7 Esquema ilustrativo do aspecto geral da planta de mamona	36
Figura 2.8 Sub-especies da mamona	38
Figura 2.9 Padrão das sementes sendo: (A) Cor única, (B) Pintadas, (C) Rajadas, (D) Pontudas	38
Figura 2.10 Área colhida, produção e produtividade da mamona no Brasil, no período de 2004 a 2017	40
Figura 2.11 Participação relativa percentual da mamona por estado brasileiro	40
Figura 2.12 Participação relativa da produção da mamona por estado brasileiro	41
Figura 2.13 Mapa de produção de mamona no Brasil	42
Figura 2.14 Principais produtores mundiais de mamona	42
Figura 2.15 Curva de secagem típica	50
Figura 3.1 Pés de mamoeira do tipo BRS Paraguaçu em estágio inicial de Crescimento	65

Figura 3.2 Plantio de mamona em fase jovem	65
Figura 3.3 Frutos de mamona em fase adulta com frutos	65
Figura 3.4 Sementes do tipo BRS Paraguaçu, no interior do cesto	66
Figura 3.5 A cachopa (frutos da mamona)	66
Figura 3.6 Sementes de mamona	67
Figura 3.7 Sementes de mamona variedade: BRS Paraguaçu	67
Figura 3.8 Amostra no interior da estufa	68
Figura 3.9 Amostra no interior do cesto sendo pesada na balança digital	68
Figura 3.10 Paquímetro digital usado nos experimentos	68
Figura 3.11 Termômetro de infravermelho usado nos experimentos	69
Figura 3.12 Semente de mamona no interior do secador de fluxos cruzado	70
Figura 3.13 Secador de esteiras e fluxos cruzados	71
Figura 3.14 Sementes de mamona após trajeto percorrido no secador de fluxos cruzados	71
Figura 3.15 Desenho esquemático da semente de mamona, considerando-o como um esferoide triaxial, com todas suas dimensões características	74
Figura 3.16 Etapas de montagem do secador	76
Figura 3.17 Esquema do secador de grãos de fluxo cruzado	76
Figura 3.18 Base de apoio do secador com seis rodízios	77
Figura 3.19 Cantoneiras em U e L, usada na construção do secador.	77
Figura 3.20 Módulo do secador com grade da esteira	78
Figura 3.21 Vista frontal do secador	78
Figura 3.22 Chassi da esteira transportadora	79
Figura 3.23 Rolo trator (a) e rolo de apoio secundário (b) com cubos de bicicleta	79
Figura 3.24 Cubo de bicicleta dianteiro e traseiro usado nos rolos	79
Figura 3.25 Parte frontal do secador de fluxos cruzado	80

Figura 3.26 Vista geral do módulo C	80
Figura 3.27 Tipos de malha para esteira	81
Figura 3.28 Confecção e montagem da malha da esteira com malha de 3 mm	81
Figura 3.29 Esteira com malha de 14 mm de diâmetro de aço carbono galvanizado	82
Figura 3.30 Solenoide usado para mover cada conjunto de esteira	83
Figura 3.31 Inversor de frequência que comanda a rotação do motor	83
Figura 3.32 Motor industrial acoplado ao redutor de velocidade	84
Figura 3.33 Redutor de velocidade de 1/3000 rpm	84
Figura 3.34 Motor com redutor de velocidade interligando todo sistema de transmissão	85
Figura 3.35 Sistema de transmissão (coroa e corrente de moto) que interliga todos os rolos trator	85
Figura 3.36 Testes com resistência blindada e comum	86
Figura 3.37 Resistência blindada	86
Figura 3.38 Tipo de resistência de forno elétrico	87
Figura 3.39 Teste de resistência para o módulo C	87
Figura 3.40 Resistência em fase de teste	87
Figura 3.41 Montagem das resistências do módulo C	88
Figura 3.42 Montagem do conjunto de resistência do módulo A	89
Figura 3.43 Montagem do conjunto de resistência do módulo B	89
Figura 3.44 Ventilador turbo-axial A400	90
Figura 3.45 Esquema de ligação do ventilador	91
Figura 3.46 Duto cilíndrico onde estão alojadas o conjunto de resistências e exaustores	91
Figura 3.47 Vista dos ventiladores com o grupo de resistências dentro do duto	91
Figura 3.48 Vista interna do duto mostrando a curvatura.	92
Figura 3.49 Vista externa da curvatura final do duto	92

Figura 3.50 Vista externa do duto	92
Figura 3.51 Mecanismo do sistema de tração das esteiras do secador de fluxos cruzados	95
Figura 3.52 Aparelho SEL – 735 usado para medir a qualidade e consumo de energia	98
Figura 3.53 Conector trifásico	98
Figura 3.54 Disjuntor trifásico	99
Figura 3.55 Dimmer de acionamento dos ventiladores	99
Figura 3.56 A placa Arduino.uno	100
Figura 3.57 Inversor de velocidade	100
Figura 4.1 Curva de variação do teor médio da umidade (base seca) das sementes de mamona em função do tempo de secagem (T=40°C, em estufa)	102
Figura 4.2 Curva de variação do teor médio da umidade (base seca) das sementes de mamona em função do tempo de secagem (T=50°C, em estufa)	103
Figura 4.3 Curva de variação do teor médio da umidade (base seca) das sementes de mamona em função do tempo de secagem (T=60°C, em estufa)	103
Figura 4.4 Curva de variação do teor médio da umidade (base seca) das sementes de mamona em função do tempo de secagem (T=70°C, em estufa)	104
Figura 4.5 Curva de variação do teor médio da umidade (base seca) das sementes de mamona em função do tempo de secagem (T=80°C, em estufa)	105
Figura 4.6 Curva de variação do teor médio da umidade (base seca) das sementes de mamona em função do tempo de secagem (T=90°C, em estufa)	105
Figura 4.7 Curva de variação do teor de umidade adimensional das sementes de mamona em função do tempo de secagem (T= 40, 50, 60, 70, 80 e 90°C, secagem em estufa)	106
Figura 4.8 Curva de temperatura superficial da semente de mamona em função do tempo para a temperatura do ar de secagem (T = 40°C, secagem em estufa)	107
Figura 4.9 Curva de temperatura superficial da semente de mamona em função do tempo para a temperatura do ar de secagem (T = 50°C, secagem em estufa)	107
Figura 4.10 Curva de temperatura superficial da semente de mamona em	

função do tempo para a temperatura do ar de secagem ($T = 60^{\circ}\text{C}$, secagem em estufa)	108
Figura 4.11 Curva de temperatura superficial da semente de mamona em função do tempo para a temperatura do ar de secagem ($T = 70^{\circ}\text{C}$, secagem em estufa)	109
Figura 4.12 Curva de temperatura superficial da semente de mamona em função do tempo para a temperatura do ar de secagem ($T = 80^{\circ}\text{C}$, secagem em estufa)	109
Figura 4.13 Curva de temperatura superficial da semente de mamona em função do tempo para a temperatura do ar de secagem ($T = 90^{\circ}\text{C}$, secagem em estufa)	110
Figura 4.14 Temperatura superficial da semente de mamona em função do teor de umidade ($T = 40^{\circ}\text{C}$, secagem em estufa)	111
Figura 4.15 Temperatura superficial da semente de mamona em função do teor de umidade ($T = 50^{\circ}\text{C}$, secagem em estufa)	111
Figura 4.16 Temperatura superficial da semente de mamona em função do teor de umidade ($T = 60^{\circ}\text{C}$, secagem em estufa)	112
Figura 4.17 Temperatura superficial da semente de mamona em função do teor de umidade ($T = 70^{\circ}\text{C}$, secagem em estufa)	112
Figura 4.18 Temperatura superficial da semente de mamona em função do teor de umidade ($T = 80^{\circ}\text{C}$, secagem em estufa)	113
Figura 4.19 Temperatura superficial da semente de mamona em função do teor de umidade ($T = 90^{\circ}\text{C}$, secagem em estufa)	113
Figura 4.20 Aparência do grão de mamona antes do processo de secagem em estufa	115
Figura 4.21 Aparência do grão de mamona antes do processo de secagem em estufa	115
Figura 4.22 Sementes de mamona antes do processo de secagem	116
Figura 4.23 Sementes de mamona após processo de secagem em estufa na temperatura de 90°C	118
Figura 4.24 Teor da umidade (base seca) das sementes de mamona em função do tempo de secagem ($T = 40^{\circ}\text{C}$, secagem em secador com esteira estática)	117
Figura 4.25 Teor da umidade (base seca) das sementes de mamona em função do tempo de secagem ($T = 50^{\circ}\text{C}$, secagem em secador em secador	

com esteira estática)	118
Figura 4.26 Teor da umidade (base seca) das sementes de mamona em função do tempo de secagem ($T = 60^{\circ}\text{C}$, secagem em secador em esteira estática)	118
Figura 4.27 Teor da umidade (base seca) das sementes de mamona em função do tempo de secagem ($T = 70^{\circ}\text{C}$, secagem em secador com esteira estática)	119
Figura 4.28 Teor da umidade (base seca) das sementes de mamona em função do tempo de secagem ($T = 80^{\circ}\text{C}$, secagem em secador com esteira estática)	119
Figura 4.29 Teor de umidade (base seca) das sementes de mamona em função do tempo de secagem ($T = 90^{\circ}\text{C}$, secagem em secador com esteira estática)	120
Figura 4.30 Teor de umidade adimensional das sementes de mamona em função do tempo de secagem ($T = 40, 50, 60, 70, 80$ e 90°C , secagem em secador com esteira estática)	121
Figura 4.31 Temperatura superficial da semente de mamona em função do tempo de secagem ($T = 40^{\circ}\text{C}$, secagem em secador com esteira estática)	122
Figura 4.32 Temperatura superficial da semente de mamona em função do tempo de secagem ($T = 50^{\circ}\text{C}$, secagem em secador com esteira estática)	122
Figura 4.33 Temperatura superficial da semente de mamona em função do tempo de secagem ($T = 60^{\circ}\text{C}$, secagem em secador com esteira estática)	123
Figura 4.34 Temperatura superficial da semente de mamona em função do tempo de secagem ($T = 70^{\circ}\text{C}$, secagem em secador com esteira estática)	123
Figura 4.35 Temperatura superficial da semente de mamona em função do tempo de secagem ($T = 80^{\circ}\text{C}$, secagem em secador com esteira estática)	124
Figura 4.36 Temperatura superficial da semente de mamona em função do tempo de secagem ($T = 90^{\circ}\text{C}$, secagem em secador com esteira estática)	124
Figura 4.37 Curvas do teor de umidade da semente de mamona (em base seca) em função do tempo de secagem ($T = 40^{\circ}\text{C}$, secador com esteira estática, secador com esteira em movimento e estufa)	127
Figura 4.38 Temperatura da semente de mamona em função do tempo de	

secagem ($T = 40^{\circ}\text{C}$, secador com esteira estática, secador com esteira em movimento e estufa)	128
Figura 4.39 Temperatura da semente de mamona em função do teor de umidade em base seca ($T = 40^{\circ}\text{C}$, secador com esteira estática, secador com esteira em movimento e estufa)	128
Figura 4.40 Teor de umidade da semente de mamona em base seca em função do tempo de secagem ($T = 70^{\circ}\text{C}$, secador com esteira estática, secador com esteira em movimento e estufa)	129
Figura 4.41 Temperatura da semente de mamona em função do teor de umidade em base seca ($T = 70^{\circ}\text{C}$, secador com esteira estática, secador com esteira em movimento e estufa)	129
Figura 4.42 Temperatura da semente de mamona em função do teor de umidade em base seca ($T = 40^{\circ}\text{C}$, secador com esteira estática, secador com esteira em movimento e estufa)	130
Figura 4.43 Curva do teor de umidade da semente de mamona em base seca em função do tempo de secagem ($T = 70^{\circ}\text{C}$, estufa, secador com esteira estática e esteira em movimento)	131
Figura 4.44 Temperatura da semente de mamona em função do teor de umidade em base seca ($T = 70^{\circ}\text{C}$, secador com esteira estática, secador com esteira em movimento e estufa)	131
Figura 4.45 Temperatura da semente de mamona em função do teor de umidade em base seca ($T = 90^{\circ}\text{C}$, estufa, secador com esteira estática, secador com esteira em movimento)	131
Figura 4.46 Curva de aquecimento e resfriamento da resistência medidos a 3 cm da fonte de calor	134
Figura 4.47 Testes do grupo de resistências desenvolvido por Holanda	134
Figura 4.48 Sistema artesanal de resistência elétricas (700 W)	135
Figura 4.49 Grupo de resistências montadas numa configuração tipo colmeia	135
Figura 4.50 Ventilador soprando o ar sobre o grupo de resistências, no módulo A	135
Figura 4.51 Medição da velocidade do ar	136
Figura 4.52 Medição da velocidade do ar quente através da saída	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Modelos de isotermas de sorção	47
Tabela 2.2 Gastos energéticos com secagem em algumas indústrias.	59
Tabela 3.1 Condições experimentais (inicial) das sementes de mamona e ar de secagem, no interior, para secagem em estufa	69
Tabela 3.2 Condições experimentais (inicial) das sementes de mamona e ar de secagem no interior, para secagem em secador com esteira estática	72
Tabela 3.3 Potência total do grupo de resistências requerida para cada câmara	88
Tabela 3.4 Características técnicas dos ventiladores	90
Tabela 3.5 Rotação nominal do motor em função da frequência	94
Tabela 3.6 Dados da velocidade da esteira calculados para uma frequência de 30 Hz	96
Tabela 4.1 Dimensões das sementes de mamona antes e após a secagem estufa	114
Tabela 4.2 Parâmetros geométricos das sementes de mamona antes e após secagem estufa	114
Tabela 4.3 Parâmetros geométricos das sementes de mamona antes e após secagem em secador esteira estática	125
Tabela 4.4 Parâmetros geométricos das sementes de mamona antes e após a secagem em secador com esteira estática	126
Tabela 4.5 Velocidade do sistema de transmissão	132
Tabela 4.6 Valores de velocidade e vazão volumétrica obtidos para os módulos A, B e C, dados na entrada e saída do fluxo	137

Tabela 4.7 Valores da vazão volumétrica na saída do módulo A, obtidos num segundo teste

NOMENCLATURA

Letras Latinas

A	Área	[m ²]
A _s	Área superficial	[m ²]
A _m	Peso da amostra	[g]
a ₀	Maior diâmetro da semente	[%]
a _w	Atividade de água	[g]
b ₀	Lado médio da semente	[m]
c ₀	Menor diâmetro da semente	[m]
D	Diâmetro do ventilador	[m]
D _g	Diâmetro geométrico	[m]
E	Consumo de energia	[kWh]
E _s	Esfericidade	[m ²]
I	Valor eficaz da intensidade de corrente	[volt]
I _f	Frequência do inversor de velocidade	[Hz]
M	Teor de umidade	[%]
M(b.u).	Umidade em base úmida	[kg/kg]
M(b.s)	Umidade em base seca	[kg/kg]
Meq	Teor de umidade de equilíbrio	[%]
M ₀	Teor de umidade inicial	[%]
Ṁ	Teor de umidade adimensional	[adm]
m _a	Massa de água	[g]
m _s	Massa seca	[g]

Ns	Velocidade síncrona	[rpm]
Ns'	Fator de escorregamento	[rpm]
N	Velocidade nominal	[rpm]
np	Números de polos do motor	[4]
P	Potência	[W]
p _a	Peso da amostra	[g]
P _{med}	Potência média	[W]
P _v	Pressão de vapor presente no ar	[Pa]
P _{vs}	Pressão de vapor de água presente no ar saturado	[Pa]
R	Raio	[m]
R _v	Velocidade do ventilador	[rpm]
rpm	Rotação por minuto	[rpm]
T	Temperatura	[°C]
T _{amb}	Temperatura ambiente	[°C]
T _{secador}	Temperatura do secador	[°C]
T _{estufa}	Temperatura da estufa	[°C]
t	Tempo	[min]
t _c	Tara da cesta	[g]
t _{c+am}	Tara da cesta mais peso da amostra	[g]
U	Valor eficaz da tensão senoidal	[RMS]
UR	Umidade relativa do ar	[%]
V	Velocidade do ar	[m/s]
V _v	Vazão volumétrica	[m ³ /h]
v	Volume da semente de mamona	[m ³]
v ₀	Volume inicial da semente de mamona	[m ³]
V	Velocidade linear	[m]

Letras Gregas

η_{cov}	Eficiência do secador tipo convectivo	[%]
η_{inst}	Eficiência energética instantânea	[%]
η_c	Eficiência cumulativa	[%]

ε_{ins}	Eficiência do secador instantâneo	[%]
ε_c	Eficiência de secagem cumulativa	[%]
θ_0	Temperatura na superfície do produto	[°C]
θ_{eq}	Temperatura de equilíbrio	[°C]
θ^*	Temperatura adimensional	[adm]
π	Pi	[adm]
ψ	Índice de contração volumétrica	[adm]
ω	Velocidade angular	[rad/s]
ω_{c1}	Diâmetro da coroa 1	[m]
ω_{c2}	Diâmetro da coroa 2	[m]
θ	Temperatura do produto	[°C]
Ω	Redução do redutor de velocidade	[rpm]

Abreviações

EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ADM	Adimensional
EMEPA	Empresa estadual de Pesquisa Agropecuária
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LPSA	Leme of Portal Swimming Association
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O que se tem visto nos processos de secagens são pesquisas desenvolvidas com pequenos equipamentos ou mesmo pesquisas sendo desenvolvidas em equipamentos industriais. Nesse trabalho surgiu a necessidade de desenvolvimento de um secador em escala piloto com sistema de secagem versáteis e eficientes, para ser aplicado a diversos produtos e a diferentes condições operacionais independentes que pudesse secar produtos de alto valor agregado (sementes de mamona).

A secagem constitui-se em um dos processos mais antigos, usada para redução do teor de umidade de alimento e outros produtos biologicamente sensíveis à temperatura. A secagem provoca no material diversas alterações físicas, químicas e mecânicas que em algum momento são irreversíveis e responsáveis pela redução da sua qualidade. O histórico dos itens mais prejudiciais durante todo processo de secagem é levado em conta através de vários fatores, tais como: tipo de produto, teor de água, temperatura e tempo. Assim sendo, o objetivo da secagem é maximizar a qualidade do produto através do controle de processo.

A secagem é uma operação complexa, que envolve a transferência transiente de calor e massa, que provoca transformações físicas e/ou químicas no produto, as quais, por sua vez,

podem causar alterações na qualidade final do produto, bem como nos mecanismos de transferência de calor e de massa (MUJUMDAR, 2006).

A necessidade da secagem de materiais biológicos é de suma importância na indústria agroalimentar, produzindo produtos de alta qualidade. No entanto, esse processo apresenta grandes desvantagens, devido ao alto consumo de energia. Por exemplo, a primeira é o custo da energia e a segunda é a degradação ambiental que está associada a alguns tipos de produção de energia. Em resposta a estas preocupações, tem havido muito trabalho em novas técnicas de secagem para melhorar as eficiências de energia e dos processos de secagem.

Alguns autores afirmam que a secagem de produtos agrícolas é o processo mais utilizado para assegurar sua qualidade e estabilidade, considerando que a diminuição da quantidade de água do material, reduz a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento (RESENDE et al., 2008). Sendo assim, a secagem constitui uma operação fundamental entre as técnicas envolvidas na conservação das qualidades desejáveis de produtos de origem vegetal colhidos com alto teor de água. Por exemplo, a banana, o abacaxi, sementes de milho e etc. Assim dentre esses produtos, encontra-se a mamona, um produto que é colhido com um alto teor de umidade (PEREIRA, 2015).

Comenta-se que a Índia é o maior produtor mundial de semente de mamona com produção anual de 1,63 milhões de toneladas, enquanto o Brasil ocupa a 4ª posição com produção de aproximadamente 26,0 mil. A mamoneira é uma planta oleaginosa de relevante importância econômica para o Brasil, sendo tradicionalmente produzido em pequenas e médias propriedades, gerando emprego e renda, devido às suas inúmeras possibilidades de aplicação na área da indústria, além da perspectiva de potencial energético na produção de biodiesel, tornando-se assim um agronegócio bastante promissor (GONELI et al., 2010).

A semente da mamona, em termos médios, segundo Freire (2011), é constituída por 65% de amêndoa e 35% de casca. Sua composição química muda de acordo com a variedade e região de cultivo. Segundo Beltrão e Lima (2007), os frutos de mamona são cápsulas tricocas, geralmente compostos de três grãos, podendo ser lisas ou com estruturas semelhantes a espinhos, denominadas acúleos. De acordo com sua abertura, durante o amadurecimento,

podem ser classificados como deiscentes, quando possui abertura do fruto, e indeiscentes, quando não ocorre abertura.

A semente de mamona apresenta uma composição com aproximadamente 50% de óleo. Este óleo apresenta especiais características, tais como: elevada viscosidade, estabilidade ao calor e pressão, baixo ponto de congelamento, habilidade para formar substâncias serosas após tratamentos químicos (CONCEIÇÃO et al., 2005). O óleo da mamona possui inúmeras aplicações na área industrial, com perspectiva de utilização como fonte energética na produção de biocombustível (SEVERINO et al., 2008). No entanto, este produto ao ser colhido, tem de ser seco, a fim de reduzir o teor de umidade, para o armazenamento seguro, e posteriormente ser usados em processos industriais.

Quanto ao óleo extraído da semente da mamona são atribuídas características singulares e versáteis como é o caso dos 90% de ácido graxo ricinoleico, obtido pela prensagem das sementes, o que possibilita uma ampla gama de utilização industrial com utilidade só comparável a do petróleo, com a vantagem de ser um produto renovável e barato, o que torna a cultura importante potencial econômico e estratégico ao Brasil (BARROS Jr, et al., 2013).

Os subprodutos oriundos da mamona desenvolvido pela indústria, abrangem uma diversidade de produtos de uso bastante ostensivo no cotidiano do homem moderno, tais como, surfactantes, lubrificantes, tintas, produtos farmacêuticos, cosméticos, poliésteres, polímeros à base de óleo de rícino são utilizados na fabricação de vários produtos de base comercialmente importantes (PEREIRA, 2015).

Por outro lado, a torta da mamona é uma massa orgânica utilizada, em geral, como adubo orgânico (alto teor de nitrogênio), controle de nematóides do solo e, ainda que com uso restrito, após desintoxicação, como complemento em ração animal devido ao elevado teor de proteína, composta pelos aminoácidos: arginina, cistina, fenilalanina, histidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, tirosina, treonina, triptofano e valina (BELTRÃO, 2003). Além disso, a torta é constituída por fibras, materiais minerais, lipídios totais e matéria seca (ANANDAN et al., 2004). Souza (2013), realizando a caracterização físico-química da torta de mamona “in natura”, obteve valores médios de teor de umidade de 7,91%, teor de proteína

de 26,53%, pH igual a 6,27, teor de acidez igual a 2,94%, teor de carboidratos igual a 52,05% e energia igual a 341,49 kcal/100g.

O que tem-se visto nos processos de secagem são pesquisas desenvolvidas com pequenos equipamentos ou até mesmo desenvolvidas em equipamentos industriais. Escassos são os trabalhos sobre a secagem da semente de mamona, assim, surge a necessidade do desenvolvimento de um secador em escala piloto, com um sistema que oferecesse versatilidade e eficiência, para ser aplicado a diversos produtos e a diferentes condições operacionais independentes, com ênfase para a secagens de produtos de alto valor agregado (semente de mamona).

Lima (1995) projetou e Holanda (2007) construiu e testou um secador tipo esteira com fluxos cruzados. Foi dada ênfase aos aspectos construtivos, funcionamento e uma modelagem matemática, descrevendo as trocas de energia e massa entre o produto e o ar de secagem no interior do secador. Os resultados do desempenho de componentes do secador experimental e da secagem do produto foram discutidos e analisados. O secador desenvolvido por Holanda (2007) foi totalmente reformado e posto em funcionamento em 2014 e teve como experimento principal a secagem da semente de mamona da cultivar BRS Paraguaçu.

Sendo assim, visando dar uma contribuição à área de secagem da mamona, esse trabalho consiste no aperfeiçoamento de um secador de grãos de fluxo contínuo e análise do efeito produzido pelo processo de secagem sobre o produto, dando ênfase aos problemas causados pela temperatura, velocidade e umidade do ar, e espessura da camada da semente de mamona e teor de umidade da mesma. O autor se propõe, em síntese, atingir os seguintes objetivos:

1.1 Objetivo geral

Aperfeiçoar um secador contínuo tipo esteira e de fluxos cruzados, em escala piloto, e aplica na secagem de sementes de mamona tipo BRS Paraguaçu.

1.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar os sistemas de aquecimento e fluxo do ar no secador e velocidade das esteiras durante o processo de secagem da semente de mamona;
- b) Utilizar o secador na secagem de sementes de mamona;
- c) Realizar experimentos de secagem do produto no secador contínuo em diversas condições operacionais, verificando o efeito da temperatura, umidade relativa e velocidade do ar sobre a cinética de secagem do sólido (semente de mamona);
- d) Realizar experimentos de secagem das sementes de mamona em estufa e comparar os resultados com aqueles obtidos com o secador de esteira e de fluxo cruzados;
- e) Avaliar o tempo de secagem para cada temperatura;
- f) Avaliar a qualidade visual do produto pós secagem;
- g) Avaliar as características construtivas e de desempenho térmico do secador proposto.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Mamona ou carrapateira

2.1.1 Aspectos gerais

A mamona ou mamoneira (*Ricinus communis*), planta abundante nativa de regiões tropicais e subtropicais do mundo, é uma das 7.000 espécies da família das Euforbiáceas, originária do Continente Africano, sendo conhecida popularmente como carrapateira, rícino e palma-de-cristo. Na sua cadeia produtiva, o óleo é o principal produto comercial e a torta é o coproduto de baixo valor de mercado (PEREIRA, 2015).

A raça humana necessita de produtos alimentares perecíveis, tais como frutas, vegetais e legumes, ricos em vitaminas e sais minerais e que precisam ser desidratados. Muitos produtos alimentares perecíveis são de grande importância nutricional para a dieta humana e nutrição, tais como, as frutas, vegetais e sementes. A perda de nutrientes e atributos funcionais varia no que diz respeito ao tipo, ao estado e ao tempo de processo de desidratação, e a sensibilidade dos componentes alimentares específicos (LIMA et al., 2017). A temperatura durante o processo de desidratação do produto é geralmente superior à temperatura ambiente, mas bem abaixo da temperatura de esterilização.

A carrapateira ou rícino é uma planta que apresenta um grande teor de água em sua estrutura e pode ser cultivada nas regiões temperadas e tropicais do mundo, por seu óleo ser extensivamente usado para fins medicinais e industriais. Também conhecida como mamona (*Ricinus communis* L), oriunda da África tropical e, segundo Pereira (2015), é bastante cultivada como planta ornamental e oleaginosa em muitos países da Ásia, América Central, América do Norte e Europa (QUEIROGA et al., 2011).

Segundo Silva (2012), a mamona é um arbusto de cujo fruto (Figura 2.1) se extrai um óleo de excelentes propriedades conhecido desde a antiguidade por suas propriedades medicinais e com o azeite de uso muito constante para iluminação. Os grandes consumidores desse produto biológico são as indústrias químicas e de lubrificantes.

Figura 2.1 – Pé de mamona com frutos. Fonte: terra da gente (2016).



Figura 2.2 - Folhas e frutos de mamona. Fonte: terra da gente (2016).



Segundo Oliveira (2011), o óleo da semente do fruto de mamona (Figura 2.2) é um dos mais versáteis existentes na natureza. Possui 90% de ácido ricinoleico, o qual lhe confere propriedades interessantes como alta solubilidade em etanol e alto poder de lubricidade; constitui-se uma importante fonte para produção de biodiesel e para fabricação de plásticos, fibras sintéticas, manufaturas de cosméticos, sabões, polímeros, esmaltes, corantes,

desinfetantes, aderentes, resinas e lubrificantes de aeronaves militares (RIBEIRO FILHO, 1966; CARNEIRO, 2013).

2.1.2 Origem da mamona

A mamona é, provavelmente, originária da Etiópia, antiga Abissínia, no continente africano (MOSHKIN, 1986), porém, alguns estudiosos indicam o continente asiático como provável centro de origem (BUZZETTI, 1999). Existem relatos de que sementes dessa espécie foram encontradas em sarcófagos egípcios com mais de 4000 anos, e acredita-se que este povo utilizava essas sementes para fins medicinais (PORTER et al., 1997; OLSNES, 2004).

Alguns autores no Brasil consideram que a espécie tenha sido introduzida durante a colonização portuguesa, com a finalidade de se utilizar o óleo extraído das sementes para iluminação e lubrificação de eixos de carroça (AZEVEDO, BELTRÃO e LIMA, 2007). O clima tropical, predominante no Brasil, facilitou o seu alastramento. Hoje pode-se encontrar a mamoneira em quase toda extensão territorial, como se fosse uma planta nativa e em cultivos destinados à produção de óleo (AZEVEDO et al., 2007).

Os tipos comerciais existentes, dependendo das condições ambientais e das variedades, podem variar em altura de 1 a 4 m. De acordo com Anthoniser et al. (2007), o porte das plantas pode variar desde 80 cm até 8 m de altura. Possui facilidade de adaptação e velocidade de propagação sob diferentes condições climáticas.

2.1.3 Descrições botânica, morfológica e fisiológica da mamoneira

Segundo Pereira (2015), a mamoneira (*Ricinus communis* L.) é pertencente à família Euphorbiaceae subfamília Acalyphoideae, tribo Acalypheae, subtribo Ricininae, e ao gênero *Ricinus*, o qual é considerado monotípico. A mamona pertence à família Euforbiácea que abrange um vasto número de plantas nativas da região tropical, sendo a espécie *Ricinus communis* L. a única conhecida (RIOS, 2009; ALVES, 2009).

A mamoneira é uma planta de hábito arbustivo, com diversas colorações de caule, folhas e frutos tipo racemos (cachos), podendo possuir cera no caule e pecíolo. Os frutos podem ser deiscentes ou indeiscentes, tricocas e na sua maioria com acúleos, trioculares e

geralmente, possuem espinhos, podendo as sementes (Figura 2.3) apresentar diferentes tamanhos, formatos e grande variabilidade de coloração (MOREIRA et al., 1996; AZEVEDO et al., 1997; AMORIM NETO et al., 2001; ALVES, 2009). Por ser uma planta polimórfica, apresenta grande variação em seu hábito de crescimento, cor de folhas, ramos, frutos, tamanho das sementes (Figura 2.4), teor de óleo e altura de plantas, sendo possível assim distinguir um material de outro através da sua forma genética (ALVES, 2009; SANTOS, 2012; LUZ, 2012).

Os frutos de mamona são geralmente compostos de 3 grãos, obedecendo a seguinte classificação: deiscentes ou indeiscentes, sendo essa classificação dada de acordo com a abertura destes frutos durante o seu amadurecimento (BELTRÃO e LIMA, 2007). Assim, ela é dita deiscentes, quando ocorre a abertura total dos frutos, e indeiscentes, quando os frutos não se abrem espontaneamente (SAVY FILHO, 2005).

Figura 2.3 - Tipos de sementes da mamona. Fonte: Pelegrine e Carrocci (2018).



Figura 2.4 - Tipo de sementes de mamona. Fonte: Pelegrine e Carrocci (2018).



Segundo Pereira (2015) e Luz (2012), taxonomicamente a mamona é classificada como:

Subdivisão: Fanerogamea ou Espermatophita;

Filo: Angiospermae;

Classe: Dicotyledonae;

Suclasse: Archichlamydeae;

Ordem: Geraniales;

Família: Euphorbiaceae;

Gênero: Ricinus;

Espécie: Ricinus communis.

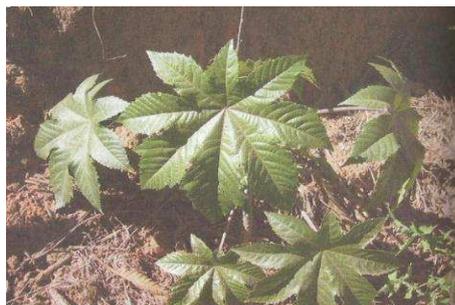
Os frutos, em geral (Figura 2.5), possuem espinhos e suas sementes possuem tamanhos, formatos bastante diferentes e com grande variabilidade em sua coloração, além de variação no seu conteúdo de óleo, podendo chegar a aproximadamente 55% (LUZ 2012).

Figura 2.5 - Frutos da mamona. Fonte: www.google.com.br/search?q=frutos+da



Por apresentar raízes fistulosas com bastante ramificações, o mamoeiro apresenta-se como arbusto de folhas grandes e daí se classifica como palmatilobadas.

Figura 2.6 - carrapateira ou mamona. Fonte: www.genetatuape.com.

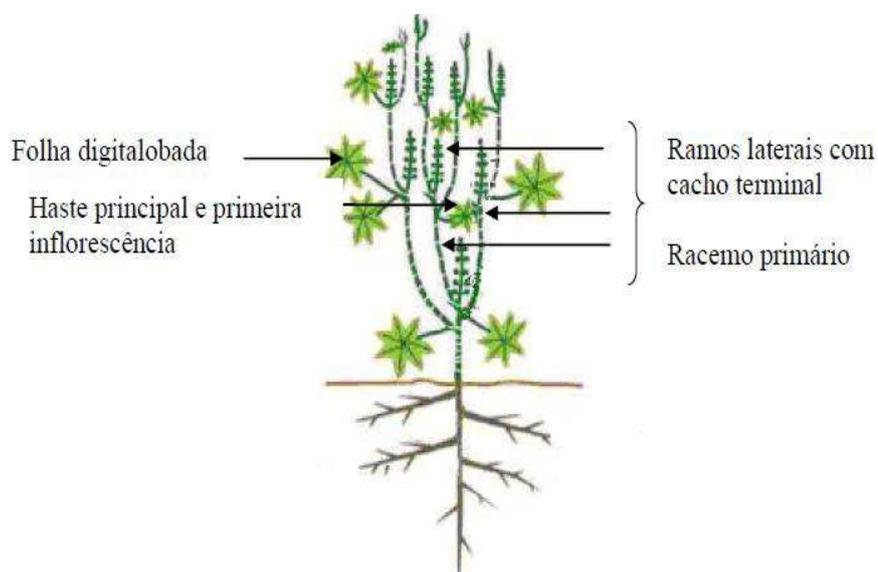


Segundo Pereira (2015), a mamoeira (*Ricinus communis* L.) é uma planta (Figura 2.6) que apresenta um desenvolvimento bastante jovem durante seu processo de crescimento. A Figura 2.7 mostra o esquema geral da planta conhecida como carrapateira, onde a haste principal cresce de forma vertical sem ramificação até a origem da primeira inflorescência, que tem a denominação após a fecundação das flores de cacho ou racemo.

Segundo Carvalho (2005), as características ideais que a mamona pode ter são:

- a) Produtividade superior a 1500 kg de bagas por hectare;
- b) Produtividade acima de 3000 kg em regime de irrigação;
- c) Boa resistência e tolerância às pragas e doenças;
- d) Teor de ácido ricinoleico superior a 89%;
- e) Frutos semi-indeiscentes.

Figura 2.7 – Esquema ilustrativo do aspecto geral da planta de mamona. Fonte: adaptado de Pereira (2015).



2.1.4 Variedades mais produtivas da mamona

Segundo Savi Filho (2007), seis cultivares da mamona têm grande destaque em termos de comercialização em todo território brasileiro, apesar da irregularidade climática. Assim discriminamos:

- a) IAC-2008, com elevado potencial produtivo de ciclo precoce e frutos indeiscentes. Segundo Savi Filho (2007), foi gerada através da hidratação artificial entre a linhagem L881, desenvolvida por seleção massal dentro da cultivar IAC-38, e a progênica H34.
- b) A cultivar IAC-38 é de pequeno porte, frutos deiscentes, boa capacidade produtiva e ampla adaptação no Estado de São Paulo (SAVI FILHO 2007).

- c) A progênica H34 foi gerada através da hibridação artificial entre as cultivares IAC-38 e Cimarron sendo esta portadora da característica indeiscente do fruto, possibilitando assim a colheita única através da mecanização.
- d) BRS 188 a Paraguaçu possui um ciclo de plantio para colheita em torno de 230 a 250 dias, com uma altura média de 1,60 m, caule roxo com cerosidade e semente com peso médio aproximado de 0,7g (PEREIRA, 2015; COSTA et al., 2008).
- e) BRS 149 Nordestina possui um ciclo de dias igual a BRS 188, porém com uma altura média de 1,90 m, porém o caule apresenta uma cor esverdeada com serosidade (PEREIRA, 2015).
- f) BRS Energia possui um ciclo de 120 a 140 dias, altura de 1,40 m, com cor do caule verde com cerosidade e peso médio por semente aproximado de 0,55g (PEREIRA, 2015).

Dentre as variedades citadas, esta pesquisa concentra-se na variedade BRS 188 a Paraguaçu e as Figuras 2.8 e 2.9 ilustram sub-espécies de mamona e algumas variedades da semente deste produto biológico. As subespécies apresentam algumas particularidades tais como:

- a) A communis, planta com altura média ou grande (1 a 2,5 m) ramificada geralmente em cera, cor única no caule, comprimento de do racemo entre 15 a 20 cm, densidade baixa porém com capsulas grande;
- a) Pancious, plantas grandes com média de 1,2 a 2 m, poucos galhos, racemos longos e compactos, capsulas pequenas (1,2 a 2 cm) e de forma circular;
- b) Simensis, planta do tipo anã ou com altura média 0,5 a 1,5 m, ramificadas e geralmente com folhas pequenas. Com racemo ralo, grande ou média apresentando as cores pretas e marrom (EMBRAPA, 2009).

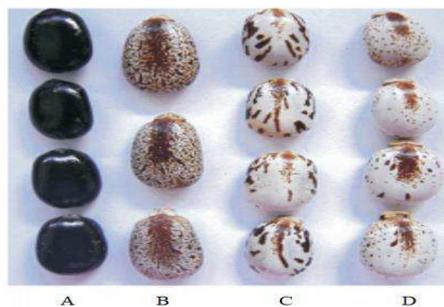
As literaturas não apresentam nenhum tipo como especial, mas devido a versatilidade do seu óleo, possui largo emprego na indústria química devido uma característica peculiar: possui uma hidroxila (OH) ligada na cadeia do carbono. Não existe outro óleo vegetal com essa propriedade. Outro fator importante sobre o óleo de mamona é ser composto por 80 e 90 % de um único ácido graxo (ácido ricinoleico), o que lhe confere alta viscosidade e solubilidade em álcool a baixa temperatura. É muito usado na produção do biodiesel, mas a quase totalidade do óleo produzido no mundo tem sido utilizado na indústria química para

produtos de maior valor agregado (purgante, alta viscosidade e possui uma hidroxila (OH) ligado na cadeia de carbono) (EMBRAPA, 2009).

Figura 2.8 - Sub-espécies de mamona. Fonte: Embrapa (2009).



Figura 2.9 - Padrão das sementes, sendo (A) cor única, (B) pintadas, (C) rajadas e (D) pontudas. Fonte: Embrapa (2009).



2.1.5 Época de plantio da mamona

A época chuvosa é a ideal para o plantio da mamona. Segundo Alves (2009), deve ser plantada para viver continuamente exposta ao sol, pois não suporta sombreamento no entanto, é bastante exigente quanto a fertilidade do solo. Embora tolere a seca, se houver boa disponibilidade de água poderá ter uma colheita muito maior. A colheita pode ser feita em época, para isso é necessário observar o ciclo da cultivar a ser plantada, início e fim do período chuvoso (EMATERCE, 2006; MACIEL 2006).

A questão quanto a plantação da mamona vai de região para região, por exemplo, no Semiárido, o plantio da mamona deve ser feito logo após o início das chuvas para aproveitar ao máximo a estação chuvosa. Onde o período chuvoso é mais longo, ou em plantio irrigado, é preciso planejar o plantio para que a colheita ocorra em época seca a fim de garantir a secagem da produção. É preciso, também, levar em conta o comprimento do ciclo da cultivar

plantada: as cultivares híbridas de porte baixo geralmente têm ciclo mais curto, ao passo que as cultivares de porte médio são mais tardias (EMBRAPA, 2006).

2.1.6 Aspectos gerais da produção de mamona

2.1.6.1 Mercado nacional

Segundo Pereira (2015), a cultura da mamona tornou-se de suma importância econômica e social para o Brasil e para o mundo, principalmente pela perspectiva de potencial energético na produção de biodiesel, tornando-se um agronegócio bastante promissor. Segundo dados da CONAB (2017), a produção brasileira da mamona registrada na safra entre 1976/77 era da ordem de 201,5 toneladas referentes a uma área de 250 mil hectares. Para os anos de 1984/85 ou seja, quase uma década depois mostrou-se uma safra de 393 mil toneladas, para uma área de 485 mil hectares. Já em 1997/98 apenas 18,8 toneladas para uma área de apenas 132,6 hectares.

As estimativas para as safras 2016/2017 é de recuo de área plantada, que perfaz um valor de 30,5 mil hectares. Isso significa um decréscimo de 4,1% em relação à passada, que foi de 31,8 mil hectares, crescimento na produção de 4,7%, saindo de 14,8 mil toneladas da safra passada, para 15,5 mil toneladas nesta safra. As Figuras 2.10 e 2.11 e a Figura 2.12 ilustram dados de produção da mamona no Brasil e por estados, respectivamente (CONAB, 2017).

A Figura 2.10, ilustra a participação e produtividade entre os períodos de 2004 a 2017 sobre a produção de mamona no Brasil, enquanto que a Figura 2.11 ilustra muito bem a participação relativa percentual da mamona por estado brasileiro, vemos que o estado da Bahia é onde se encontra a maior produtividade da mamona com 92,3 %, sendo este registro da data de 2017.

Segundo Lobão (2010), o Brasil apresenta a matriz energética mais renovável do mundo, devido ao incentivo do governo federal às novas pesquisas em geração e distribuição de energia.

Figura 2.10 – Área colhida, produção e produtividade da mamona no Brasil, no período de 2004 a 2017. Fonte: IBGE/LSPA (2017).

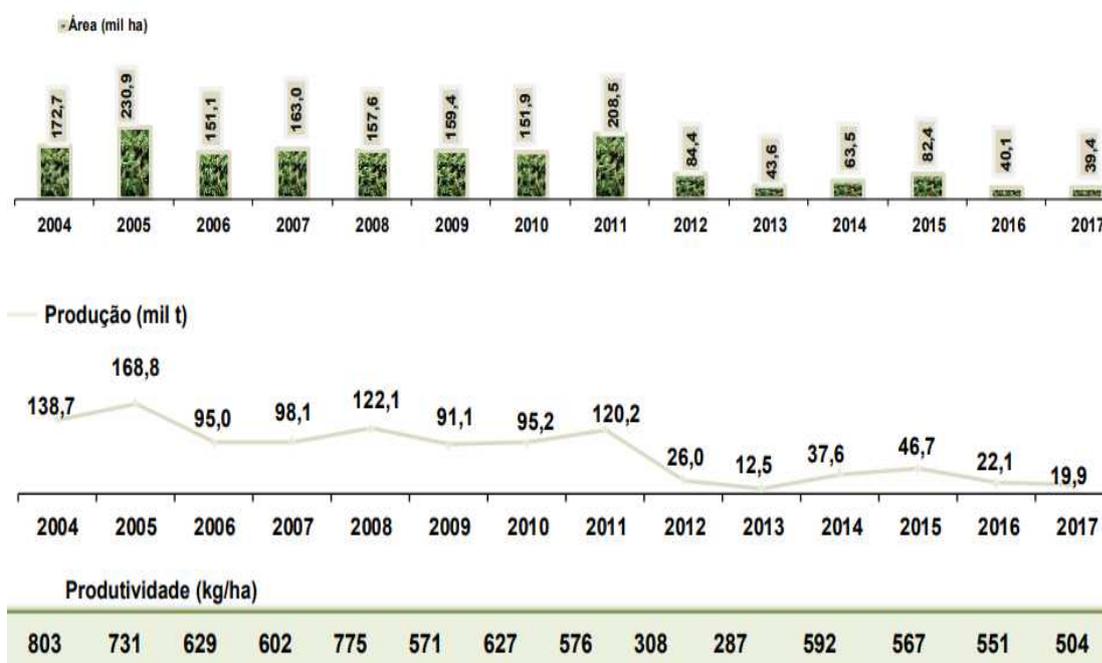


Figura 2.11 – Participação relativa percentual da mamona por estado brasileiro. Fonte: IBGE/LSPA (2017).



Os programas criados pelo governo brasileiro, além de contribuir para a preservação do meio ambiente, promove o crescimento da economia local. A Figura 2.12 ilustra muito bem a produção da mamona por Estados Brasileiros com destaques na Bahia e Mato Grosso e com Pernambuco e São Paulo ocupando a 6ª e a 7ª posição na produção da mamona, com destaques através da produção do biodiesel extraído da mamona.

Figura 2.12 – Participação relativa da produção da mamona por estado brasileiro. Fonte: IBGE/LSPA (2017).

POSIÇÃO	ESTADO	PRODUÇÃO (mil t)	PARTICIPAÇÃO %
1º	Bahia	18,360	92,340
2º	Mato Grosso	0,550	2,766
3º	Ceará	0,548	2,756
4º	Minas Gerais	0,217	1,091
5º	Piauí	0,192	0,966
6º	Pernambuco	0,012	0,060
7º	São Paulo	0,004	0,020
8º	-	-	-
9º	-	-	-
	Demais Estados	-	-
	Produção Total	19,9	100,0

De acordo com a lei 11.097 de 13 de janeiro de 2005, o uso de biocombustíveis foi introduzido na matriz energética brasileira.

Segundo a CONAB (2017), mesmo com a criação do programa nacional da produção e uso do biodiesel em 2005, o que poderia ser um grande incentivo ao plano de produção da produção da mamona, a produção não passou de 209,8 mil toneladas na safra 2004/2005 e esse índice baixou ainda mais para a safra 2006/07, apenas 93,7 mil toneladas foram produzidos.

Segundo Santos et al. (2010), o Brasil tem uma extensa área cultivável (Bahia e Ceará), apresentando vantagens para a produção de oleaginosas, bem como uma adversidade promissora para produção de biocombustíveis (Figura 2.13). Daí o destaque da mamona devido à sua oleaginosa ideal, por esta apresentar boa resistência à seca, requerendo para o seu crescimento e desenvolvimento baixa precipitação pluvial (500mm), temperatura do ar entre 20°C e 30°C e, de preferência, com altitude superior a 400 m, o que faz da mamona um notável produto para obtenção do biodiesel.

2.1.6.2 Mercado internacional da mamona

Segundo dados da CONAB (2017), revelam que em 2010, a Índia, a China e o Brasil eram os maiores produtores de mamona no mundo, com uma produção de 92,23 % da produção mundial. Para o ano de 2012, o Brasil ocupou o quarto lugar no ranking da produção da mamona, perdendo assim, a 3ª posição para Moçambique. Neste cenário, a maior produção de mamona do mundo está dividida entre quatro países: Índia, China, Moçambique e Brasil. A Figura 2.14 mostra, respectivamente, o ranking dos principais produtores mundiais

– 40%) e fibras (29 – 30%) para a torta e o farelo de mamona. A semente de mamona apresentou alto teor de ácido ricinoleico (79 – 90%) nas matérias primas avaliadas.

Melo et al. (2013), analisando a composição físico-química de sementes de genótipos de mamonas BRS-149 Nordeste, CSRD-2 e CSRN-142 obtiveram teores de umidades variando de 4,02 a 3,66%, teores de lipídios variando de 42,92 a 50,92%, teores de proteínas entre 22,80 e 26,24% e teores de carboidratos variando de 18,52 a 25,72%. Goneli (2008) estudando a cinética de secagem em camada fina de grãos de mamona da variedade Guarani, obteve teor de água igual a 82% (b.s.), através do método gravimétrico, utilizando-se de uma estufa a $105 \pm 1^\circ\text{C}$, durante 24 horas, em duas repetições. Zuchi et al. (2009) realizando a avaliação de dois períodos de colheita com secagem natural e artificial de frutos de mamona das cultivares Al Guarany 2002 e BRS 188 Paraguaçu, obtiveram uma umidade média dos frutos de 25% (b.u.) para as duas cultivares.

2.2 A secagem

2.2.1 Fundamentos

A secagem geralmente é sempre concretizada por intervenção de ar quente, como fluido de trabalho, que cruza o material a secar. A corrente de ar quente provê energia, na forma de calor, transformando a água líquida do material em vapor, sendo este arrastado pela própria corrente de ar. A natureza do material a ser seco é o que limita a temperatura do ar quente. Logo, o fenômeno de secagem é essencialmente dinâmico e corresponde a uma dupla transferência de energia e de massa, geridas por leis físico-químicas.

Segundo Fioreze (2003), secar um produto é portanto reduzir sua atividade de água. A deterioração dos alimentos é um processo irreversível e, uma vez iniciada, só é possível deter o processo no início e com grande conhecimento da tecnologia. É impossível revertê-lo, ou seja, obter o produto original. É importante levar isso em consideração, uma vez que a deterioração de um produto biológico pode ser um processo bastante rápido, podendo ser de poucos dias para raízes, tubérculos, cereais e frutas, como de algumas horas para peixes, crustáceos, carnes, etc. (FIOREZE, 2003).

Provavelmente, o processo de secagem seja o mais antigo método térmico usado continuamente nas indústrias de celulose, químicas, mineral, cerâmica, têxtil, alimentos e de produtos agrícolas do mundo. Atualmente, ainda continua sendo o processo que necessita de maior entendimento, pois envolve de forma simultânea as transferências de calor e massa. O objetivo da secagem é reduzir o teor de umidade do produto por diferentes processos. Contudo, os vilões do processo de deteriorização ocorrido nos alimentos continuam sendo a temperatura e o alto índice de concentração de água nos produtos alimentícios. Sendo assim, o controle total do processo constitui-se de uma etapa importante para a escolha do processo ideal de secagem.

O tempo de exposição ao calor e à temperatura elevada afetam a qualidade nutricional dos produtos alimentícios, especialmente os que apresentam muita sensibilidade ao calor. A temperatura dos alimentos, segundo Mazeto e Maneiro. (2010), além do tempo de armazenamento são fatores determinantes para o controle final da qualidade do produto. Além disso, os alimentos perecíveis são mais estáveis a baixos teores de umidade do que à temperatura elevada no processo de armazenamento. Assim, o objetivo da preservação de alimentos perecíveis é conservar esse alimento, reduzindo, conseqüentemente, as perdas pós-colheita, a fim de aumentar seu tempo de armazenamento e melhorar a qualidade do produto para o consumidor.

Durante a secagem, o transporte de umidade, do interior para a superfície do material pode ocorrer na forma de líquido e/ou vapor, dependendo do tipo do produto e do teor de umidade presente, tendo como parâmetro principal para se obter um ótimo processo de secagem, a sua taxa de secagem (RESENDE et al., 2011; ANDRADE, 2005).

A pressão de vapor da água tem que ser inferior a pressão parcial de vapor de água sobre sua superfície, essa é a condição necessária e suficiente para que um produto seja seco. Não haverá secagem se essas pressões se igualarem, e sim equilíbrio higroscópico entre o produto e o ar, conseqüentemente, não haverá permuta de água entre o produto e o ar que o envolve (FIOREZE, 2003; DOPHEIDE 2013; PARK et al., 2002). A água vai se transformando em vapor durante a secagem e retirada da superfície, criando assim um gradiente de umidade no interior do produto, por essa razão existe a ocorrência de um fluxo de umidade, do interior para a superfície. Este fluxo, além de umidade, arrasta para a

superfície, sólidos solúveis que, quando a água líquida é transformada em vapor, próximo ou na superfície, esses sólidos permanecem no produto, ocasionando uma região de maior concentração próximo à superfície (PEREIRA, 2015; OLIVEIRA et al., 2010).

A umidade relativa é a relação entre a quantidade de vapor de água existente em uma amostra de ar úmido e a quantidade máxima de vapor em que o mesmo ar poderia reter na mesma temperatura. É dada pela equação 2.1.

$$UR = \frac{P_v}{P_{vs}} \times 100 \quad (2.1)$$

onde UR é a umidade relativa do ar; P_v é a pressão de vapor de água presente no ar; P_{vs} é a pressão de vapor de água presente no ar saturado à temperatura de bulbo seco.

Existem vários fatores que governam a conservação ou deterioração de um alimento, a atividade de água (a_w) é o principal (Equação 2.2). Este parâmetro é definido como sendo a relação entre a pressão de vapor da água do ar ambiente em equilíbrio com a umidade do produto (P_v), dividida pela pressão de vapor do ar em contato com a superfície do produto, que contém água líquida (P_{vs}), como segue:

$$a_w = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (2.2)$$

Pela própria definição de atividade de água, observa-se que a mesma é numericamente igual à umidade relativa do ar de secagem, na condição de equilíbrio higroscópico (Equação 2.3). Assim, pela própria definição tem-se que,

$$a_w = UR \quad (2.3)$$

A maioria dos produtos agrícolas, possuem a capacidade de ceder ou absorver água do meio ambiente e os grãos de mamona não fogem a essa regra. À medida que o teor de umidade aumenta, o risco de desenvolvimento de fungos e bactérias torna-se maior, comprometendo a qualidade do produto durante seu armazenamento. Por outro lado, a redução do teor de umidade promove perdas econômicas devido à perda de massa do produto (PEREIRA, 2015).

Se um produto biológico for colocado em um ambiente com umidade e temperatura constante por um longo intervalo de tempo, esse produto atingirá um estado de equilíbrio em que no final cessarão as trocas de umidade entre o produto e o ar ambiente, conhecido como teor de umidade de equilíbrio. Isto não quer dizer que a umidade do produto e a do ar são semelhantes e sim, que as pressões de vapor na superfície do produto e do ar são iguais (FIOREZE, 2003; PEREIRA, 2015).

A grande importância desse estado de equilíbrio é necessário para determinar a perda ou ganho de água sob determinada condição de temperatura e umidade relativa, relacionando-se diretamente com os processos de secagem e armazenagem de produtos agrícolas. Segundo Fioreze, (2003), o teor de umidade de equilíbrio representa o valor limite para uma dada condição de umidade relativa e temperatura. Assim, um sólido poderá estar higroscopicamente em equilíbrio, quando a pressão de vapor de água correspondente ao teor de umidade do material for igual à pressão de vapor de água do ar no ambiente que o circunda (PEREIRA, 2015).

O teor de umidade do produto constitui um importante parâmetro do sólido a ser seco, pode ser definido como a proporção direta entre a massa de água presente no material e a massa de matéria. O teor de umidade de um sólido pode ser definido como a quantidade de água a ser removida do material sem alteração da estrutura molecular do sólido. O teor de umidade do produto pode ser representado tanto em base úmida (b.u.), sendo este usado na comercialização, como em base seca (b.s.) para cálculos específicos. O teor de umidade do sólido em termos de base seca (b.s.) está correlacionado com o teor em base úmida (b.u.), são definidas como segue:

$$M_{b.s.} = \frac{M_{b.u.}}{1 - M_{bu}} \quad (2.4)$$

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

Segundo Corrêa et al. (2005), na literatura, existem mais de 200 equações matemáticas propostas que podem representar o fenômeno de equilíbrio higroscópico dos produtos

agrícolas. Segundo Pereira (2015), a relação entre o teor de água de um determinado produto e a umidade relativa de equilíbrio para uma temperatura específica, são conhecidas como isotermas ou curvas de equilíbrio higroscópico.

No entanto, apesar disso tudo, os modelos teóricos não conseguem prever, com precisão, o teor de umidade de equilíbrio de grãos, em todas as faixas de temperatura e umidade relativa do ar. A Tabela 2.1 contém os modelos mais comuns utilizados para prever o teor de umidade de equilíbrio de produtos agrícolas (CORRÊA et al., 2005; RESENDE et al., 2008; PARK et al., 2007; COSTA et al., 2015; PEREIRA, 2015).

Tabela 2.1 - Modelos de isotermas de sorção. Fonte: Fioreze (2003), Pereira (2015).

Designação do modelo	Modelo
Handerson	$1 - aw = \exp[-(C \cdot M_{eq}^n)]$
Langmuir	$\frac{Meq}{Mm} = \frac{C \times aw}{1 + C \times aw}$
Bet (Brunauer, Emmet, Teller)	$Meq = \frac{(M_m \cdot C \cdot aw) \cdot (1 - (n + 1) \cdot aw^n + n \cdot aw^{1+n})}{(1 - aw) \cdot (1 + (C - 1) \cdot aw - C \cdot aw^{1+n})}$
Gab (Guggenheim, Anderson e de Boer)	$Meq = \frac{Mm \cdot C \cdot K \cdot aw}{(1 - K \cdot aw) \cdot (1 - K \cdot aw + C \cdot K \cdot aw)}$
Halsey	$aw = \exp\left(\frac{-A}{M_{eq}^B}\right)$
Chung e Pfof	$\ln(aw) = -\frac{A}{R \cdot T} \cdot \exp[B \cdot Meq]$
Chen	$aw = \exp[K + A \cdot \exp(B \cdot Meq)]$
Fioreze	$1 - UR = \exp\left[-(A + BT) \left(M_e^{(C+Dt)}\right)\right]$
Peleg	$Meq = K_1 \cdot aw^{n_1} + K_2 \cdot aw^{n_2}$

Sendo A, B, C, D, n, K, K₁, K₂, n₁, n₂ constantes das equações, Meq é o teor de equilíbrio, Mm é o teor de umidade na monocamada molecular, aw é a atividade de água (adimensional), T é a temperatura.

A secagem de produtos agrícolas pode ser realizada através dos processos natural e artificial. Esse processo deverá ser realizado entre a etapa intermediária da colheita, para assim poder obter um produto ideal para o processo de secagem (SILVA, 2012).

Os raios solares é a principal fonte de calor para a secagem natural. É geralmente processada em terreiros (alvenaria), ordinariamente não são possíveis o emprego de artifícios para o aumento da taxa de secagem como: o aquecimento do ar e/ou o aumento de velocidade do ar. A secagem natural é ainda o processo mais utilizado para secagem de mamona no

Brasil, sendo recomendada para pequenas produções e feita expondo-se os frutos ao sol, após o seu desprendimento do cacho (SILVA, 2012).

Pelo processo natural de secagem, os frutos são colocados em camadas finas e uniformes (5 a 10 cm de espessura), por um período de 4 a 15 dias; a região e o clima influem predominantemente no processo. O revolvimento é necessário várias vezes por dia para qualquer tipo de grão, o que permite uniformizar todo processo de secagem e, à tardinha, amontoá-los e cobri-los com lona plástica, para evitar a umidade da noite. O mesmo procedimento deve ser adotado se houver ameaça de chuva (PEREIRA, 2015).

Segundo Fioreze (2003), as principais vantagens da secagem natural são:

- a) O processo de instalação é simples e barato;
- b) Não é necessário conhecimento técnico;
- c) Usa fonte natural de energia (sol e vento);
- d) São bastantes favoráveis nossas condições climáticas.

Como desvantagem quanto ao processo de secagem natural (PEREIRA, 2015; ZUCHI et al., 2009; SILVA, 2010), podemos citar:

- a) É bastante lento (mais de cinco dias);
- b) Depende do clima;
- c) Como é um processo manual, há necessidade de muita mão de obra;
- d) Possui baixo rendimento.

Segundo Pereira (2015), o processo de secagem artificial se desenvolve por meio da passagem de um fluxo de ar, preferencialmente aquecido, pelo produto, induzindo a formação de um gradiente de pressão de vapor entre a superfície do produto e o ambiente, e, por conseguinte, entre a superfície do produto e seu interior. A secagem artificial apresentam inúmeras vantagens tais como:

- a) Possibilidade de colher mais horas por dia e mais dias por safra;
- b) Menor possibilidade de perda de sementes por deiscência/degrana natural;
- c) Colheita de sementes de qualidade potencialmente superior;

d) Manter a viabilidade da semente porque, devido a remoção da umidade, evita-se a possibilidade de aquecimento do produto com conseqüente redução ou destruição da germinação.

Como principais desvantagens do processo artificial, pode-se citar (SILVA. 2012):

- a) Processo bem mais caro;
- b) Necessidade de conhecimento quanto ao uso do equipamento;
- c) Alto consumo de energia e sofisticação do equipamento.

No processo de secagem artificial, o uso de técnicas para o aumento da taxa de secagem artificial se faz bastante necessário e esses componente já se dispõem em alguns secadores mais sofisticados, devido o uso da energia calorífica ou mecânica (movimento da velocidade do ar).

Segundo Pereira (2015), a viabilidade para secagem do processo artificial da mamona é compensada em, áreas igual ou superior a 50 hectares, com temperatura ideal entre 50 a 55°C (RIBEIRO FILHO, 1966). No entanto, Moshkin (1986) recomenda 35° e 40°C para a secagem da semente é de 40° a 50°C para a secagem do fruto. A secagem da mamona apresenta peculiaridades que a diferem dos demais produtos agrícolas, como é o caso da pequena contração do tegumento durante o processo de dessecção (GONELI et al., 2010; ZUCHI, 2009).

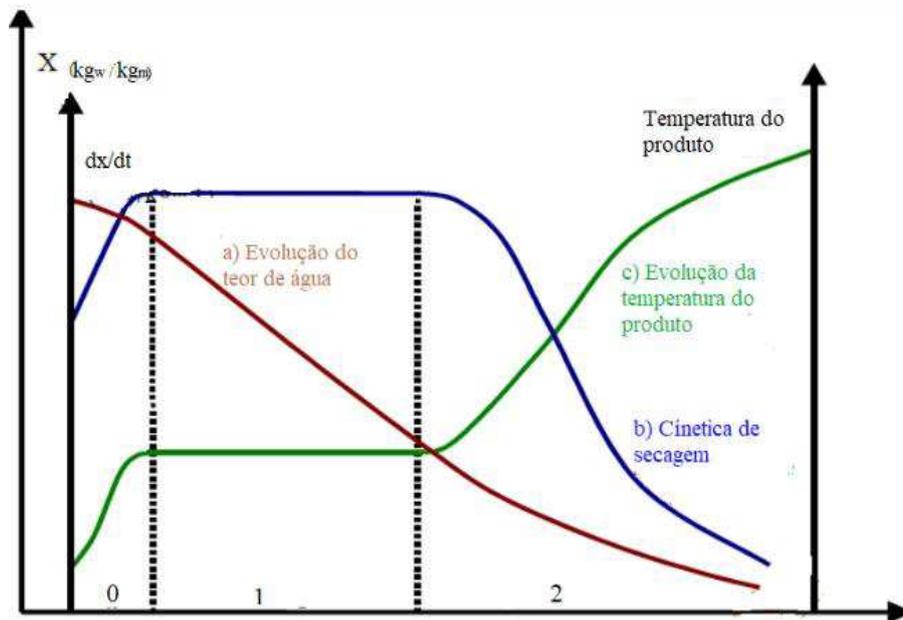
De acordo com Moshkin (1986), no processo de secagem de mamona, a temperatura suportada pelas sementes de mamona depende da sua umidade inicial e da duração da ação do calor, porém o nível crítico de umidade das sementes de mamona, para um armazenamento seguro, é de 7 a 7,5%. Macedo (1984) afirma que a umidade ideal dos frutos de mamona no final do processo de secagem, seja ele natural ou artificial, é de 10%.

Escassos são os trabalhos na literatura que tratam sobre secagem de frutos de mamona, principalmente o da cultivar BRS Energia. A mamona cultivar BRS Energia foi desenvolvida em rede pela EMBRAPA, EBDA e EMPARN e lançada em 2007. Os frutos são verdes com cera e indeiscentes, enquanto que as sementes pesam entre 0,40 g e 0,53 g com as cores marrom, preto e bege, contendo 48% de óleo.

2.2.2 Curvas de secagem

Pode-se descrever o processo de secagem em três etapas clássicas apresentadas na Figura 2.15. No início da secagem ocorre elevação da temperatura do produto e da pressão de vapor da água. Nesse instante, a taxa de secagem é crescente, devido a umidade relativa do ar na camada limite ser menor que 100%, ocorrendo o que se costuma chamar de acomodação. Tais elevações prosseguem até o ponto onde aconteça equivalência entre transferência de calor e massa (água), ou seja, o período de taxa constante. No início da secagem, o produto encontra-se totalmente úmido e a água escoou na fase líquida, sobre um gradiente hidráulico e, em condições naturais, a temperatura do produto se iguala a temperatura do bulbo úmido. No período de taxa constante, a água evaporada é água livre e enquanto houver umidade superficial para acompanhar o processo de evaporação, a taxa será constante (BROOKER et al., 1992; LIMA et al., 2017).

Figura 2.15 - Curva de secagem típica. Fonte: Park et al. (2014).



A medida que a secagem prossegue e tenha passado pelo o ponto de umidade crítica (teor de umidade em que a água deixa de comportar-se como água livre), o teor de umidade decresce e a água na fase líquida faz a ligação entre as partículas sólidas (produto) formando as pontes líquidas. A partir desse ponto inicia-se o período de taxa de secagem decrescente. Neste período, ocorre uma redução de migração de umidade do interior para a superfície do produto e a transferência de calor não é equivalente à transferência de massa. A temperatura

do produto supera a temperatura do bulbo úmido até atingir a temperatura do ar de secagem ou temperatura do bulbo seco. Finalmente, a secagem ocorre no interior do produto e o teor de umidade de equilíbrio é atingido quando a quantidade de água evaporada se iguala à quantidade condensada (BROOKER et al., 1992). A curva de secagem está dividida em três períodos 0, 1 e 2.

Período 0 é o de primeiro contato do produto com o ar aquecido no interior do secador. O produto está com temperatura inferior à do ar de secagem. A pressão parcial de vapor da água na superfície do produto é baixa, por essa razão, a transferência de massa e velocidade de secagem é lenta. Devido ao calor, o produto começa a aquecer, como consequência desse aquecimento, a pressão no interior do produto tende a aumentar, contribuindo assim para um aumento na velocidade da secagem. Esse fenômeno continua até que a transferência de calor compense exatamente a transferência de massa. Se a temperatura do ar de secagem for menor do que a do produto, este tenderá a diminuir sua temperatura, entrando assim em estado de equilíbrio (PARK et al., 2014).

Período 1 é o da velocidade e taxa de secagem constante, ainda continua elevado o nível da água disponível, assim essa água se evapora como água livre. É constante a pressão de vapor da água na superfície e igual portanto a pressão de vapor da água para a temperatura do produto. A temperatura do produto também é constante e é igual a temperatura de bulbo úmido e isso significa dizer que as características entre transferência de calor e de massa entra em equilíbrio, a velocidade de secagem torna-se assim constante (MENDONÇA et al., 2015).

Período 2, é enquanto a migração de água do interior até a superfície do produto seja suficiente para acompanhar a perda por evaporação de água na superfície, nesse caso existe uma continuidade deste período ou seja, o período 2 continua. Nos materiais biológicos torna-se bastante difícil visualizar a existência deste período, pois as condições operacionais de secagem são tais que, as resistências de transferências de massa encontram-se essencialmente no interior do produto, fazendo com que a taxa de evaporação da superfície ao ambiente seja bem superior à taxa de reposição de umidade do interior à superfície do material (PARK et al., 2014).

O mesmo autor comenta também que durante o processo de secagem, a umidade no interior do sólido movimenta-se até a superfície por meio de diferentes mecanismos. Os mecanismos mais importantes são:

- a) Difusão líquida. Este mecanismo torna-se complexo devido à diversidade da composição química e estrutura física dos produtos;
- b) Difusão de vapor. Este processo sobre gotículas de nuvem ocorre, devido ao gradiente de pressão de vapor, causado pelo gradiente de temperatura necessário para vaporizar a água líquida contida no produto (MASSAMBONI 2006; PEREIRA 2015).
- c) Escoamento de líquido e de vapor. Isto acontece devido a diferença de pressão total, causada por pressões externas tais como: capilaridade, contração e alta temperatura.

2.2.3 Fundamentos da migração de umidade em produtos agrícolas

Numa economia onde os modernos sistemas mercadológicos juntos com novos conceitos de globalização, formando assim um processo bem mais dinâmico, a distribuição dos produtos agrícolas e outros produtos biológicos estão crescendo, exigindo assim um processo de secagem moderno e eficiente, necessário para assegurar e garantir mais estabilidade durante o armazenamento e o transporte, isso ocorre graças ao teor de umidade reduzido e, conseqüentemente, a indisponibilidade de água para (FOOD SAFETY BRASIL 2016):

- a) A regeneração de fungos e bactérias, que causam degradação microbiológica;
- b) O processo de respiração dos alimentos, que provoca perda de peso e gera calor;
- c) A ocorrência de reações bioquímicas que promovem a auto degradação do produto.

A água no interior do produto pode ser do tipo livre ou ligado. A água livre é fracamente retida e ocupa os espaços intergranulares. A água ligada é aquela que está intimamente ligada as moléculas constituintes do produto, não podendo ser removida ou utilizada para qualquer tipo de reação, onde o metabolismo dos micro-organismos são paralisado, não havendo desenvolvimento ou reprodução e pode portanto, ser responsável pela degradação do produto (PARK et al., 2007; PEREIRA, 1015).

Por outro lado, a água de constituição (água ligada) é aquela que se encontra quimicamente combinada com as demais substâncias orgânicas na parede do sólido. Segundo autores, essa ligação é tão íntima que só é interrompida com a alteração completa da composição química do sólido; a água de constituição é parte integrante da estrutura celular do sólido (PEREIRA, 2015; REZENDE, 2009).

2.2.4 Processos de adsorção e dessorção

O processo de secagem é complexo, seja na adsorção ou dessorção, razão essa de poder conservar por um longo período um alimento seco, que um similar "in natura", uma vez que, o baixo nível de umidade dificulta a ação das enzimas, que necessitam desse meio para agirem na estrutura das moléculas dos alimentos. Assim, os micro organismos que causam a deterioração do produto, não evoluem por não se multiplicarem em ambientes com baixa umidade (FIOREZE, 2003; BIAGE et al., 1993).

A água de adsorção (água livre) é a água que está fortemente retida e atraída por forças capilares nos interstícios do material sólido. É qualificada pela habilidade de sólidos porosos reterem, através de interações físicas ou químicas, as moléculas de um componente de uma mistura, separando assim os componentes dessa mistura, tais como o amido, açúcares e ácidos (PEREIRA, 2015; GUELFY, 2007).

Normalmente a água adsorvida (a livre) é removida durante o processo de secagem, pois envolvem para sua retirada um baixo nível de energia, conhecido como calor latente de vaporização. Por ser um processo de eliminação de líquido por evaporação, é necessário para tal procedimento um fornecimento de calor e um sorvedor para remoção do vapor de água formado na superfície do sólido a ser seco (PEREIRA, 2015; ALVES, 2014).

Baseado na complexidade do processo de secagem, várias teorias e inúmeros modelos de secagem foram desenvolvidos para os períodos de taxa de secagem constante e decrescentes, tais como:

2.2.4.1 Taxa de secagem em regime constante

A taxa inicial de secagem de produtos biológicos com teor de umidade igual a 70 e 75%, sucede em função de três parâmetros, que são: velocidade do ar, temperatura do ar e umidade relativa do ar. O produto a ser seco comporta-se como uma superfície em fina camada de água. Com a umidade relativa do ar constante e taxa de secagem constante. A constância da taxa de secagem pode ser observada em produtos onde a resistência interna durante o transporte de umidade oferece menos resistência do que a remoção de vapor de água a partir da superfície externa do produto (BROOKER et al., 1992).

Devido ao comportamento de água sobre a superfície, a pressão de vapor de água na superfície é constante sendo igual à pressão de vapor de água para a temperatura do produto (PARK, 2007; DOPHEIDE et al., 2013; PEREIRA, 2015).

Para os produtos agrícolas, a taxa de secagem constante ocorre quando o teor de umidade inicial do sólido é muito alto ou quando segundo Pereira (2015), o potencial de secagem do ar for muito baixo. O término do período de taxa constante só cessa quando, a migração interna da água para a superfície não consegue mais suprir a taxa de evaporação da água livre na superfície do produto (DOPHEIDE et al., 2013).

Os grãos não apresentam um período de secagem com taxa constante, a menos que sejam colhidos num estado muito imaturo. (SIMMONDS, 1976) relataram que o período de secagem de taxa constante do trigo por exemplo, é de 50-55% (w.b). Muitos outros produtos agrícolas, tais como batata e beterraba sacarina, exibem inicialmente um comportamento de secagem constante desidratado sob condições ambientais constantes.

No entanto, apesar disso tudo, os modelos teóricos não conseguem prever, com precisão, o teor de umidade de equilíbrio de grãos, em todas as faixas de temperatura e umidade relativa do ar. (CORRÊA et al., 2005; PARK et al., 2002; RESENDE et al., 2008; PARK et al., 2007; COSTA et al., 2015; PEREIRA, 2015).

2.2.4.2 Período de taxa de secagem decrescente

Com a ocorrência do período de queda da taxa de secagem, o produto já não mantém o mesmo comportamento e segundo SIMIONI et al. (2008), de forma independente da umidade

de colheita, a taxa de secagem como já mostrado anteriormente (Figura 2.15) decresce com a elevação da temperatura de secagem, em razão da umidade relativa e da taxa de evaporação da água contida nos grãos. Logo de início a taxa de secagem tende a ser maior, devido à baixa resistência que a água oferece para ser removida. Após um curto intervalo de tempo, a taxa de secagem diminui, isso devido à resistência da água para ser removida do grão. Essa dificuldade provoca a queda da taxa de secagem, ficando mais acentuada cada vez que a umidade final do grão for menor.

À medida que o teor de umidade do produto cai abaixo do ponto crítico, isso altera seu potencial de condução durante todo processo de secagem, gerando assim gradientes de temperatura e umidade dentro do produto. O processo de secagem não consiste em simplesmente pegar o material, colocar no forno e no final sair um produto seco. Tecnicamente, é preciso ter cuidado com a secagem, pois se o produto for seco de forma errada pode lhe acarretar sérios danos, tipo: a perda na qualidade final do produto, o desperdício de energia e mão de obra, entre outros. Os modelos matemáticos existem para descrever determinados fenômenos e buscam sanar algumas irregularidades que ocorrem durante esses processos. Numerosos modelos de camada fina tem sido propostos para descrever a taxa de perda de umidade durante a secagem de produtos agrícolas, podendo ser divididos em dois grandes grupos:

- a) Modelo concentrado - Os modelos concentrados descrevem as taxas de transferência de calor e massa para todo produto, ignorando a resistência interna de transferência de calor e massa.
- b) Modelo distribuído – Esse tipo de modelo representa a taxa de transferência de calor e massa como função da posição dentro do produto e do tempo de secagem, considerando as resistências externa e interna. Para descrever esse modelo distribuído, várias teorias de transportes foram descritas:

b1) Teoria da difusão líquida, é devido a gradientes de concentração de umidade e segundo Correa et al. (2006), a difusão líquida tem sido o principal mecanismo de difusão da água;

b2) Teoria de líquido por forças capilares essa teoria é baseada no conceito do potencial capilar, definido como a diferença de pressão entre a água e o ar na interface, água - ar presente em um capilar;

b3) Teoria de Luikov tem como base os princípios da Termodinâmica irreversível de não equilíbrio levando em consideração os mecanismos de difusão, efusão e convecção de água no interior do meio poroso (FORTES e OKOS, 1980).

2.3 Secadores

O processo de secagem possui eficiência quando executado através de secadores. Existem diferentes tipos de secadores, como flash, transportador, tambor, de leito fluidizado, vácuo, giratório, spray e secadores tipo ciclone. Eles são de diferentes tamanhos, formas e variedades. Devido as características das partículas do material a ser seco (exemplo, teor de umidade, distribuição do tipo de partícula, dureza, conteúdo do pó, qualidade de escoamento, cor, odor, aparência, consistência, dissolução, tendência a aglutinação, etc.). Cada grupo de material será direcionado a um secador específico (ou classe de secadores), de um modo descontínuo ou como uma operação contínua.

2.3.1 Tipos de secadores

2.3.1.1 Secadores em leito fixo

Seu modo de operação consiste em forçar um fluxo de ar quente através da massa do produto que está em repouso. Seu processamento é executado da base para o topo de camada de grãos, e do centro para a periferia em secador de tubo central perfurado.

Martins (2015) dimensionou, avaliou e construiu um secador experimental com controle de temperatura e velocidade do ar de secagem, objetivando estudar a secagem de produtos agrícolas em camadas delgadas. Esse projeto foi dividido em três etapas: dimensionamento da fonte de aquecimento, dimensionamento geométrico da estrutura do secador e seleção do ventilador para suprir a demanda operacional do secador. Dividiu a execução do projeto em

duas etapas, sendo a primeira a construção da estrutura do secador e a segunda a automação do controle de temperatura e velocidade do ar. Em seguida, avaliou a cinética de secagem em camadas delgada para avaliar a eficácia do secador. Segundo Pascoal (2016), o produto escolhido para secagem foi o grão de cártamo, que é uma planta com grande capacidade de produção de óleo, com grande potencial para produção de biodiesel, sendo submetidos a secagem, com variados níveis de temperatura (40, 50, 60, 70, 80 e 90°C) e velocidade controlada do ar (0,4 1,0 e 1,6 m/s).

2.3.1.2 Secador em fluxo concorrente

O movimento do ar e do produto se processa em um mesmo sentido. O ar mais quente atravessa o grão mais úmido, e a alta taxa de evaporação acelera o resfriamento desse ar, o que possibilita o uso de temperaturas mais elevadas que as de fluxo cruzados (PEREIRA 2015). Este tipo de secagem é de apenas um estágio, por essa razão o resfriamento se dá em fluxo contra concorrente, e não é muito usado, nos processos de secagem.

2.3.1.3 Secador de fluxo contra concorrente

Neste tipo de secador o ar quente e o produto se movem em sentido contrário, ou seja, enquanto os grãos descem pela torre, o ar aquecido passa por entre os grãos. A medida que o grão vai descendo pela coluna de secagem sua temperatura vai sendo gradualmente aumentada, e atinge o valor máximo no final de coluna de secagem, coincidindo com o ponto de entrada do ar aquecido. O sistema de seca-aeração é o mais indicado para este tipo de secador, devido a elevada quantidade de energia armazenada na forma de calor sensível.

2.3.1.4 Secador de fluxo cruzado

Para este tipo de secador, as direções e sentidos de fluxos são perpendiculares, ou seja, enquanto o produto se desloca o ar quente flui através dele, atravessando perpendicularmente.

Por serem de simples construção e menor custo de manutenção, são os mais utilizados em todo mundo. Os modelos existentes aqui no Brasil são de baixa intensidade, operando de forma intermitente, e de baixa produção, operando um lote de cada vez.

O secador convencional apresenta uma grande desvantagem, que é a formação de gradientes de temperatura e de teor de umidade ao longo da massa do produto. Para atenuar essas desvantagens, várias modificações tem sido feitas no seu projeto, visando principalmente reduzir os gradientes de teor de umidade e melhorar a eficiência energética de secagem.

2.3.2 Eficiência energética da secagem e dos secadores

Devido à crescente interesse de poupar energia e minimizar emissões de poluentes (gás de efeito estufa) é crucial se analisar diferentes tecnologias de secagem, a fim de economizar energia, fornecer produtos de alta qualidade pós-processamento, de acordo com as leis de produção ambiente.

O processo de secagem apresenta-se como um grande vilão no que diz respeito a emissão de gases de efeito estufa (GEE). A emissão do GEE na atmosfera é causada pela emissão do carbono (CO_2), metano (CH_4) e do óxido nítrico (N_2O). Segundo Oliveira et al. (2014), o equilíbrio energético do planeta pode ser afetado pelo efeito estufa, ocasionando um fenômeno complexo conhecido como aquecimento global. Segundo Baker (2004), O consumo de energia de um secador típico convectivo ao longo de sua vida útil é equivalente a 85% do consumo dos secadores industriais (OLIVEIRA et al., 2013; MELO et al., 2013).

Então, é crucial uma compreensão exata do desempenho (gasto útil ou desperdício) do secador durante toda sua etapa de produção. Por essa razão, a temperatura, e o balanço de massa entre o produto úmido e o ar fornece um padrão adequado para determinar a eficiência do secador. O processo de secagem consiste de uma operação, sendo responsável por até 15% do consumo de energia da indústria. Em alguns casos, com uma eficiência térmica de 25-50%.

O percentual de energia gasta nos processos de secagem está ilustrado na Tabela 2.2. Observa-se que grandes percentuais de energia são gastos, o que torna, segundo Leonel (2014), a necessidade de estudos técnicos de análise de projetos essenciais para melhoria e confecções de secadores modernos.

Tabela 2.2 – Gastos energéticos com secagem em algumas indústrias. Fonte: Leonel (2014)

Indústria	Secagem (%)
Indústria madeireira	70
Indústria têxtil	50
Produção de papel	27
Produção de polpas	33

O consumo de energia para a secagem foi estimada com base na potência nominal do secador, fornecida no eixo e no tempo de funcionamento. Assim, para calcular a energia, duas razões principais que foram levadas em conta, podem ser definidas como segue:

- a) Economia de tempo (Et)

$$Et = \frac{\text{Duração convectiva da secagem} - \text{Duração da secagem combinada}}{\text{Duração convectiva da secagem}} \quad (2.32)$$

- b) Economia de energia (Ee)

$$Ee = \frac{\text{Consumo de energia por convecção} - \text{Consumo combinado de energia}}{\text{Consumo de energia na secagem por convecção}} \quad (2.33)$$

O calor no processo de secagem é usado para remoção de água ou qualquer outro líquido da parte sólida por evaporação, por meio da utilização da temperatura inferior à temperatura de ebulição do líquido. Segundo Andrade. (2011), o processo se desenvolve através de um fluxo de ar aquecido, pelo produto, induzindo de pressão de vapor entre a parte externa do produto e o ambiente. A gama de secadores é vasta, de modo que não é possível propor um método generalizado para a determinação da eficiência deste. A performance do secador e o processo de secagem é caracterizado através de vários índices como, taxa de evaporação volumétrica, perdas de calor da superfície, unidade de consumo de calor e eficiência térmica de energia.

Há uma grande discussão sobre o método adequado para calcular eficiências energéticas. Todos possuem os mesmos objetivos, que é o de permitir uma comparação entre diferentes secadores e tipos de processos de secagem existentes. Um dos meios mais adequado para calcular a eficiência energética (η), é através da razão, energia necessária E_n , pela energia fornecida E_f , como segue (MUJUMDAR, 2006).

$$\eta = \frac{E_n}{E_f} \quad (2.34)$$

Para o cálculo da eficiência energética (η), diversos fatores pode não ser levado em conta, como é o caso de entradas de ar falsas ou perdas de energia que não estejam associadas diretamente à câmara de secagem (perda de calor antes da entrada na câmara de secagem ou perdas do ar quente por frestas etc).

No entanto, a eficiência energética pode ser calculada para o processo de secagem como um todo (energia total energia necessária e energia total fornecida) ou de forma instantânea (energia necessária e energia fornecida em determinado tempo), apenas para a secagem no interior da câmara, não levando em conta, outros tipos de variações de energias.

Os secadores convectivos típicos respondem por cerca de 85% de todos os secadores industriais (MUJUMDAR, 2006). O processo de secagem consiste geralmente de ar quente ou gases de combustão. A eficiência energética para secadores do tipo convectivo, η_{cov} , é geralmente calculado com base na temperatura de secagem no início do processo (T_{in}) e final do processo, (T_{fi}) e temperatura ambiente, T_{amb} . Pode ser definida assim como segue:

$$\eta_{cov} = \frac{T_{in} - T_{fi}}{T_{in} - T_{amb}} \quad (2.35)$$

Segundo Raghavan et al. (2005), a temperatura do meio de aquecimento não pode cair abaixo da temperatura do bulbo úmido (T_{bu}). Assim a Equação (2.36) assume uma nova forma e a eficiência máxima de um secador por convecção é dada por:

$$\hat{\eta} = \frac{T_{in} - T_{bu}}{T_{in} - T_{amb}} \quad (2.36)$$

Outra desvantagem das Equações (2.35) e (2.36) é que a eficiência energética cumulativa só é verdadeira se todas as temperaturas permanecerem constantes, e se a temperatura de saída for representativa do processo durante todo processo de secagem. Assim, Grabowski et al. (2002) e Kudra (1998) definem a eficiência energética instantânea, η_{inst} , como sendo:

$$\eta_{inst} = \frac{\text{Volume de evaporação no tempo } t}{\text{Energia usada no tempo } t} \quad (2.37)$$

A eficiência energética cumulativa, η_c , pode ser calculada integrando a Equação (2.37) em relação ao tempo, como segue:

$$\eta_c = \frac{1}{t} \int_0^t \eta_{ins}(t) dt \quad (2.38)$$

A eficiência energética acumulativa é semelhante a equação (2.36), se a temperatura de saída na Equação (2.37) for calculada como uma média integral, sobre o mesmo tempo de secagem (RAGHAVAN et al., 2005). As equações (2.37) e (2.38) são afetados pelas propriedades do material, tipo de secador e configuração, parâmetros operacionais e conteúdo de umidade inicial e final. Também deve ser levado em conta o calor necessário para aquecer o material até a temperatura de secagem, juntamente com quaisquer alterações na temperatura do produto, assim pode ser que o calor fornecido durante o processo de secagem, seja necessário para remover a água através de capilaridade, o que termina sendo uma grande contribuição quanto sua eficiência global. No entanto, não descreve a capacidade necessária de calor para remover a umidade do produto. Segundo Kudra (1998), a eficiência de secagem instantânea, ε_{ins} , pode ser definida como:

$$\varepsilon_{ins} = \frac{\text{energia de evaporação usado no tempo } t}{\text{entrada de energia} - \text{saída de energia com gás no instante } t} \quad (2.39)$$

A equação (2.39) também pode ser integrada para fornecer eficiência de secagem cumulativa (ε_c), definida por:

$$\varepsilon_c = \frac{1}{t} \int_0^t \varepsilon_{ins}(t) dt \quad (2.40)$$

Segundo Koop (2014), a minimização do consumo de energia no secador pode ser encontrado através de vários métodos, tais como:

- a) Reduzindo a energia do secador, com a redução da água do alimento;
- b) Através da redução da perda de calor, fluxo de ar, pode-se aumentar o desempenho energético do secador;

- c) Reaproveitando a energia de saída do secador;
- d) A recuperação de calor dentro do sistema de secagem, entre os fluxos quentes e frios;
- e) Usando fontes de calor de baixo custo para suprir a necessidade de calor;
- f) Combinando calor e eletricidade, através de co-geração de energia;
- g) O uso de bombas de calor para recuperar o calor residual com o propósito de reaproveitar o aquecimento do secador.

Como os aspectos energéticos estão fortemente relacionados com o desenvolvimento sustentável. Assim, o uso de energia está também intimamente ligado com problemas ambientais globais, particularmente as alterações climáticas. Neste cenário, o aumento do uso de biocombustíveis constituem um esforço para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa (CO₂ que representam 80% das emissões de gases) aumentando assim capacidade dos secadores (BERGHEL et al., 2007).

Como os aspectos energéticos estão fortemente relacionados com o desenvolvimento sustentável. A benfeitoria em termos de eficiência energética de um secador de grãos convencional pode incluir (VAN, 1998):

- a) A diminuição de tempo de secagem;
- b) Fornecimento de calor para o interior do secador;
- c) Isolamento térmico (redução das perdas de calor);
- d) Redução do consumo de agente de secagem (baixo vazão de ar);
- e) Recuperação do gás de saída e/ou produto seco quente.

Além disso outras fontes podem ser usada para o aquecimento do ar de secagem como: combustíveis fósseis (gás natural, propano, diesel e querosene), energia elétrica; carvão; resíduos e energias renováveis (solar e biogás), têm sido continuamente usadas por muitos anos (STRUMILLO, 2006).

Os principais métodos de recuperação do calor (sensível ou latente) são:

- a) Uso de forma indireta através da troca de calor gás/gás ou gás/líquido;

- b) Reciclagem do ar;
- c) Utilização de bomba de calor para converter o baixo nível de energia do escape a um nível elevado;
- d) Combinação de diferentes métodos.

2.3.3 Fontes de energia

A indústria e as atividades agrícolas, em conjunto com o desenvolvimento populacional requerem mais sofisticadas técnicas nas formas alternativas de produção e aproveitamento da capacidade e geração de energia.

Todos os recursos de fontes de energia são testados e avaliados, tudo isso em prol da agressão ao meio ambiente, indicados como um elemento considerável de desequilíbrio ao ecossistema (PASSINI, 2014).

Segundo Gomes (2015), o sol é o responsável direto pela geração de fontes de energia não renováveis, tais como o petróleo, carvão e gás naturais, porque é dele e por eles que as plantas e os animais se desenvolvem e seus resíduos geram fontes de energia alternativas. A energia solar induz à movimentação do ar ambiente que por sua vez cria os ventos que impulsionam pás, surgindo assim à energia eólica e causa a evaporação das águas possibilitando a energia hidrelétrica. Assim, a energia solar é a origem de quase todas as outras fontes de energia (GOMES, 2015).

O uso de fontes não renováveis, proveniente dos combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural), aceleram os riscos ambientais enquanto que a utilização de fontes renováveis (solar, eólica, hidráulica), atenuam esses danos.

CAPITULO 3

METODOLOGIA

3.1 Sementes de mamona, material utilizado no experimento

A matéria prima usada para secagem no secador de fluxo contínuo foi a semente de mamona do tipo BRS 188 Paraguaçu, gentilmente cedida pela EMBRAPA Algodão (Campina Grande/PB). A Figura 3.1 ilustra um plantio de pés de mamona do tipo BRS Paraguaçu em fase de crescimento, enquanto que a Figura 3.2 mostra a imagem de uma plantação da mamoeira em fase jovem e adulta, cultivadas pela EMEPA - PB, no município de Lagoa Seca - PB. A Figura 3.3 ilustra a mamoeira na sua fase adulta e com frutos.

A BRS 188 Paraguaçu possui um porte médio e de altura 1,6 m, caule de coloração roxa e coberto de cera, racemo oval e frutos semi-deiscentes, sementes grandes e de cor preta pesando a cada 1000 sementes aproximadamente 71g, contem 48% de óleo. Com 50 dias começa a florar, esse cultivar foi desenvolvido exclusivamente para o semiárido, com uso na agricultura familiar, com plantio e colheita manual, ciclo longo (250 dias se houver disponibilidade de água) com boa tolerância à seca. Tem susceptibilidade moderada ao mofo cinzento. Em condições normais, com fertilidade do solo mediana e pelo menos 500 mm de chuva pode produzir 1500 kg/ha de sementes a cada ano (COSTA et al., 2014).

Figura 3.1- Pés de mamoeira do tipo BRS Paraguaçu em estágio inicial de crescimento. Fonte: EMEPA (2015).



Figura 3.2 – Plantio de mamonas em fase jovem. Fonte: EMEPA (2015).



Figura 3.3 – Frutos de mamona em fase adulta com frutos. Fonte: Pereira (2015).



Como ilustra a Figura 3.3, os frutos da mamoeira são capsulas globosas, ou bagas com medida aproximada de 2,4 cm, seus frutos com espinhos apresentam variações quanto à cor, cerosidade, forma, tamanho, deiscentes ou seja, quando os frutos não se abrem espontaneamente (PEREIRA, 2015).

3.2 Procedimentos experimentais para secagem das sementes

Nesta pesquisa foram realizadas testes experimentais de secagem das sementes em estufa e secador do tipo esteira contínuo de fluxos cruzados. A Figura 3.4 ilustra o fruto colhido (cachopa) da mamoeira e a Figura 3.5 ilustra a semente do tipo BRS Paraguaçu contida no interior do fruto da mamona.

3.2.1 Secagem da semente da mamona em estufa

A Figura 3.4 ilustra o fruto da mamona do tipo BRS Paraguaçu em seu estado virgem, enquanto que a Figura 3.5 mostra a semente de mamona no interior do cesto com suas dimensões medidas (comprimento, espessura e largura), umidade determinada e peso conferido. Para as realizações dos testes em estufa uma amostra de 30 sementes de mamona foi selecionada e posta dentro do cesto, tendo assim início todo processo de secagem, A Figura 3.6 ilustra o aspecto visual da semente de mamona do tipo BRS Paraguaçu.

Figura 3.4 – A cachopa (frutos da mamona). Fonte: Autor (2017).



Figura 3.5 – Sementes do tipo BRS Paraguaçu, no interior do cesto. Fonte: Autor (2017).



Figura 3.6 – Sementes de mamona. Fonte: Autor (2017).



Figura 3.7 - Sementes de mamona variedade: BRS Paraguaçu. Fonte: Autor (2017).



Posteriormente, o recipiente contendo estas sementes foi colocada no interior da estufa, como ilustra a Figura 3.8, sob condições de secagem controladas (40, 50, 60, 70, 80 e 90°C). Em tempos pré-estabelecidos, a amostra era retirada da estufa, possibilitando assim a medida da temperatura e massa dos grãos, e temperatura e umidade relativa do ar fora da estufa, sendo posteriormente recolocada na estufa. Este procedimento se repetia até a amostra atingir massa constante. Na fase inicial, foram realizadas 10 medições de 5 em 5 minutos. Depois foram realizadas 3 medições de 10 em 10 minutos, seguidas de 2 medições de 15 em 15 minutos. Posteriormente, as medições passaram a ser de 30 em 30 minutos e finalmente de 60 em 60 minutos. Depois dessa fase, a amostra permaneceu na estufa por mais 24 horas até atingir a condição de equilíbrio. Na fase final de cada processo de secagem, retiravam-se as sementes e mediam-se suas dimensões e temperatura final, finalizando assim o processo de secagem. A partir desse instante, a temperatura da estufa foi variada para $105 \pm 1^\circ\text{C}$, onde a amostra, no interior da estufa permaneceu por mais 24 horas até atingir a sua massa seca.

Neste momento dava-se início ao processo de secagem da semente BRS Paraguaçu com cada cesto pesando 30 g. A Figura 3.9 ilustra a amostra sendo pesada em uma balança digital de marca Marte, com precisão de 0,01g. A Figura 3.10 ilustra o paquímetro digital de marca Messen, com precisão de 0,01mm, usado nos experimentos.

Figura 3.8 - Amostras no interior da estufa. Fonte: Autor (2017).



Figura 3.9 - Amostra no interior do cesto sendo pesada na balança digital. Fonte: Autor (2017)



Figura 3.10 - Paquímetro digital usado nos experimentos. Fonte: Autor (2017).



Para medição da temperatura das sementes utilizou-se um termômetro de infravermelho da marca BENETECH – GM 300, com resolução de 0,1°C conforme Figura 3.11.

Figura 3.11 – Termômetro de infravermelho usado nos experimentos. Fonte: Autor (2017).



A Tabela 3.1 resume as condições experimentais do ar e sementes de mamona para a secagem em estufa.

Tabela 3.1 – Condições experimentais (inicial) das sementes de mamona e ar de secagem no interior, para secagem em estufa.

Teste	Secagem em estufa								
	Semente da mamona			θ	M_0	M_{eq}	Ar de secagem		
	a (mm)	b (mm)	c (mm)	(°C)	(kg/k)	(kg/kg)	T(°C)	UR(%)	V(m/s)
1	17,90	7,58	13,87	26,70	0,15	0,03	40	31,15	0,04
2	17,90	7,59	13,87	27,30	0,11	0,03	50	18,96	0,05
3	17,46	7,22	13,35	26,50	0,10	0,04	60	11,05	0,06
4	17,34	7,48	13,60	27,10	0,12	0,03	70	7,21	0,07
5	17,49	7,53	13,61	26,90	0,10	0,03	80	4,01	0,08
6	17,49	7,22	13,53	26,80	0,11	0,04	90	2,84	0,09

3.2.2 Secagem da semente de mamona BRS 188 Paraguaçu em secador de esteira e fluxos cruzados

A Figura 3.12 ilustra o cesto com grãos no interior do secador de esteiras e fluxos cruzados. Inicialmente selecionou-se a mesma quantidade de sementes de mamona da variedade BRS Paraguaçu de modo análogo ao utilizado em estufa. Em seguida foram medidas as dimensões do grão (comprimento, largura e espessura), da massa e temperatura da superfície dos grãos, bem como a temperatura e umidade relativa do ar ambiente fora do secador. Em seguida, as amostras foram levadas ao interior do secador de fluxos cruzados já previamente aquecido. Nesse processo, a temperatura interna do secador foi fixada na

temperatura desejada (40, 50, 60, 70, 80 e 90°C) através do controlador de temperatura e velocidade do ar estabelecido pelo ventilador.

Figura 3.12 – Semente de mamona no interior do secador de fluxos cruzados. Fonte: Autor (2017).



O secador de fluxos cruzado contém três câmaras de secagem. Cada câmara contém duas esteiras que se deslocam em sentidos contrários. Assim, devido a configuração do secador de fluxos cruzados, a secagem foi realizada de duas formas: a primeira, com a esteira estática, e a segunda, com a esteira em movimento. Com a esteira estática, o procedimento experimental foi semelhante (intervalo de tempo) ao experimentado para a secagem em estufa.

A segunda etapa do processo de secagem realizada com a esteira em movimento e o secador já previamente aquecido (Figura 3.13). As amostras foram dispostas no início da esteira em movimento, com velocidade previamente estabelecida. Em intervalos pré-definidos, as amostras eram retiradas do secador a cada 32 minutos, que foi o tempo que a amostra gastou para percorrer o comprimento da esteira. Após retirada do secador, a amostra foi pesada e sua temperatura previamente medida. Logo após esses procedimentos, a amostra retornava ao interior do secador na mesma posição inicial, até obtenção da massa de constante. Na sequência, a amostra foi posta no interior da estufa previamente aquecida com as mesmas condições de secagem do secador para obtenção da massa de equilíbrio. Posteriormente, alterava-se a temperatura no interior da estufa para 105°C, por mais um período de 24 horas para obtenção da massa seca.

A Figuras 3.14, ilustra uma cesta de tela com amostras da semente de mamona do tipo BRS Paraguaçu sobre uma das seis esteiras, no interior de secador de fluxos cruzados, momentos antes de sua pesagem.

Figura 3.13 - Secador de esteiras e fluxos cruzados. Fonte: Autor (2017).



Figura 3.14 – Semente de mamona após trajeto percorrido no secador de fluxos cruzados.

Fonte: Autor (2017).



3.3 Procedimentos teóricos.

3.3.1 Parâmetros gravimétricos

3.3.1.1 Massa de água total perdida

A metodologia para o cálculo da massa de água perdida por cada amostra da semente de mamona (m_a), para cada condição experimental, foi realizado baseado no valor da massa inicial das sementes de mamona (m_0) e na massa das sementes secas (m_s), do seguinte modo:

$$m_a = m_0 - m_s \quad (3.1)$$

Tabela 3.2 – Condições experimentais (inicial) das sementes de mamona e ar de secagem no interior, para secagem em secador com esteira estática.

Secador esteira estática								
Teste	Dimensões das Sementes de mamona			θ_0	M_0	Ar de secagem		
	a (mm)	b (mm)	c (mm)			(°C)	(kg/kg).	T(°C)
1	17,86	7,48	14,49	26,70	0,11	40	30,67	0,823
2	17,86	7,48	14,49	27,30	0,11	50	11,66	0,823
3	17,54	8,27	14,80	26,5	0,12	60	9,81	0,823
4	17,37	7,50	13,60	27,10	0,10	70	7,21	0,823
5	17,45	7,52	14,44	26,90	0,11	80	4,54	0,823
6	14,50	7,52	14,83	26,80	0,13	90	3,07	0,823

3.3.1.2 Teor de umidade em base úmida

O cálculo do teor de umidade em base úmida para cada amostra ($M_{b.u.}$), em cada tempo de medição, foi realizado com base no valor da massa da água m_a das sementes de mamona e da massa dos grãos úmidas ($m_a + m_s$) do seguinte modo:

$$\bar{M}_{b.u.} = \frac{m_a}{m_a + m_s} \quad (3.2)$$

3.3.1.3 Teor de umidade em base seca

Para o cálculo do teor de umidade em base seca para cada amostra ($M_{b.s.}$), em cada tempo de leitura, tomou-se como base o valor da massa de água das sementes de mamona m_a e o valor de massa das sementes de mamona seca (m_s). O cálculo do teor de umidade em base seca em cada tempo da medição foi determinado pela seguinte equação, como segue:

$$\bar{M}_{b.s.} = \frac{m_a}{m_s} \quad (3.3)$$

3.3.1.4 Teor de umidade adimensional

Este cálculo do teor de umidade adimensional para cada amostra (\bar{M}^*), no instante de medição, foi realizado com base no valor do teor de umidade (M), do teor de umidade inicial (M_0) e do teor de umidade de equilíbrio M_{eq} em base seca, como segue:

$$\bar{M}^* = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (3.4)$$

3.3.2 Parâmetros energéticos

3.3.2.1 Temperatura adimensional

Para o cálculo da temperatura adimensional de cada amostra (θ^*), para cada instante de medição, foi determinado com base na temperatura da superfície do produto e da temperatura de equilíbrio (θ_{eq}), através da seguinte equação:

$$\theta^* = \frac{\theta - \theta_{eq}}{\theta_0 - \theta_{eq}} \quad (3.5)$$

3.3.3 Parâmetros geométricos

3.3.3.1 Diâmetro geométrico

Com base na expressão proposta por Mohsenin (1986), foi possível encontrar o diâmetro geométrico médio (D_g) da semente do fruto da mamona. Este parâmetro é determinado através da seguinte equação:

$$D_g = (a \times b \times c)^{1/3} \quad (3.6)$$

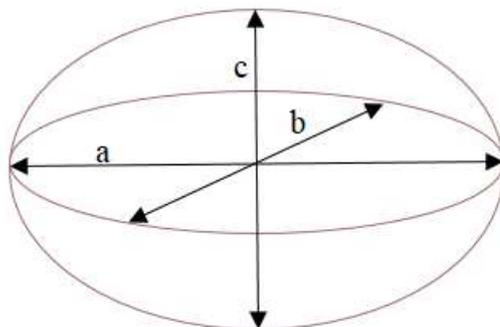
Onde:

- a) Comprimento ou maior eixo;
- b) Largura ou eixo médio;
- c) Espessura ou eixo menor.

Por exemplo, a semente de mamona tipo BRS Paraguaçu apresenta suas dimensões (diâmetro, espessura e largura) como já mostrado anteriormente após processo de secagem. Foram selecionada uma amostragem com 30 sementes para determinação dos parâmetros

geométricos, a Figura 3.15 ilustra muito bem o desenho esquemático da semente de mamona, considerando-a como um esferoide triaxial.

Figura 3.15 - Desenho esquemático da semente de mamona, considerando-o como um esferoide triaxial, com todas suas dimensões características. Fonte: Pereira (2017).



3.3.3.2 Esfericidade

A esfericidade (E_s) das sementes de mamona, é dada em porcentagem, sendo determinada através da seguinte equação (MOHSENIN, 1986):

$$E_s = \left(\frac{(abc)^{1/3}}{a} \right) \times 100 \quad (3.7)$$

3.3.3.3 Volume

O volume (V) das sementes de mamona do tipo BRS Paraguaçu, no início e no final de todo processo de secagem, foi determinado como segue (MOHSENIN, 1986):

$$V = \frac{\pi(abc)}{6} \quad (3.8)$$

3.3.3.4 Área superficial

Para calcular a área superficial (A_s) da semente de mamona do tipo BRS Paraguaçu, considerou-se a semelhança da semente a uma esfera com o mesmo diâmetro geométrico médio D_g , como segue:

$$A_s = \pi \times D_g \quad (3.9)$$

onde D_g é o diâmetro geométrico médio das sementes de mamona determinada pela equação 3.6 de (MOHSENIN, 1986).

3.3.3.5 Índice de contração volumétrica

A determinação do índice de contração volumétrica (Ψ) consiste na medição do tamanho do grão (comprimento largura e altura antes e depois do processo de secagem. A capacidade contração é influenciada por fatores como: teor de umidade, tamanho, forma do grão, presença de danos e temperatura de secagem.

Este índice foi determinado através da relação matemática, como segue:

$$\Psi = \frac{v}{v_0} \quad (3.10).$$

onde (v) é o volume final da semente num determinado instante do processo e (v_0) o volume inicial da semente.

3.4 O secador de esteira e fluxos cruzados utilizado na secagem da semente de mamona

3.4.1 Aspectos construtivos e funcionamento do secador

A prioridade principal deste trabalho é o aperfeiçoamento e teste de um secador de grãos de fluxos cruzados, inicialmente projetado por Lima (1995) e, desenvolvido por Holanda (2007). A Figura 3.16 ilustra o esquema de montagem do secador, enquanto que a Figura 3.17 ilustra esquematicamente o secador estudado.

Figura 3.16 – Etapas de montagem do secador. Fonte: Autor (2019).

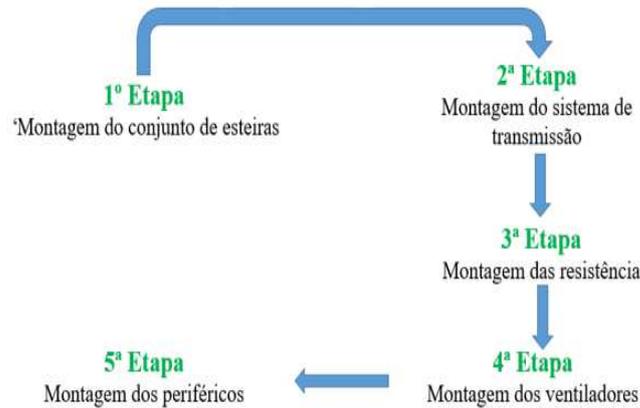
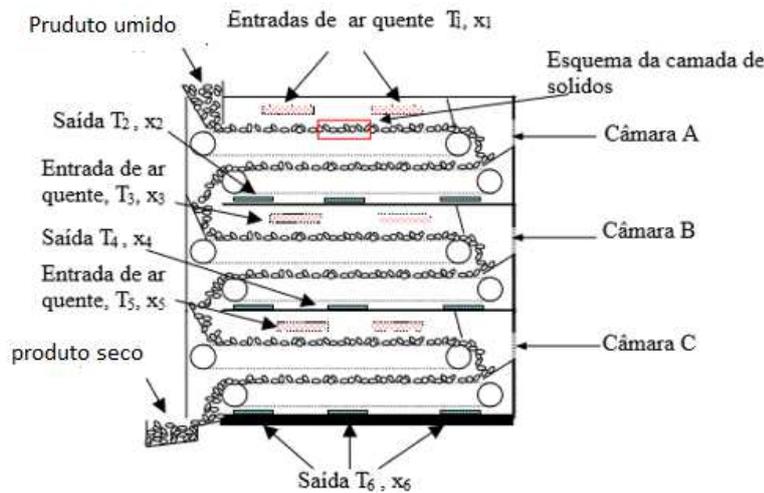


Figura 3.17 - Esquema do secador de grãos de fluxo cruzado. Fonte: Holanda (2007).

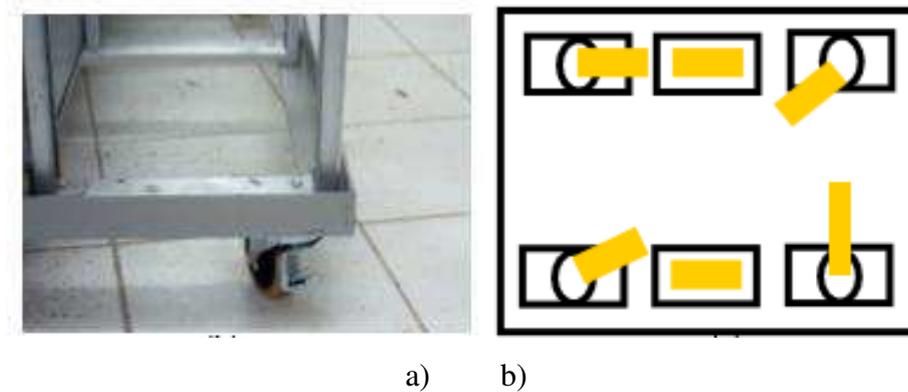


O secador de grãos de fluxos cruzados aplicado para este estudo, possui seis esteiras transportadoras, com duas esteiras por módulo (câmara de secagem). Cada esteira tem deslocamento constante e sincronizado. Cada módulo possui sistema independente de aquecimento, insuflação e exaustão de ar, e duas esteiras se movimentando em sentidos contrários, com comprimentos de $2500 \times 450 \text{ mm}^2$. Para as câmaras A e B o deslocamento do ar é realizado por ventiladores axiais de 1/5 HP com 400 mm de diâmetro, capaz de deslocar $4200 \text{ m}^3/\text{s}$ de ar e de exercer um diferencial de pressão igual a $98,10 \text{ Pa}$ (HOLANDA, 2007). A câmara C, possui um ventilador A300, com vazão de $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ e potência elétrica de 1/6 HP.

3.4.1.1 Base de sustentação do secador

O material usado foi cantoneiras de abas iguais, com $2\frac{1}{2}'' \times 3,16''$ formando um retângulo com $2500 \times 1200\text{ mm}^2$, sendo apoiado em seis rodízios como ilustrado na Figura 3.18 a) e 3.18 b).

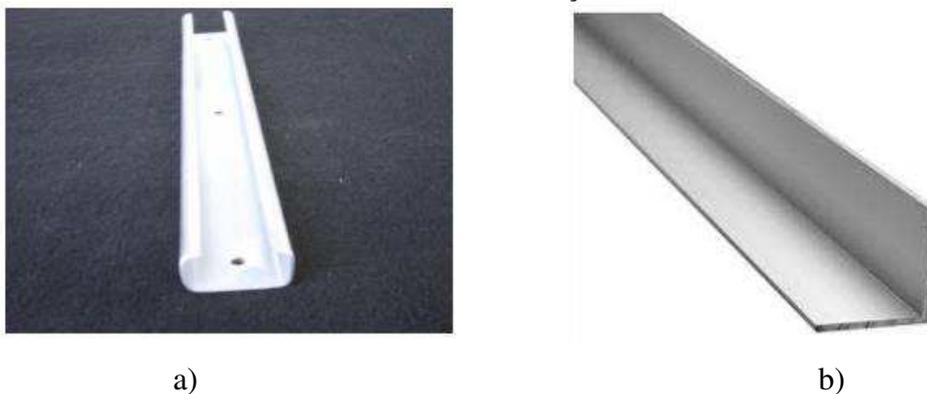
Figura 3.18 - Base de apoio do secador com seis rodízios. Fonte: Holanda (2007).



3.4.1.2 Estrutura metálica

A base estrutural do secador foi construída com perfis de aço tipo Viga "U" enrijecida e cantoneira em L de baixo custo e ótima resistência mecânica, conforme ilustra a Figura 3.19 a) e 3.19 b).

Figura 3.19 - Cantoneiras em U e L, usada na construção do secador. Fonte: Holanda (2007).



A Figura 3.20 mostra as regiões da câmara lateral e central e destina-se ao abrigo dos dutos de entrada e saída do ar quente vindo do trocador de calor. Estão também nessas câmaras os sistemas. A Figura 3.21 mostra uma vista frontal (carcaça) do secador de grãos tipo esteira de fluxo contínuo

Figura 3.20 - Módulo do secador com grade da esteira, Fonte: Holanda (2007).

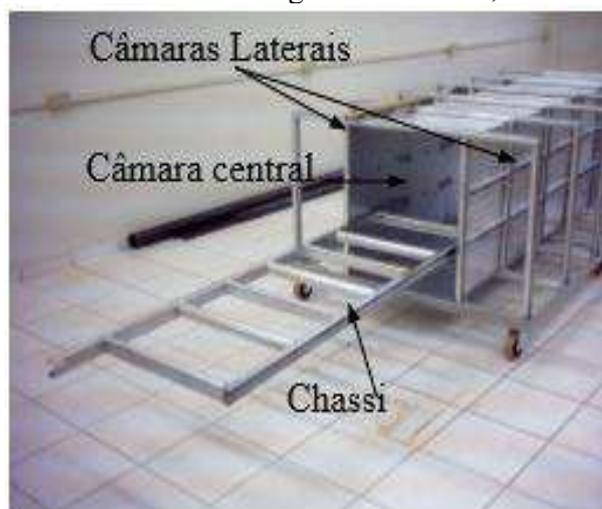


Figura 3.21 - Vista frontal do secador, Fonte: Holanda (2007).



3.4.1.3 Confeção do chassi da esteira transportadora do secador de fluxo cruzado

A Figura 3.22 ilustra o chassi da esteira transportadora, com dois rolos de aço com diâmetros de 75 mm (Figura 3.23) sendo um trator e o outro apoio final. Entre esses rolos existem mais três rolos que dão apoio intermediário e possuem diâmetro de 50 mm. Sobre estes rolos está a esteira que transporta o produto. Todos os rolos estão acoplados no chassi móvel através de cubos de bicicletas (Figura 3.24), que oferecem as vantagens de não necessitarem mancais, os rolos encaixados no chassi móvel, oferece a vantagem, em caso de manutenção, ser retirado todo o conjunto com facilidade, para manutenção caso haja necessidade em qualquer rolo ou na própria esteira (HOLANDA, 2007).

Figura 3.22 - Chassi da esteira transportadora. Fonte: Autor (2013).



Figura 3.23 - Rolos trator a) e rolo de apoio secundário b) com cubos de bicicleta, Fonte: Holanda (2007).

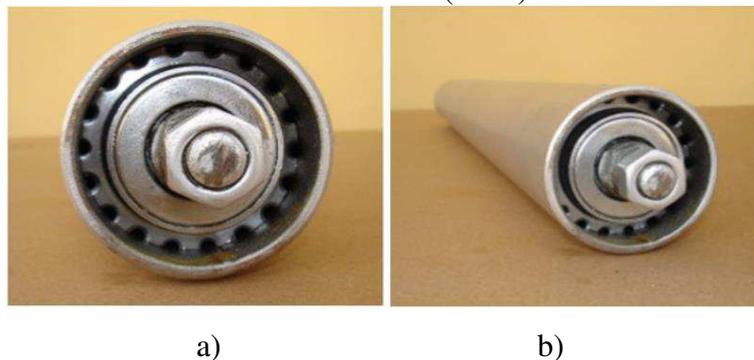


Figura 3.24 - Cubo de bicicleta dianteiro e traseiro usado nos rolos, Fonte: Holanda (2007).



O acesso do grão úmido à esteira para início do processo de secagem se dá através da porta de acesso (Figura 3.25). Em seguida, já dentro da câmara os grãos são guiados para a esteira através da rampa de acesso para as esteira. A Figura 3.26 ilustra a cuba de recolhimento do grão ao término do processo de secagem. Durante o processo de montagem da malha sobre a base da esteira, esta, não era centralizada, sempre tendendo a se desalinhar. A solução encontrada para esse impasse foi o acoplamento de dois discos sobre as laterais do rolo trator e do rolo conduzido, como retrata muito bem a Figura 3.26.

Figura 3.25- Parte frontal do secador de fluxo cruzado. Fonte: Autor (2017).

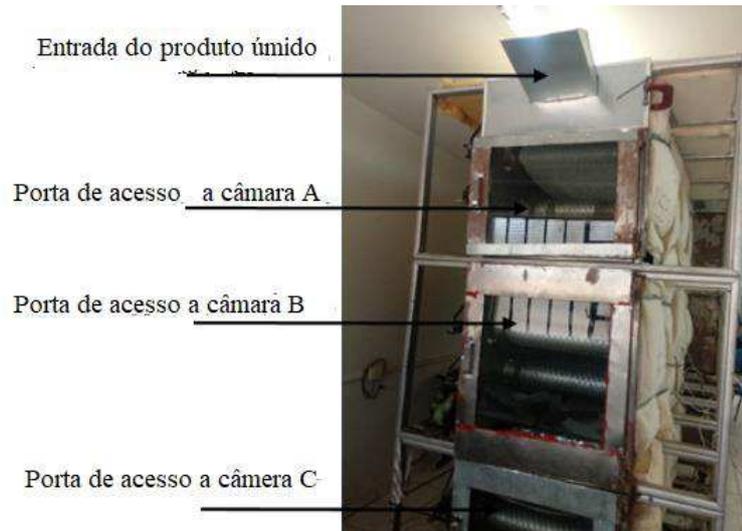


Figura 3.26 – Vista geral do módulo C. Fonte: Autor (2017).



3.4.1.4 Esteira transportadora

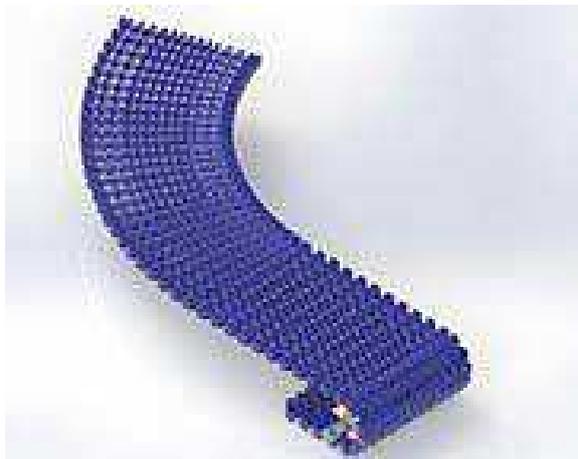
A esteira propriamente dita, é fabricada em malha de aço inox, como pode ser visto na Figura 3.27, ou de ferro carbono galvanizado, tecidos metálicos ou ainda com velcro feito de algodão (Figura 3.28). Segundo Holanda (2006), para a escolha adequada de uma malha para esteira deve ser levado em consideração vários fatores, tais como: tamanho da malha, temperatura de trabalho, tipo de material a ser transportado, entre outros. Alguns dos itens de fundamental importância na escolha do tipo de malha a ser utilizada é a leveza e sua qualidade. A proposta para este secador é ter a capacidade de secar grãos com granulometria variada. Durante o processo de escolha das esteiras foram utilizados vários tipos de malhas

para a escolha da que melhor que se adequasse ao secador. A esteira de malha 3 mm vista na Figura 3.29, apresentou uma inconveniência, que foi a falta de aderência nos rolos. A esteira escolhida e a que mais se adaptou (aderência) ao sistema de rolos foi a esteira com malha de 14 mm, como está ilustrada muito bem na Figura 3.29.

Figura 3.27 - Esteira com malha de 14 mm de diâmetro de aço carbono galvanizado. Fonte: Autor (2017).



Figura 3.28 - Tipos de malhas para esteira. Fonte: Holanda (2007).



a)



b)

Figura 3.29 - Confeção e montagem da malha da esteira com malha de 3mm. Fonte: Autor (2013).



3.4.1.5 Sistema motriz das esteiras

Segundo Holanda (2007), o movimentar de uma esteira não é tão simples quanto aparenta ser, devido a velocidade linear da esteira ser bastante reduzida, como é o caso desse projeto que possui uma velocidade baixíssima de $1,33 \times 10^{-3}$ m/s. O grau de complexidade torna-se ainda mais intenso, por consistir de movimentos sincronizados de seis esteiras. O acionamento idealizado por Holanda (2007), para mover o sistema coordenado de seis esteiras, teve o uso de um solenoide por um intervalo de tempo rigorosamente igual; a cada 3 segundos é fornecido um pulso ao solenoide (Figura 3.30), provocando um deslocamento de 4 mm, que correspondia segundo Holanda (2007), ao movimento exigido pela esteira.

O sistema apresentado por Holanda (2007) sobre o ponto de vista dele era viável, mas, no entanto, apresentava muitas inconvenientes, tais como: era um sistema para cada esteira (seis esteiras), apresentava barulho excessivo para o ambiente, além do poder aquisitivo ser bem mais alto. Assim, foi desenvolvido um novo sistema de acionamento.

A válvula solenoide consiste de um equipamento que pode ser usado de várias formas e pode ser aproveitado em diversas áreas. Esta válvula nada mais é do que uma válvula eletromecânica controlada, formada por duas partes principais: corpo da válvula e bobina solenoide. O corpo da válvula solenoide é composto, além da tampa por uma mola e um diafragma. O projeto desenvolvido por Holanda (2007) tinha como meta o uso de seis solenoides que acionaria o grupo de esteiras (ALVES, 2009).

Figura 3.30 - Solenoide usado para mover cada conjunto de esteira. Fonte: Holanda (2007).



O novo sistema de acionamento do secador de fluxos cruzados consiste de:

- a) Inversor de frequência (Figura 3.31), que é um dispositivo eletrônico capaz de variar a velocidade de giro de um motor de indução trifásica. É um dispositivo que transforma corrente elétrica alternada (CA) fixa (corrente e tensão) em corrente elétrica variável controlando a potência consumida pela carga através da variação da frequência entregue pela rede. Os inversores criam uma possibilidade para que os motores sejam acionados suavemente, sem trancos, o que suaviza todo sistema mecânico, reduzindo assim a quebra de elementos de transmissão como correntes e rodas dentadas) que comanda.

Figura 3.31 - Inversor de frequência que comanda a rotação do motor. Fonte: Autor (2017).



b) Um motor industrial (Figura 3.32) de 1/2 CV de corrente alternada, com rotação de 1700 rpm, de 4 polos.

Os motores de indução trifásica são empregados por terem alta eficiência, baixo custo, robustez e também por apresentar configuração de nossos sistemas de distribuição de energia que é feita em corrente alternada (CA). São essas características que torna o motor trifásico ideal para qualquer tipo de operação e por ser amplamente encontrado no comércio. Acoplado a este motor está um redutor de velocidade (Figura 3.33) com redução de 1/3000. Graças a este redutor foi obtido uma velocidade na esteira igual ou superior ao projetado por Holanda (2007).

Figura 3.32 – Motor industrial acoplado ao redutor de velocidade. Fonte: Autor (2017).



Figura 3.33 – Redutor de velocidade 1/3000. Fonte: Autor (2017).



O redutor de velocidade exposto na Figura 3.33 é um equipamento mecânico que tem como função principal a redução da rotação de um acionador “motor”, tem como componentes básicos um conjunto de engrenagens, eixos e rolamentos que tem como

principal função reduzir a velocidade do acionador. O redutor de velocidade usado neste trabalho reduz a velocidade de 1 para 3000 e está interligado com os rolos trator através de correntes, coroas e pinhão.

Através do redutor existe um acoplamento que interliga todas as seis esteiras com a mesma velocidade. A Figura 3.34 mostram todo circuito, de transmissão de motocicleta (coroa, corrente e pinhão). Acoplado ao eixo da coroa (64 dentes) tem uma catraca de bicicleta que, através de corrente e catracas, interagem com todos os rolos trator como esta ilustrando a Figura 3.35.

Figura 3.34 - Motor com redutor de velocidade interligando todo sistema de transmissão.

Fonte: Autor (2017).



Figura 3.35 - Sistemas de transmissão (coroa e corrente de moto) que interliga todos os rolos trator. Fonte: Autor (2017).



3.4.1.6 Aquecedores elétricos

O uso de aquecedores tipo elétrico operacionalmente não são econômicos se comparado ao uso de energia solar através de uso de placas fotovoltaicas ou até mesmo aquecedores de gás, que economicamente possui um custo relativamente baixo. Com o intuito de minimizar e otimizar os custos operacionais, técnicas no acionamento elétrico podem ser implantadas, com o intuito de viabilizar o custo do equipamento que, torna-se viável, por ser este de alta produção.

Testes foram realizados com as resistências blindadas conforme ilustra a Figura 3.36. Essa resistência oferece a vantagem de proteger, os usuários que manipulam o equipamento, de choques elétricos. Segundo Holanda (2007), uma resistência para estufa pode oferecer um risco contra choque mas, se prevenções forem tomadas, esse risco poderá ser isolado através, de isolamento anti-choque no equipamento. A Figura 3.37 ilustra um determinado tipo de resistência bastante comum.

Figura 3.36 - Testes com resistência blindada e comum. Fonte: Holanda (2007).

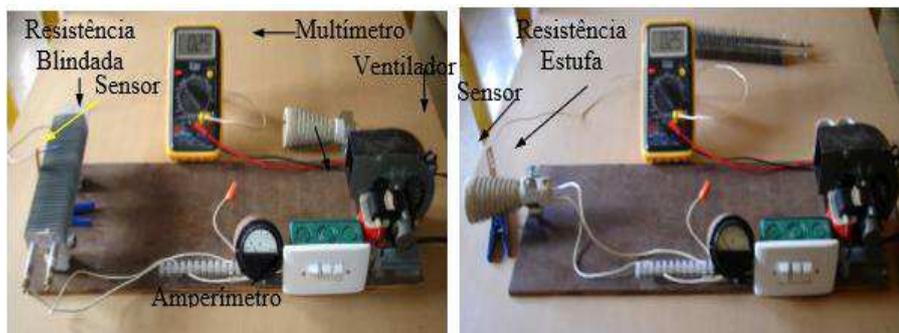


Figura 3.37 - Resistências blindada. Fonte: Holanda (2007).



Para o sistema de aquecimento usado para cada módulo, foram feitos com base nos testes realizados por Holanda (2007), dois grupos de resistências foram selecionados e testados. A Figura 3.38 mostra o mesmo grupo de resistências usado para estufa em teste de aquecimento para averiguação de temperatura. As Figuras 3.39 e 3.40 ilustram uma resistência em fase de testes enquanto que a Figura 3.41 já mostra o jogo de resistências após fase de teste sendo instalada no modulo C.

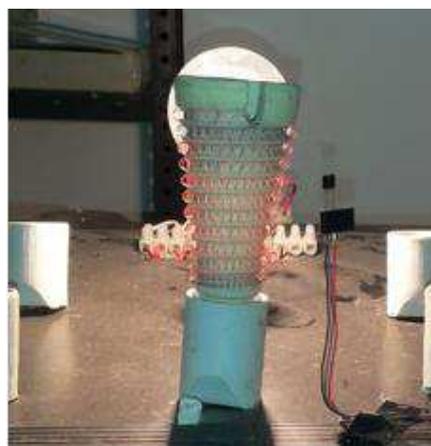
Figura 3.38 - Tipos de resistências de forno elétrico. Fonte: Holanda (2007).



Figura 3.39 - Teste de resistência para o módulo C. Fonte: Autor (2017).



Figura 3.40 - Resistência em fase de teste. Fonte: Autor (2017).



Já para os módulos A e B, a resistência mais adequada foi a ilustrada na Figura 3.42, devido a facilidade e aproveitamento do fluxo de ar sobre a mesma, fornecendo assim um maior aproveitamento deste fluxo sobre a área aquecida, o que resulta num incremento da temperatura para o ar de secagem. A Figura 3.43 ilustra a montagem dessas resistências ligadas em paralelo. O grão atinge a temperatura máxima na primeira câmara e todo processo de secagem é realizado na segunda câmara. Sendo assim, a temperatura de trabalho das duas primeiras câmaras é superior às subsequentes. Para tanto, foi necessário uma potência superior que a da câmara C, devido esta ser usada somente para redução de tensão no interior do produto de secagem. A Tabela 3.3 ilustra a Potência necessária para cada do câmara.

Figura 3.41 - Montagem das resistências do modulo C. Fonte: Autor (2017).



Tabela 3.3 - Potência total do grupo de resistências requerida para cada câmara.

Câmara	Potências (kW)
A	14,21
B	14,41
C	9,00

Figura 3.42 - Montagem do conjunto de resistências do módulo A. Fonte: Autor (2017).

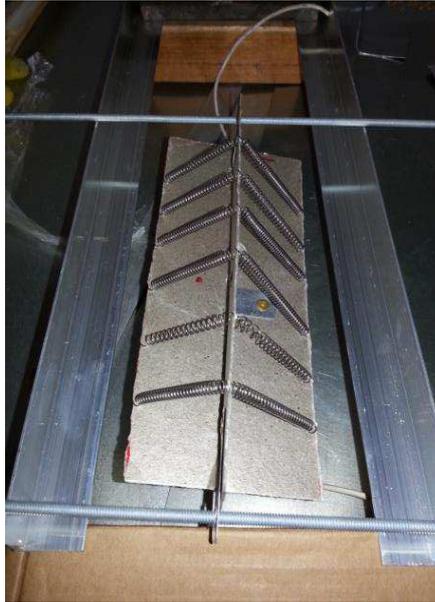


Figura 3.43 - Montagem do conjunto de resistência do módulo B. Fonte: Autor (2017).



3.4.1.7 Sistema de insuflamento e exaustão de ar

Sabe-se que comercialmente existe uma gama de exaustores e ventiladores, que atende determinadas necessidades de uso. Para esta pesquisa, a escolha foi a mesma de Holanda (2007), ou seja, ventiladores turbo-axial, com 40 cm diâmetro para os módulos A e B, e de 30 cm, para o módulo C. A Tabela 3.4 ilustra os dados dos exaustores turbo-axial. Os modelos A 400 e o A 300 tornam-se justificáveis por atender a necessidade do secador (Figura 3.44), enquanto que a Figura 3.45 ilustra o procedimento de ligação.

Tabela 3.4 - Características técnicas dos ventiladores.

Características	Ventiladores		Unidades
	A-300	A-400	
Diâmetro	0,30	0,40	M
Área	0,07	0,12	m ²
Potência do motor	1/6	1/5	HP
Rotação	1700	1500	rpm
Vazão volumétrica	1500	1500	m ³ /h
Tensão	220	220	V
Pressão	78,45	98,10	Pa

O duto cilíndrico onde o ventilador está acoplado mede 400 mm de diâmetro e 500 mm de comprimento (Figura 3.46), o conjunto de resistência está acoplada neste duto juntamente com os ventiladores, que sopram o ar sobre o grupo de resistências dissipadoras de calor, a Figura 3.47 ilustra todos os módulos em operação. Este duto está ligado a outro contíguo com formato prismático, medindo 550 X 500 cm², sendo reduzido progressivamente (Figura 3.48) ao longo do comprimento de 1800 mm, onde atinge a segunda entrada, no qual existe uma curvatura (Figura 3.49), tendo como finalidade a redução da turbulência, suavizando a entrada do ar quente. Nesta seção final, o duto tem uma seção quadrada de 300 X 300 mm².

Figura 3.44 - Ventilador turbo-axial A 400. Fonte: Autor (2016).

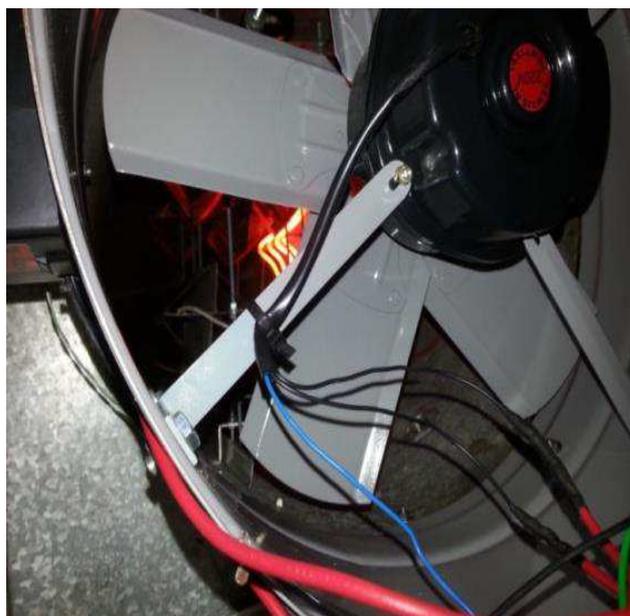


Figura 3.45 - Esquema de ligação do ventilador. Fonte: Manual do ventilador.

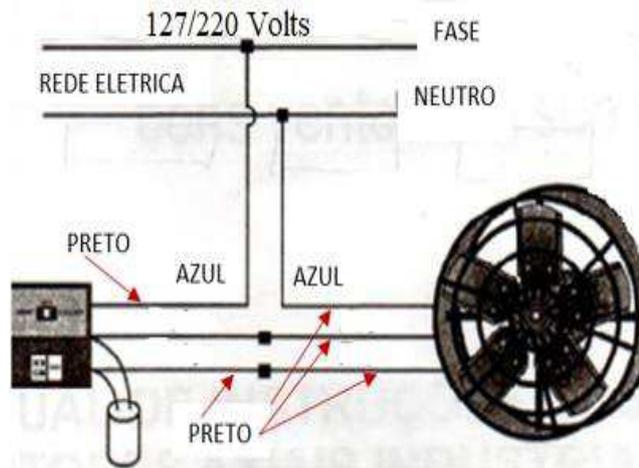


Figura 3.46 Duto cilíndrico onde estão alojadas o conjunto de resistências e exaustores. Fonte: Autor (2017).



Figura 3.47 - Vista dos ventiladores com o grupo de resistências dentro do duto. Fonte: Autor (2017).



Figura 3.48 - Vista interna do duto mostrando a curvatura. Fonte: Holanda (2007).



Figura 3.49 - Vista externa da curvatura final do duto. Fonte: Holanda (2007).



A Figura 3.50 reporta bem essa inclinação lateral, sendo visto através da parte externa do duto, onde força o ar a entrar para a primeira entrada, e o excedente prossegue com maior pressão e velocidade. Assim o ar entra na câmara em condições semelhantes nas duas entradas.

Figura 3.50 – Vista externa do duto. Fonte: Holanda (2007).



3.4.2 Parâmetro técnico do secador

3.4.2.1 Cálculo do sistema de transmissão

Durante a reforma, foi colocado um novo sistema de transmissão que passou a ser acionado por um motor industrial acoplado a um redutor de velocidade interligando através de coroa, corrente e pinhão de moto e bicicleta, um conjunto de seis esteiras (todas perfeitamente sincronizadas). Diversos resultados positivos foram apresentados após as modificações, tais como: versatilidade, baixo custo de construção, totalmente desmontável e boa mobilidade.

O secador tipo esteira de fluxo cruzado apresenta grande versatilidade. Como foi totalmente reestilizado do modelo apresentado por Holanda (2007), o secador em estudo foi aperfeiçoado para diferentes tipos de secagem e natureza do material (sementes ou frutas).

Por possuir diversas funções, que o torna adequado para diferentes condições de secagem, o secador de fluxo cruzado apresenta itens que podem ser controladas, tais como:

- a) A velocidade das esteiras;
- b) O fluxo ou vazão do ar;
- c) A temperatura do ar de secagem;
- d) É possível realizar três secagens ao mesmo tempo, em diferentes condições operacionais, devido a versatilidade de independência de cada câmara.

Cada câmara possuem dois conjuntos de esteiras, sendo, portanto três câmaras que perfazem um total de seis esteiras perfeitamente sincronizadas. Sendo assim, torna-se possível alterar a velocidade do conjunto de esteiras, sendo necessário, portanto variar a frequência do inversor de frequência. A Equação 3.53 determina a velocidade síncrona do motor, a equação 3.54 determina o fator de escorregamento e a equação 3.55 determina a velocidade real do motor enquanto que a equação 3.56 determina a velocidade nominal do motor.

$$N_s = \frac{120 \times f}{p \times S} = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \text{ rpm} \quad (3.53)$$

$$S = 100 \times \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{1800 - 1700}{1800} \times 100 = 5,55\% \quad (3.54)$$

$$N_s' = 1800 \times 0,0555 = 99,9 \text{ rpm} \quad (3.55)$$

Sendo que 5,55% de velocidade síncrona representa 99,9 rpm.

Assim a velocidade real no eixo do motor elétrico será a diferença entre a velocidade síncrona e o escorregamento. Recebendo o nome de velocidade nominal e a equação passa a ser para efeito de cálculo,

$$N = N_s - N_s' = 1800 - 99,9 = 1700 \text{ RPM} \quad (3.56)$$

Onde:

- N velocidade nominal em rpm;
- N_s velocidade síncrona em rpm;
- N_s' é o fator de escorregamento em rpm.
- f é a frequência do motor
- n_p = 4 é o número de polos do motor.

Existem vários motivos que contribuem para que a velocidade real do eixo do motor deixe de ser exatamente a velocidade do campo magnético girante, por exemplo, esta velocidade varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada a seu eixo.

Por natureza, o motor elétrico trifásico possui uma diferença entre a velocidade do campo magnético girante (N_s) e a velocidade real em seu rotor (N). Esses dados estão ilustrado na Tabela 3.5. Este fato se dá em função de um fenômeno chamado escorregamento e é fornecido pelo o fabricante do motor, podendo variar de motor para motor. Na maioria das vezes este fenômeno é descrito pelo fabricante em porcentagem (%).

Tabela 3.5 - Rotação nominal do motor em função da frequência.

Frequência do inversor (Hz)	Tempo (min)	Rotação nominal (rpm)
2,5	60	150
5,0	60	300
7,5	60	450
10,0	60	600
12,5	60	750
15,0	60	900
17,5	60	1050
28,3	60	1700

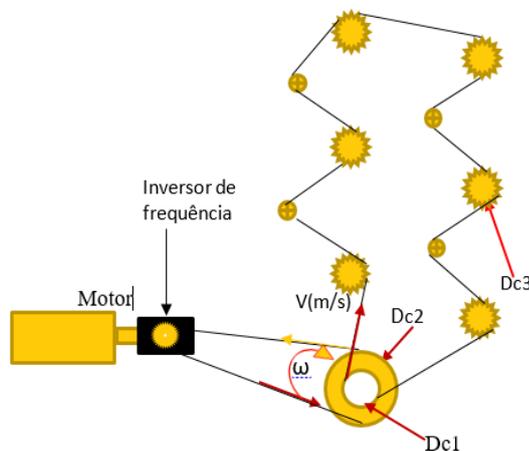
A Figura 3.51 ilustra todo sistema de transmissão mecânica que interliga todo conjunto de esteiras do secador de fluxos cruzados. A análise da velocidade transmitida pelo motor ao redutor de velocidade (1/3000 rpm) em cada ponto do sistema de transmissão está apresentada em resumo na Tabela 3.5.

Através do sistema de transmissão constituído de coroa, corrente e pinhão, o movimento é direcionado para os eixos tratores que impulsionam as esteiras, as quais se movem com velocidade linear constante, determinada pelo ajuste da frequência de operação do inversor. A rotação do motor é transferida para a engrenagem Dc2 através do sistema de transmissão.

A velocidade angular (ω) da catraca foi determinada através da equação 3.57. Como as engrenagens Dc1 e Dc2 estão interligadas em um mesmo eixo, elas estão submetidas a mesma velocidade. Para a determinação da velocidade linear das esteiras, foram utilizadas as equações 3.58 e 3.59.

Figura 3.51 - Mecanismo do sistema de tração das esteiras do secador de fluxos cruzados.

Fonte: Autor (2019).



Na Figura 3.51, Dc1(diâmetro coroa 1) = 0,1 m; Dc2 (diâmetro coroa 2) = 0,25m; Dc3 (diâmetro coroa 3) = 0,12m e N é a rotação do motor = 1700rpm.

$$f = \frac{N^{\circ} \text{ de voltas (rpm)}}{t \text{ (min)}} \quad (3.57)$$

$$\omega = \frac{V}{R} \quad (3.58)$$

onde ω é a velocidade angular, V é a velocidade linear e R é o raio.

$$V = 2 \times \pi \times R \times f \quad (3.59)$$

onde f é a frequência dado em hertz.

A Tabela 3.6 resume os valores de alguns parâmetros relacionados a velocidade da esteira. Considerando um motor de 4 polos, com frequência de 30 Hz equivalente a 850 rpm, chegou-se a uma velocidade linear na esteira de 0,001068 m/s. Essa velocidade poderia ainda ser menor se fosse selecionada uma outra velocidade como está exposta na tabela 3.6. Todo tempo gasto no processo para uma rotação imposta de 850 rpm foi de 13481,36 segundos ou 3,744822 horas, que é o tempo gasto pelo material para percorrer as seis esteiras.

Tabela 3.6 - Dados da velocidade da esteira calculados para uma frequência de 30 Hz.

Conversão de Hz em rpm	
Frequência (Hz)	30
Número de polos	4
Fator de escorregamento	0,944444
Numero de rotações (rpm)	850
Convertendo rpm em rad/s	
ω (rad/s)	89,01179
Após o redutor	
Redução	3000
Ω_r	0,029671
Velocidade no pião	
Diâmetro do pião (m)	0,1
Velocidade da corrente 1 (m/s)	0,001484
Velocidade da coroa 1	
Diâmetro da coroa 1 (m)	0,25
ω_{c1}	0,011868
Velocidade da coroa 2	
ω_{c2} (Rad/s)	0,011868
Diâmetro da coroa 2	0,12
Velocidade da corrente 2 (m/s)	0,000712
Velocidade nas esteiras	
Diâmetro do rolo + tela (m)	0,18
Velocidade da esteira (m/s)	0,001068
Tempo de Processo	

Comprimento da esteira (m)	14,4
Tempo (S)	13481,36
Tempo (h)	3,744822

3.4.2.2 Medição do consumo de energia elétrica

Um dos itens utilizados para teste de otimização do secador contínuo tipo esteira e de fluxo cruzado é a medição do consumo de energia elétrica, que pode ser realizada através da medição da potência elétrica fornecida a carga para um determinado intervalo de tempo. A medição da potência elétrica é determinada por intermédio de sensores de corrente instalados na alimentação da carga e conectado aos medidores.

O sensor de corrente é responsável por medir a corrente elétrica que circula através da carga. O sensor de tensão é responsável pela medição da tensão elétrica aplicada a carga, sendo instalado entre fases e entre neutro e fase. Com o conjunto de informações recebidas 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. A equação 3.60 permite o cálculo da potência média (LIMA, 2017).

$$P_{med} = \frac{1}{T} \times \int_0^T I(t) \times U(t) dt \quad (3.60)$$

onde T é a temperatura, I é o valor eficaz da intensidade de corrente e U é o valor eficaz da tensão senoidal.

O aparelho SEL – 735 ilustrado na Figura 3.52 foi usado para medir a qualidade e consumo de energia elétrica do secador de grãos de fluxo cruzados. Este possui 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 Modbus.

Figura 3.52 – Aparelho SEL – 735 usado para medir a qualidade e consumo de energia.
Fonte: Autor (2019).



Para operar o secador de fluxos cruzados torna-se necessário um procedimento padrão, o qual está descrito a seguir:

- a) Etapa I: Ativar o cabo conector trifásico como ilustra a Figura 3.53. É o início de todo processo para o secador de fluxo cruzado.

Figura 3.53 – Conector trifásico. Fonte: Autor (2017).



- b) Etapa II: Ativa o disjuntor trifásico. O secador de fluxo cruzado fica em modo operacional, com o disjuntor trifásico ligado. A Figura 3.54 mostra o disjuntor.

Figura 3.54 – Disjuntor trifásico. Fonte: Autor (2017).



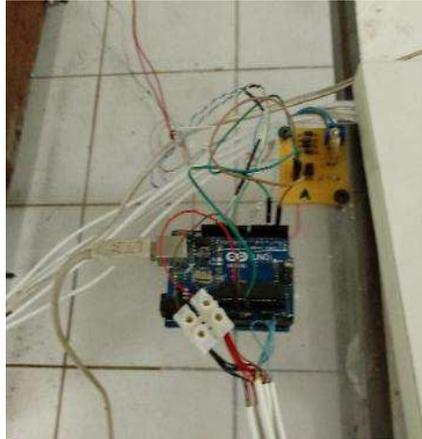
c) Etapa III: Ativar os ventiladores de cada câmara (A, B e C) e a velocidade desejada. A Figura 3.55 mostra o dimmer que aciona o controla os ventiladores.

Figura 3.55 – Dimmer de acionamento dos ventiladores. Fonte: Autor (2017).



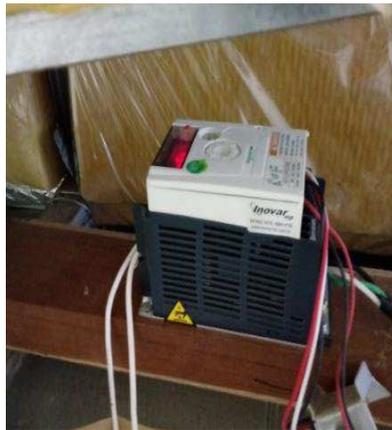
d) Etapa IV. O Arduíno uno ativa o módulo de resistência elétrica em uma faixa de temperatura pré estabelecida. A Figura 3.56 mostra todo esquema de ligação.

Figura 3.56 – A placa Arduino uno. Fonte: Autor (2017).



e) Etapa V: Ativar o inversor de velocidade. Este equipamento é responsável pelo movimento do conjunto de esteiras. A Figura 3.57 ilustra este equipamento.

Figura 3.57 – Inversor de velocidade. Fonte: Autor (2017).



CAPITULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Secagem da semente de mamona em estufa

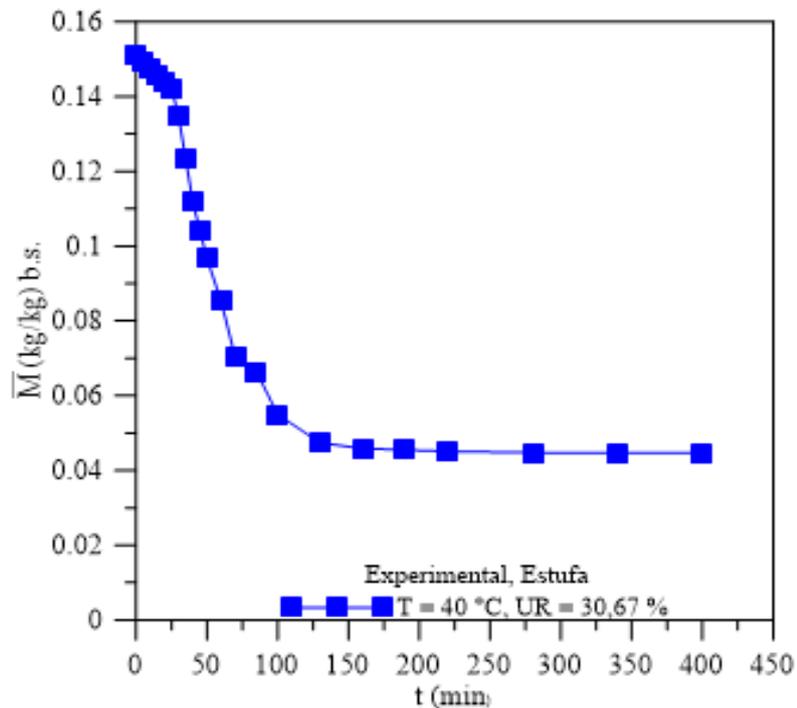
Nos experimentos foram utilizadas diversas condições de temperatura e umidades relativa do ar de secagem no interior da estufa, com o objetivo de analisar os efeitos das condições do ar de secagem na remoção de umidade e aumento da temperatura das sementes de mamona, da variedade BRS Paraguaçu.

4.1.1 Cinética de secagem da semente de mamona

As Figuras 4.1 a 4.6 ilustram as cinéticas de secagem (estufa) das sementes de mamona, nas temperaturas de 40, 50, 60, 70, 80 e 90°C, respectivamente. Percebe-se que os valores do teor de umidade médio atinge o estado permanente, quando este valor se iguala a umidade de equilíbrio a uma determinada temperatura.

Após as análises destas figuras verifica-se que a secagem é mais acentuada nas horas iniciais do processo ($\pm 3h$), tendendo ao equilíbrio para tempos suficientemente longos. Este comportamento da remoção de umidade ocorre em todas temperaturas testadas.

Figura 4.1 –Variação do teor médio da umidade (base seca) das sementes de mamona em função do tempo de secagem (T=40°C, secagem em estufa). Fonte: Autor (2017).



Além disso verifica-se que, com o aumento da temperatura do ar de secagem e a diminuição da umidade relativa do referido ar, aumenta-se a taxa de secagem das sementes de mamona, com isso a temperatura e umidade do produto atinge mais rapidamente o equilíbrio. Porém, esta situação pode causar danos as sementes, interferindo na qualidade final do produto. Não são recomendados altos gradientes térmicos e hídricos nas sementes, ou entre as sementes e o ar de secagem, porque isto produz uma secagem não uniforme e gera-se tensões térmicas, hídricas e mecânicas nas sementes, o que pode causar rachaduras, fissuras e deformação no sólido, comprometendo sua qualidade no fim do processo de secagem.

Como ilustram as Figuras 4.3 e 4.4, com o aumento da temperatura, a variação do teor de umidade em função do tempo (período compreendido entre 0 a 60 min) tende a ter um aumento mais significativo, devido a rápida migração da água livre para a superfície do produto. Mas com o prolongamento contínuo do tempo (150 a 200 min) de secagem, a umidade tende a entrar em equilíbrio.

Figura 4.2 – Variação do teor médio de umidade das sementes de mamona em função do tempo de secagem ($T = 50^{\circ}\text{C}$, secagem em estufa). Fonte: Autor (2017).

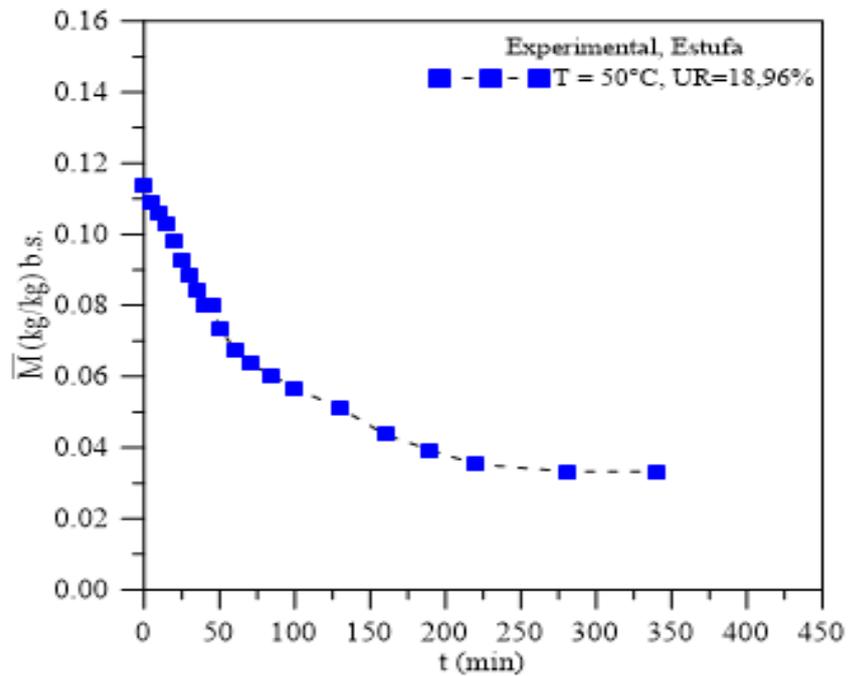
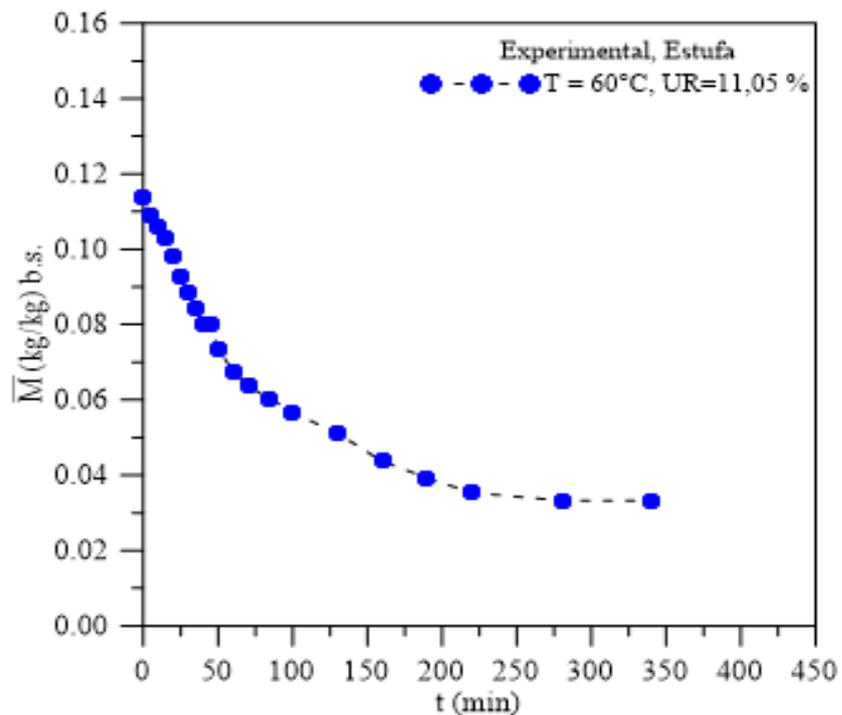


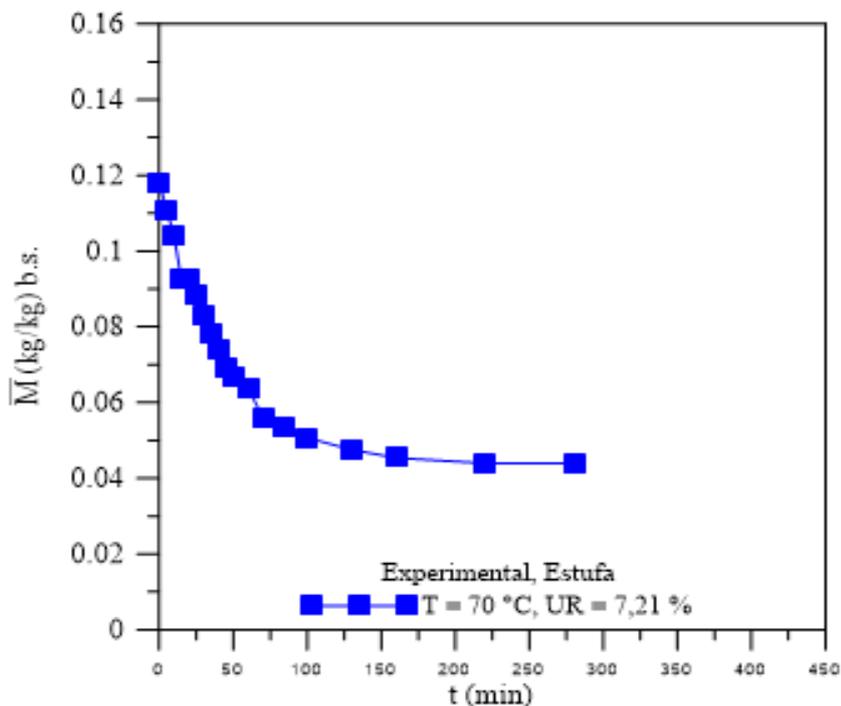
Figura 4.3 – Variação do teor médio de umidade médio das sementes de mamona em função do tempo de secagem ($T = 60^{\circ}\text{C}$, secagem em estufa). Fonte: Autor (2017).



Numa análise qualitativa, pode-se dizer que, durante o primeiro estágio de secagem ocorre transferência da umidade do interior da semente à medida que esta se aquece,

começando a perder água para o meio ambiente, sendo que esse início é a partir de um teor de umidade já conhecido.

Figura 4.4 – Variação do teor médio de umidade das sementes de mamona em função do tempo de secagem ($T = 70^{\circ}\text{C}$, secagem em estufa). Fonte: Autor (2017).



Vale salientar que a perda de umidade durante o aquecimento do grão decresce mantendo sempre uma constância, ou seja, a quantidade de água removida (água livre) por unidade de tempo sofre pequenas variações no decorrer do tempo de secagem. As Figuras 4.5 e 4.6 ilustram muito bem essa ocorrência, durante o aquecimento do grão em função do intervalo de tempo definido, (; BROOKER et al., 1992; AZEVEDO, 1997).

Durante a secagem, geram-se tensões de sentido contrário entre a camada externa e a interna do sólido. Percebe-se que, quanto maior a perda de água, maior também será a tensão resultante, fazendo o material deformar-se e inclusive com a possibilidade de trincar. Para se ter uma secagem uniforme (gradientes de temperatura e umidade minimizadas) é importante moderar adequadamente a intensidade das propriedades termodinâmicas envolvidas no processo de secagem, pelos controles do processo (velocidade, umidade relativa e temperatura do ar de secagem).

Figura 4.5 – Variação do teor médio de umidade das sementes de mamona em função do tempo de secagem ($T = 80^{\circ}\text{C}$, secagem em estufa). Fonte: Autor: (2017).

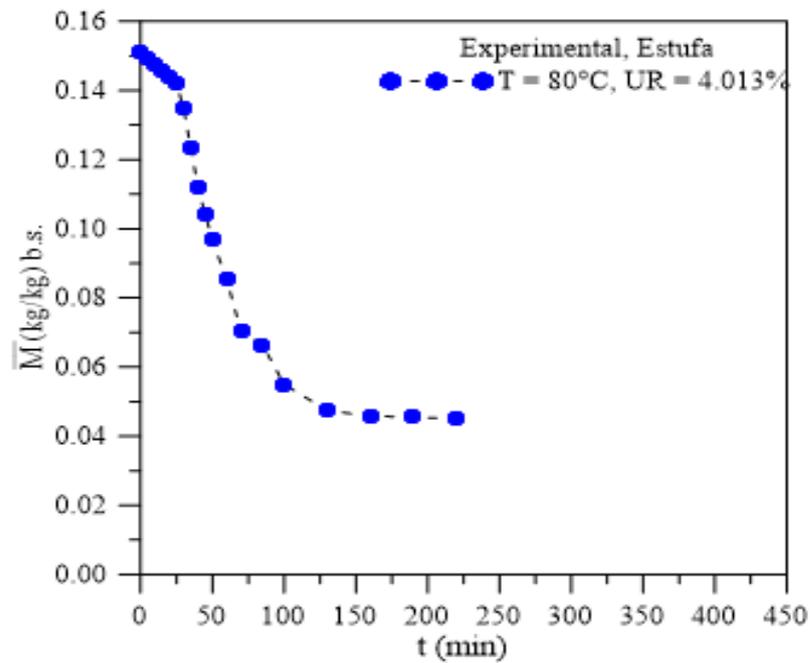
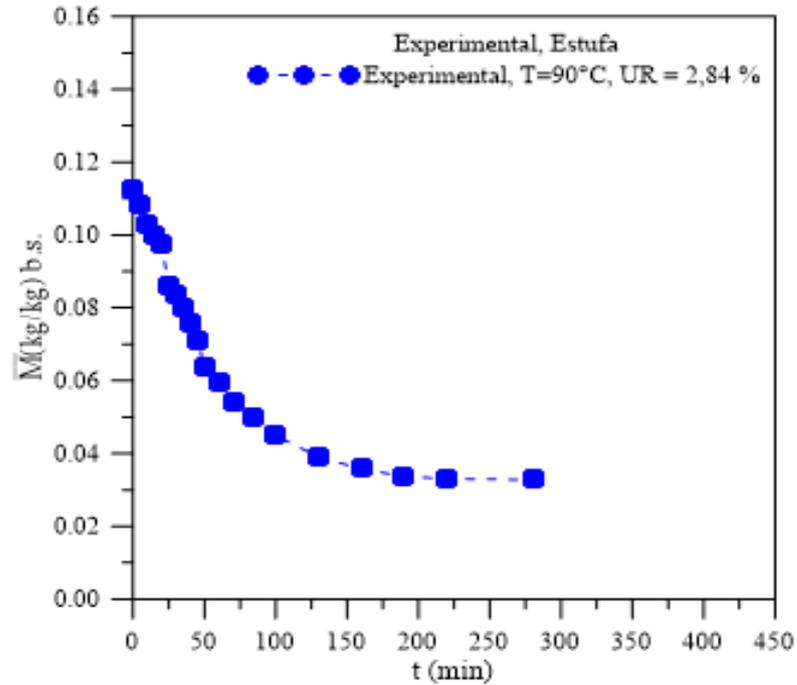


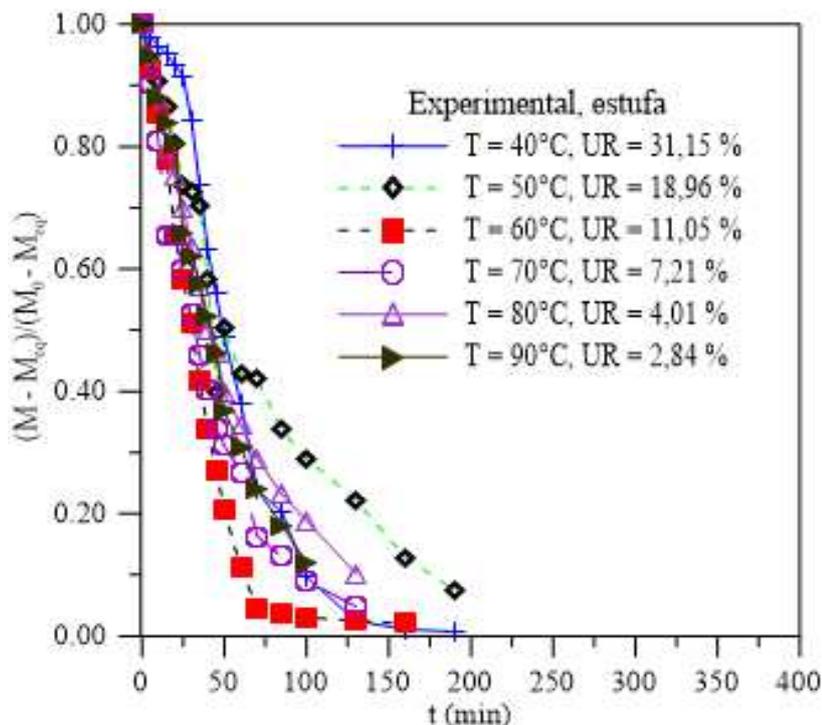
Figura 4.6 - Teor de umidade das sementes de mamona em função do tempo de secagem ($T = 90^{\circ}\text{C}$, Secagem em estufa). Fonte: Autor: (2017).



A Figura 4.7 ilustra uma comparação entre as os teores de umidade adimensional (base seca) em função do tempo para as seis temperaturas do ar de secagem (40, 50, 60, 70, 80 e 90°C). Este equilíbrio conduz a um produto final de qualidade aceitável comercialmente (PEREIRA, 2015; ARAUJO et al., 2014).

Em geral, quanto maior a temperatura e menor a umidade relativa do ar, mais rápido é o processo de secagem. Contudo, ao se analisar esta figura, verifica-se este comportamento não é verificado completamente. A explicação para tal fato está relacionado com os diferentes teores de umidade inicial e final das sementes de mamona.

Figura 4.7 – Teor de umidade adimensional das sementes de mamona em função do tempo de secagem (T= 40, 50, 60,70, 80 e 90°C, secagem em estufa). Fonte: Autor (2019).



4.1.2 Cinética de aquecimento da semente de mamona

As Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 ilustram o comportamento transiente da temperatura superficial das sementes de mamona em função do tempo de secagem, para as temperaturas de 40, 50 e 60°C. Após análises destas figuras, verifica-se que a temperatura na superfície da semente aumenta com o tempo de secagem tendendo ao equilíbrio térmico, para tempos longos do processo, por exemplo, 250 min para T = 40°C, decrescendo este tempo para

temperatura mais elevadas. Pode-se ver ainda que a taxa de aquecimento é mais elevada quando a temperatura de secagem é mais alta.

Figura 4.8 – Curva de temperatura superficial da semente de mamona em função do tempo para a temperatura do ar de secagem ($T = 40^{\circ}\text{C}$, secagem em estufa). Fonte: Autor (2017).

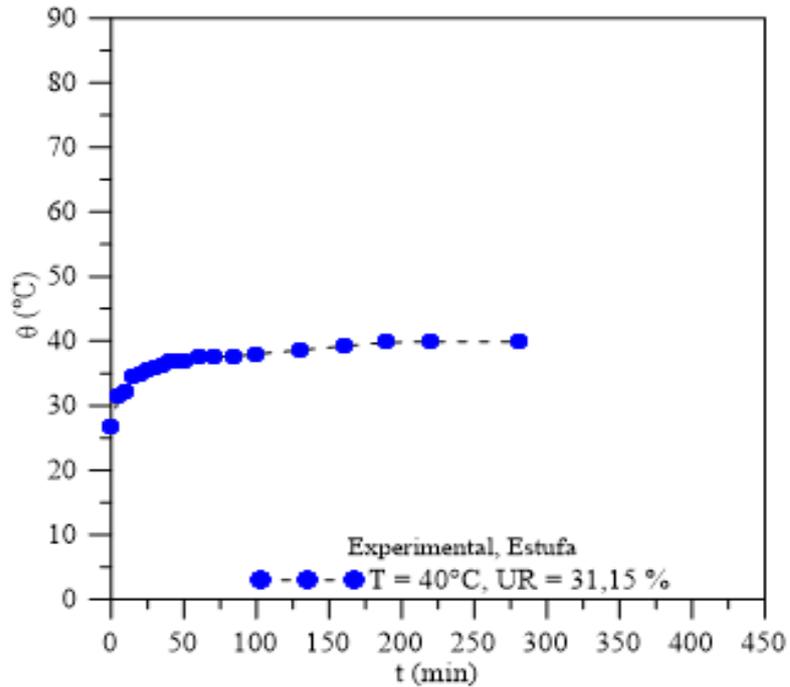


Figura 4.9 – Curva de temperatura superficial da semente de mamona em função do tempo para a temperatura do ar de secagem ($T = 50^{\circ}\text{C}$, secagem em estufa). Fonte: Autor (2017).

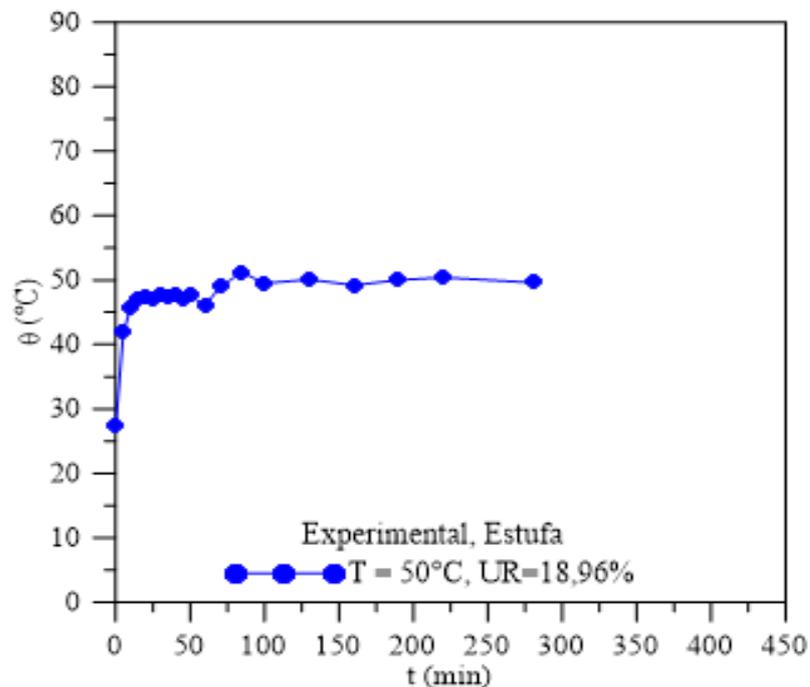
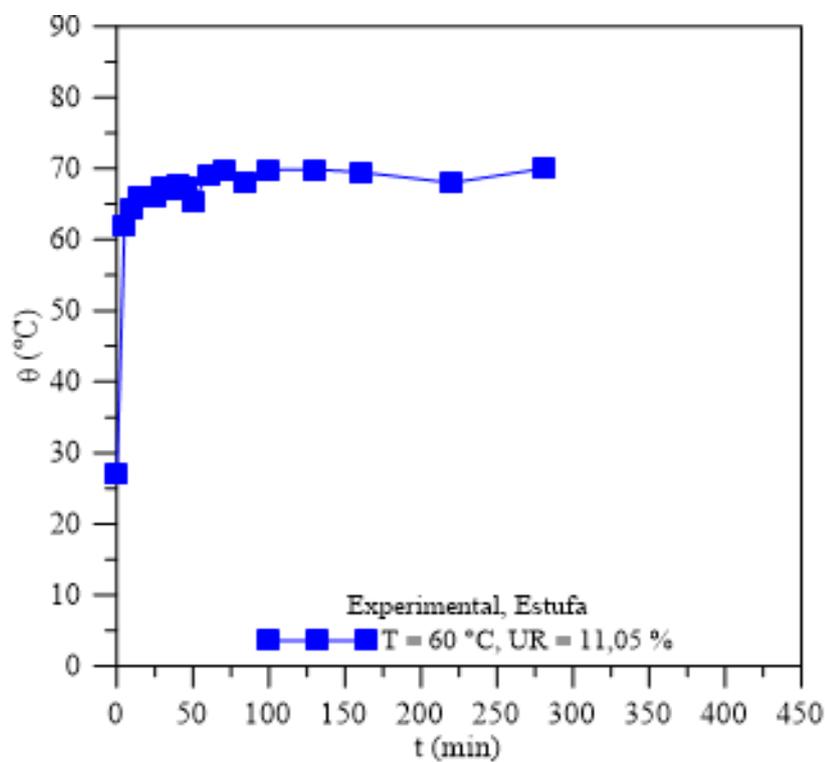


Figura 4.10 – Curva de temperatura superficial da semente de mamona em função do tempo para a temperatura do ar de secagem ($T = 60^{\circ}\text{C}$, secagem em estufa). Fonte: Autor (2017).



Analisando um pouco mais as Figuras 4.8, 4.9 e 4.10, pode-se dizer que, durante o estágio inicial de secagem há um visível aumento da temperatura do produto durante os primeiros minutos do processo de secagem, sendo menos significativa para a temperatura de 40°C e mais acentuada a medida que a temperatura de secagem cresce.

A medida que o grão se aquece, ocorre transferência de umidade do interior da semente para a superfície e, após prolongamento do tempo, a perda de umidade tende a se estabilizar, causando assim uma estabilidade na temperatura do produto à medida que o tempo aumenta.

As Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 ilustram o crescimento da temperatura do produto em função do pequeno intervalo de tempo para as temperaturas de secagem de 70°C , 80°C e 90°C . A medida que a temperatura cresce, criam-se tensões, que operam em sentido contrário entre a camada interna e externa do sólido e, quanto maior a perda de umidade e aumento da temperatura do produto, maiores serão as tensões resultantes dentro do produto.

Figura 4.11 – Curva de temperatura superficial da semente de mamona em função do tempo para a temperatura do ar de secagem ($T = 70^{\circ}\text{C}$, secagem em estufa). Fonte: Autor (2017).

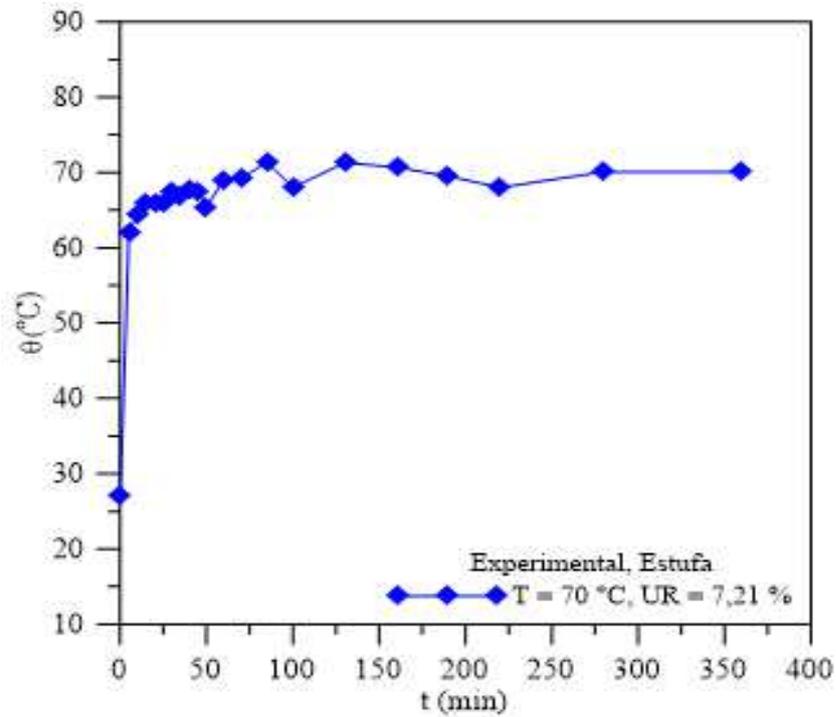


Figura 4.12 – Curva de temperatura superficial da semente de mamona em função do tempo de secagem ($T = 80^{\circ}\text{C}$, secagem em estufa). Fonte: Autor (2017).

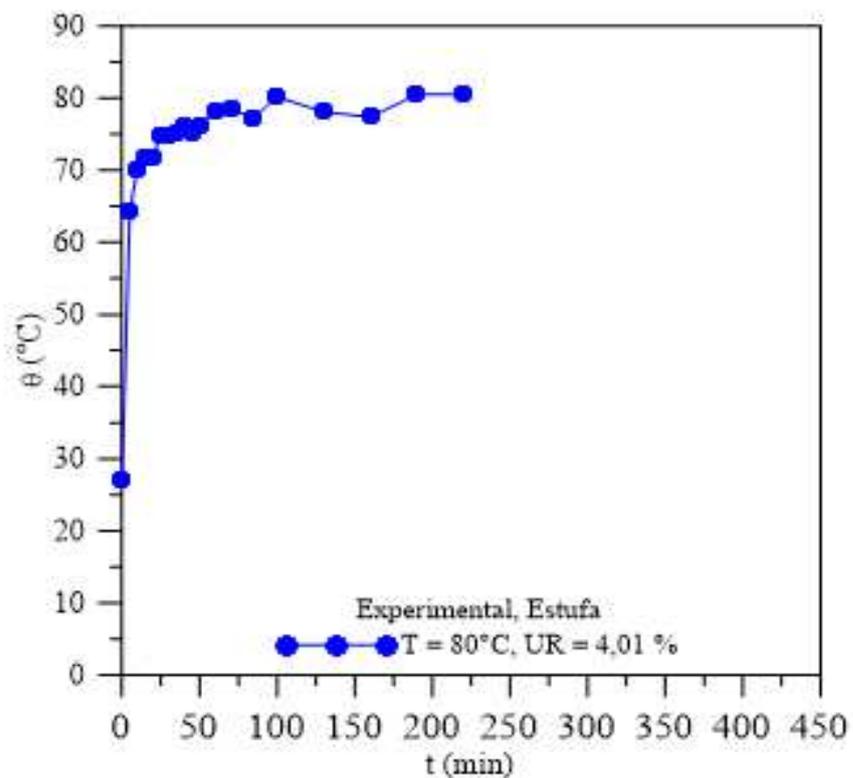
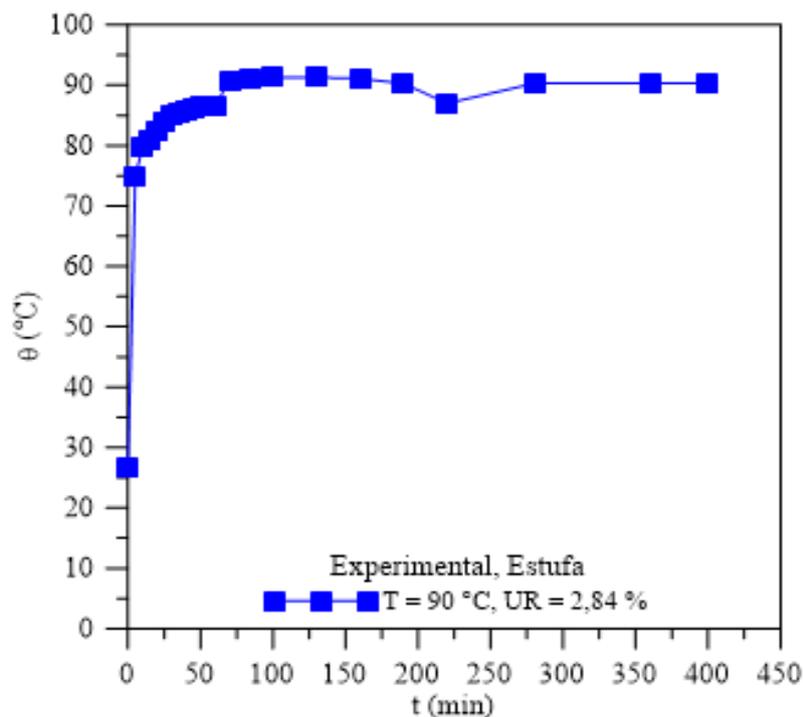


Figura 4.13 – Curva de temperatura superficial da semente de mamona em função do tempo para a temperatura do ar de secagem ($T = 90^{\circ}\text{C}$, secagem em estufa). Fonte: Autor (2017).



As Figuras 4.14 a 4.19 ilustram a temperatura da semente de mamona em função do seu teor de umidade ao longo do processo de secagem. A partir de uma análise destas figuras e das Figuras 4.8, 4.9 e 4.10, verifica-se a inexistência de um período de temperatura e taxa de secagem constantes. Isto indica que a secagem ocorre no período de taxa de secagem decrescente, em qualquer estágio e temperatura do processo.

Uma das principais mudanças físicas que ocorrem nos produtos agrícolas durante o processo de secagem é a redução do seu volume ou contração volumétrica. A perda de água causa danos à estrutura celular do produto, levando à mudança na forma e no decréscimo em sua dimensão (redução do tamanho do tecido celular) (MAYOR e SERENO, 2004, RAMOS et al., 2003).

Figura 4.14 – Temperatura superficial da semente de mamona em função do teor de umidade (T = 40°C, secagem em estufa). Fonte: Autor (2017).

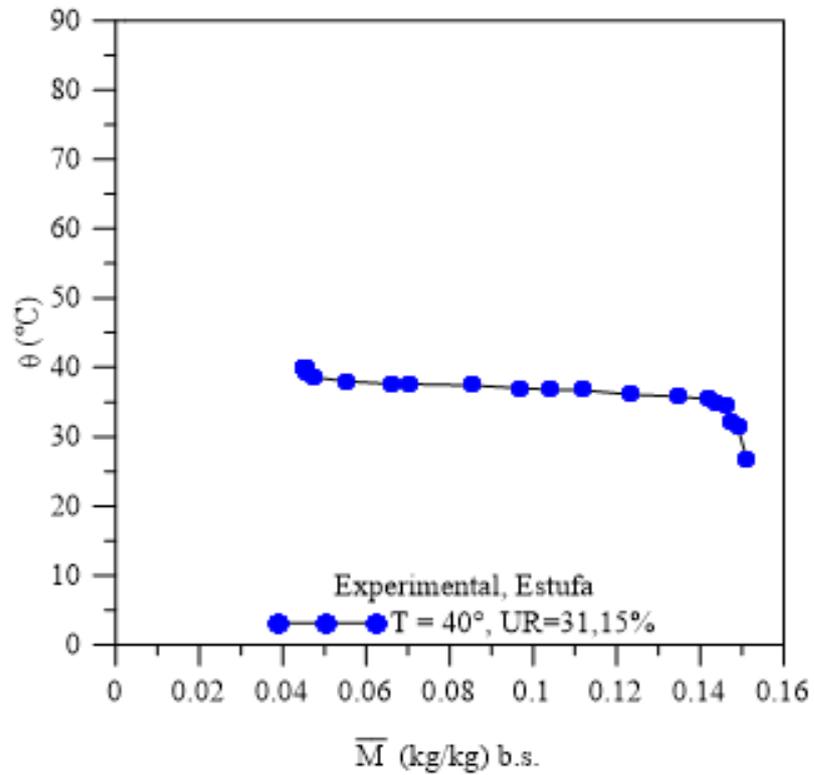


Figura 4.15 – Temperatura superficial da semente de mamona em função do teor de umidade (T=50°C, secagem em estufa). Fonte: Autor (2017).

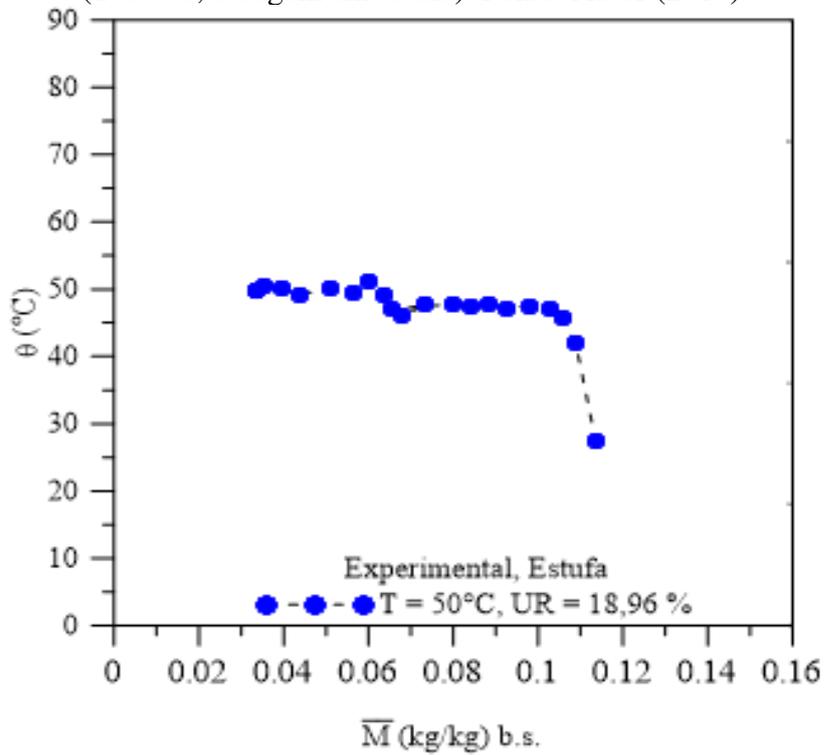


Figura 4.16 – Temperatura superficial da semente de mamona em função do teor de umidade (T=60°C, secagem em estufa). Fonte: Autor (2017).

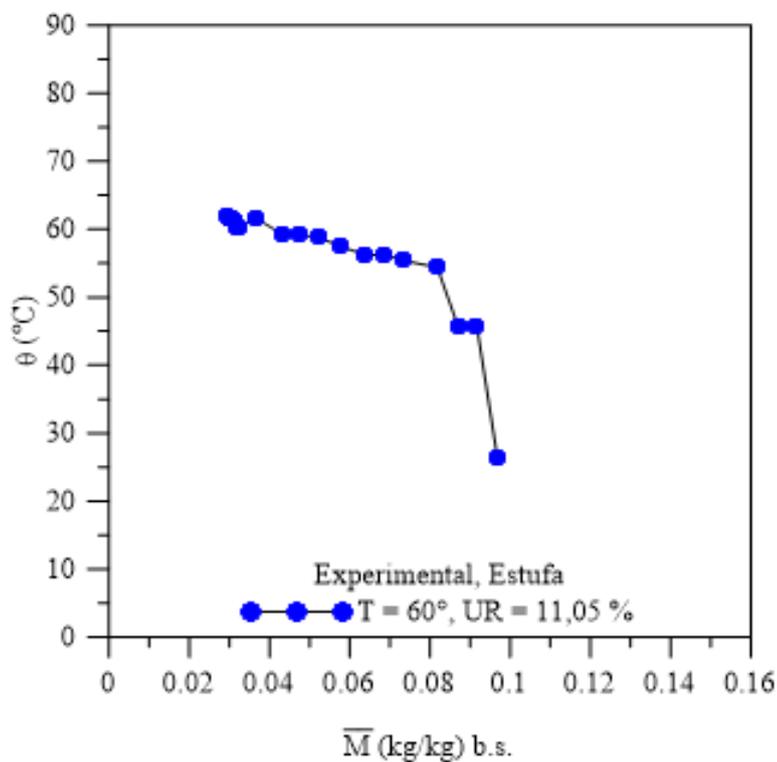


Figura 4.17– Temperatura superficial da semente de mamona em função do teor de umidade (T=70°C, secagem em estufa). Fonte: Autor (2017).

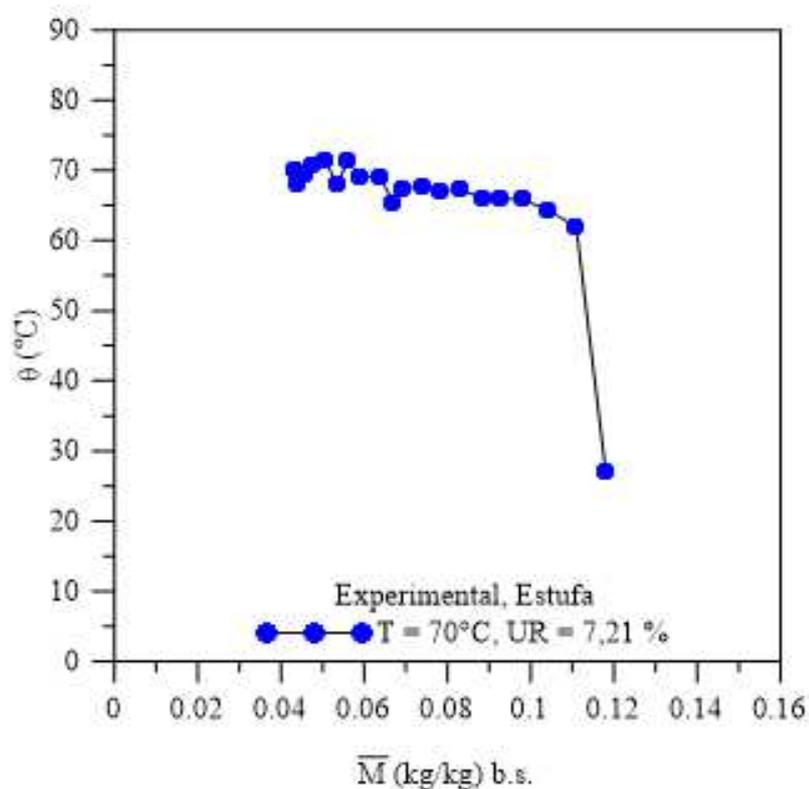


Figura 4.18 – Temperatura superficial da semente de mamona em função do teor de umidade (T=80°C, secagem em estufa). Fonte: Autor (2017).

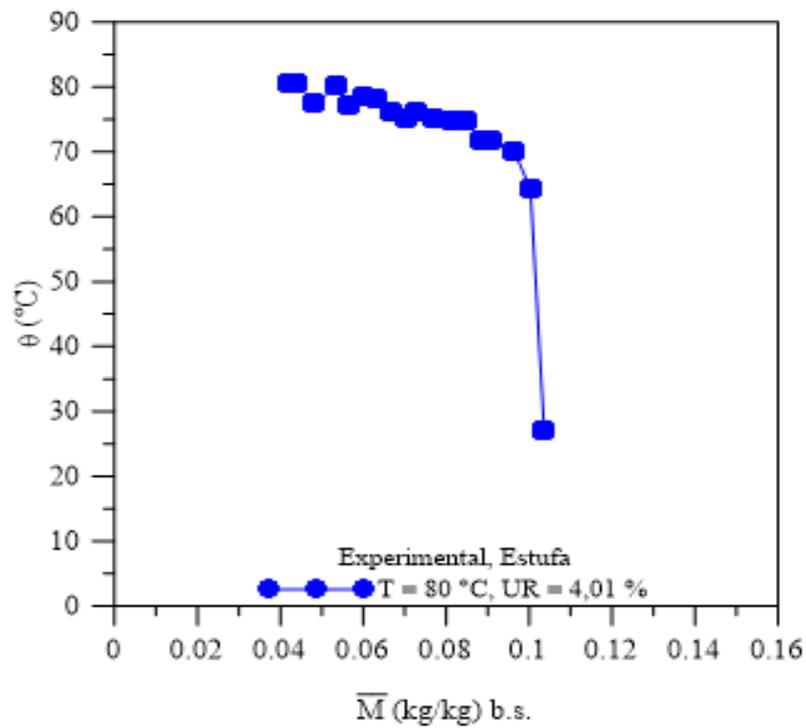
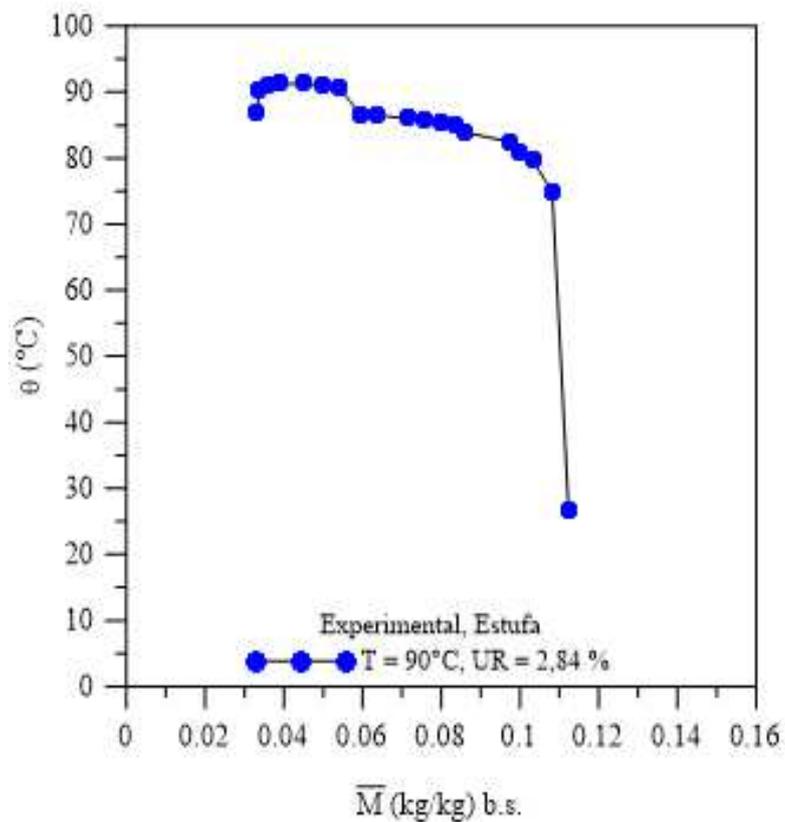


Figura 4.19 – Temperatura superficial da semente de mamona em função do teor de umidade (T=90°C, secagem em estufa). Fonte: Autor (2017).



4.1.3 Dados geométricos da semente da mamona para secagem em estufa.

Se o produto perde água é obvio que seu formato varia, ou seja, ocorre uma contração volumétrica, que é uma relação entre o volume para cada teor de umidade e o volume inicial. Com base nos resultados apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2, verifica-se que a forma das sementes de mamona sofre influência pela redução do teor de água. As dimensões características (comprimento, largura e espessura) sofrem redução em todas suas magnitudes.

A Tabela 4.1 resume as dimensões das sementes de mamona, antes e após a secagem em estufa, em diferentes temperaturas. Já a Tabela 4.2 resume todos os parâmetros geométricos das sementes de mamona para cada condição de secagem.

Tabela 4.1 – Dimensões das sementes de mamona antes e após a secagem em estufa.

T (°C)	Antes da secagem (t = 0 min)				Após a secagem (t = 2880 min)			
	a ₀ (mm)	b ₀ (mm)	c ₀ (mm)	V ₀ (mm ³)	a (mm)	b (mm)	c (mm)	V (mm ³)
40	17,60	7,61	14,00	985,62	17,37	7,48	13,79	942,02
50	17,63	7,58	13,64	947,98	17,26	7,38	13,25	872,46
60	17,30	7,45	13,42	832,23	17,09	7,13	13,11	832,23
70	17,89	7,54	14,22	1018,00	17,76	7,22	14,08	953,68
80	17,68	7,50	14,13	987,65	17,55	7,50	14,13	923,87
90	17,83	7,43	13,94	969,32	17,74	7,33	13,84	943,64

Tabela 4.2 – Parâmetros geométricos das sementes de mamona antes e após secagem em estufa.

T (°C)	Antes da secagem (t = 0 s)				Após a secagem (t= 2880 min)				ψ (V/V ₀) (mm/mm)	A/A ₀ (mm/mm)
	Dg ₀ (mm)	Es ₀ (mm)	A ₀ (mm ²)	V ₀ (mm ³)	D _g (mm)	E _s (mm)	A (mm ²)	V (mm ³)		
40	12,32	70,08	38,72	985,62	12,14	69,01	38,14	942,08	0,96	0,96
50	12,21	69,29	38,37	947,98	11,90	69,88	37,39	872,46	0,92	0,97
60	12,00	69,40	37,69	901,87	11,86	68,39	36,73	832,23	0,92	0,97
70	12,44	69,54	39,07	1018,0	12,17	68,77	38,24	953,60	0,94	0,98
80	12,33	69,70	38,73	987,65	11,94	69,53	37,50	923,87	0,94	0,97
90	12,27	68,77	38,53	969,32	12,16	68,73	37,80	943,64	0,97	0,98

Após análises das Tabelas 4.1 e 4.2, verifica-se que o volume da semente variou de no máximo 8 %, enquanto que sua área variou no máximo 4 % (assumindo a semente como um elipsoide triaxial).

As Figuras 4.20 a 4.23 ilustram a aparência das sementes de mamona antes e após a secagem, nas temperaturas de 40 e 90°C, respectivamente. Após análise dessas figuras percebe-se que os grãos da mamona apresentam-se com uma aparência similar ao seu estado “in natura”, contudo nada pode-se afirmar com respeito ao seu vigor e germinação, bem como da sua composição química.

Figura 4.20 – Aparência do grão de mamona antes do processo de secagem em estufa.

Fonte: Autor (2017).



Figura 4.21 – Aparência do grão antes do processo de secagem em estufa. Fonte:

Autor (2017).



Figura 4.22 – Sementes de mamona antes do processo de secagem. Fonte: Autor (2017).



Figura 4.23 – Semente de mamona após processo de secagem em estufa na temperatura de 90°C. Fonte: Autor (2017).



4.2 Secagem da semente de mamona em secador de esteira

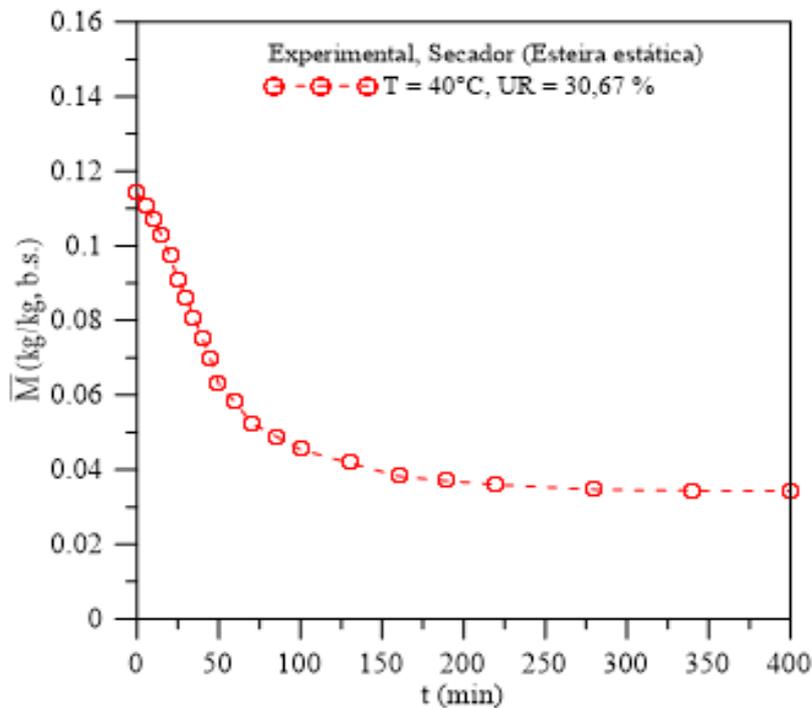
4.2.1 Cinética da secagem da semente de mamona

As Figuras 4.24 a 4.26 ilustram as cinéticas de secagem das sementes de mamonas realizados no secador de esteira no modo estático, para as temperaturas de 40, 50 e 60°C, respectivamente. Já as Figuras 4.27 a 4.29 ilustram as mesmas curvas para as temperaturas de 70, 80 e 90°C, respectivamente.

A partir da análise dessas figuras, verifica-se que as mesmas apresentam um comportamento bem peculiar, com bastante semelhança à secagem do mesmo produto realizado em estufa. Observa-se que, à medida que o produto vai aquecendo, sua umidade tende a diminuir. As sementes de mamona vão se adequando a temperatura em função do tempo de secagem, alcançando no decorrer do tempo (250 min) sua umidade de equilíbrio, por exemplo, para a temperatura de secagem de 90°C.

Com o aumento da temperatura, a umidade do produto tende a apresentar uma alteração mais significativo até os 70 minutos do processo, devido a rápida migração da água livre no interior do grão para a superfície. Mas, com o prolongamento contínuo do tempo de secagem, a umidade tende a entrar de forma mais rápida em estado de equilíbrio, para temperaturas mais elevadas.

Figura 4.24 – Teor da umidade (base seca) das sementes de mamona em função do tempo de secagem ($T = 40^{\circ}\text{C}$, secagem em secador com esteira estática). Fonte: Autor (2017).



Não são recomendados altos gradientes térmicos nas sementes, ou entre as sementes e o ar de secagem, porque isto produz uma secagem não uniforme e gera-se tensões térmicas, hídricas e mecânica nas sementes, o que pode causar rachaduras, fissuras e deformação no sólido, comprometendo sua qualidade no fim do processo de secagem.

Figura 4.25 – Teor da umidade (base seca) das sementes de mamona em função do tempo de secagem ($T = 50^{\circ}\text{C}$, secagem em secador com esteira estática). Fonte: Autor (2017).

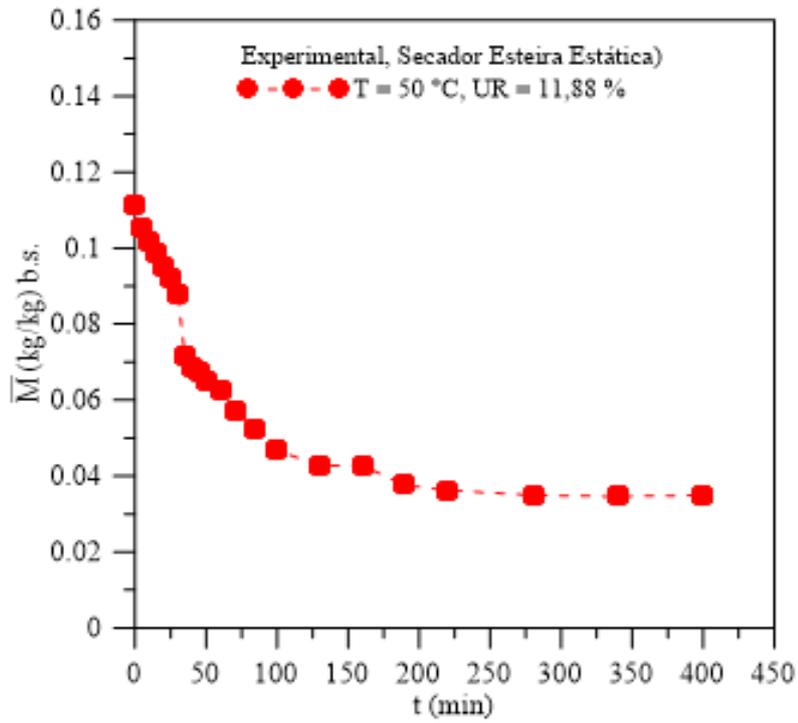


Figura 4.26 – Teor da umidade (base seca) das sementes de mamona em função do tempo de secagem ($T = 60^{\circ}\text{C}$, secagem em secador com esteira estática). Fonte: Autor (2017).

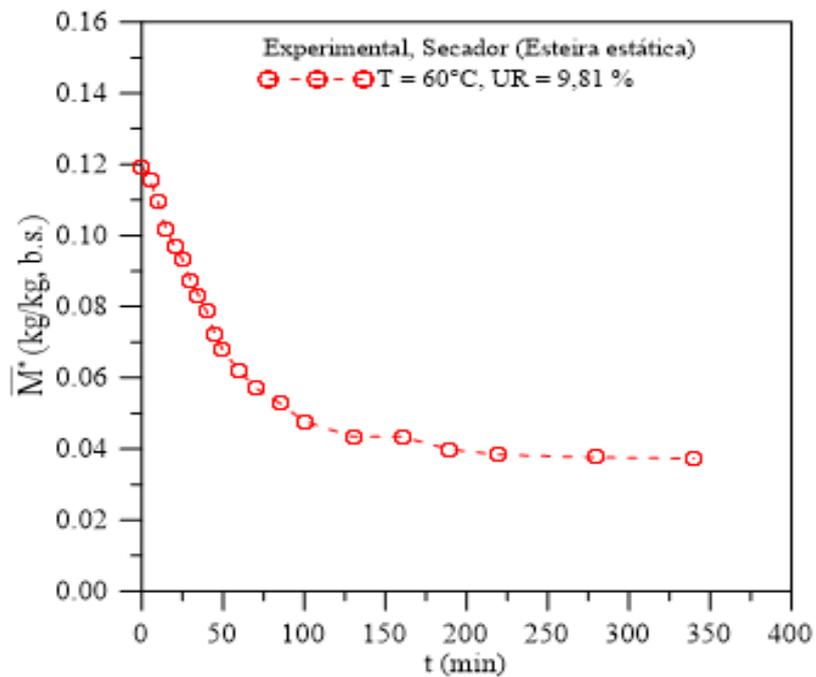


Figura 4.27 – Teor da umidade (base seca) das sementes de mamona em função do tempo de secagem ($T = 70^{\circ}\text{C}$, secagem em secador com esteira estática). Fonte: Autor (2017).

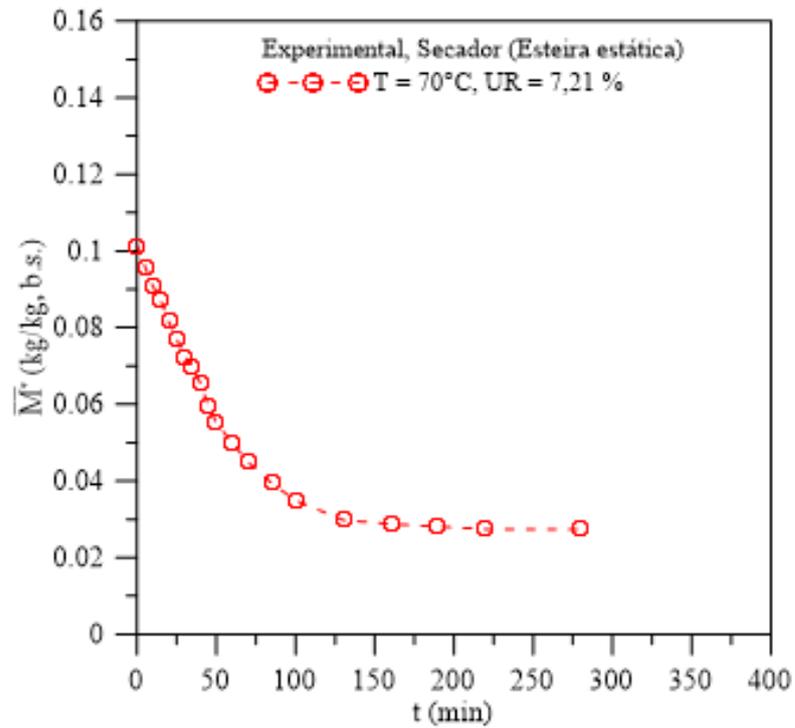


Figura 4.28 – Teor da umidade (base seca) das sementes de mamona em função do tempo de secagem ($T = 80^{\circ}\text{C}$, secagem em secador com esteira estática). Fonte: Autor (2017).

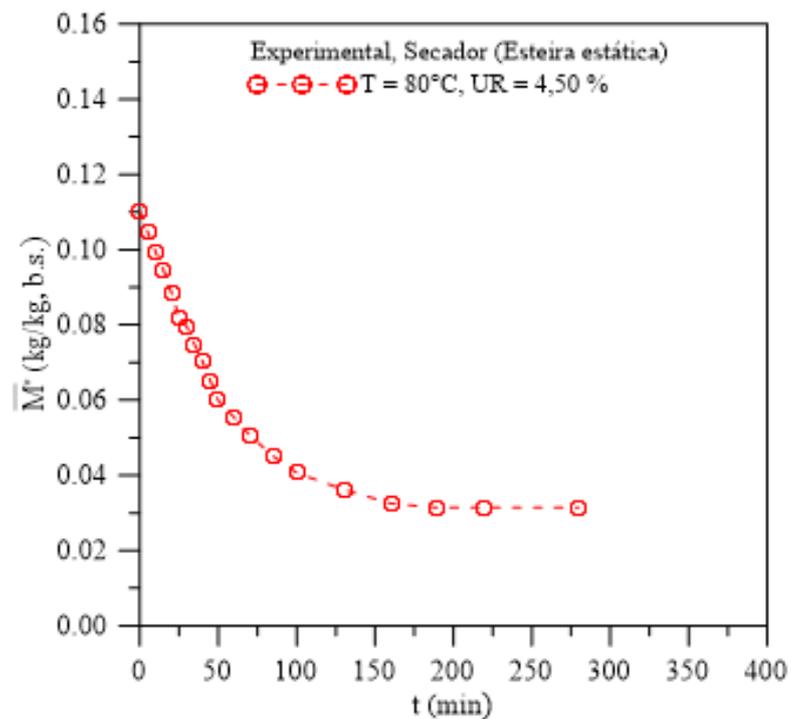
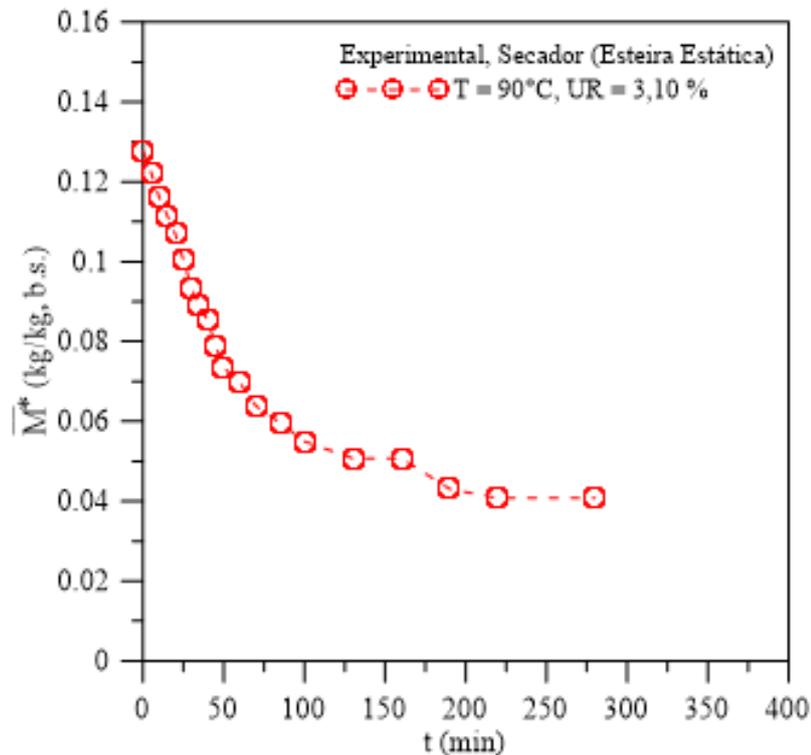


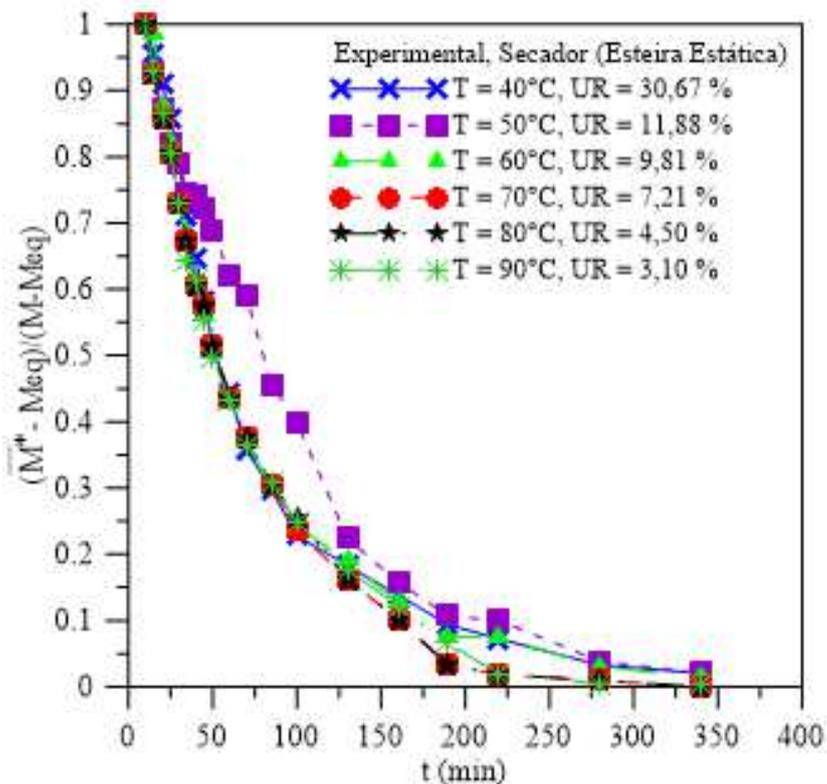
Figura 4.29 – Teor da umidade (base seca) das sementes de mamona em função do tempo de secagem ($T = 90^{\circ}\text{C}$, secagem em secador com esteira estática). Fonte: Autor (2017).



A Figura 4.30 ilustra uma comparação entre os teores de umidade adimensional (base seca) em função do tempo para as seis temperaturas do ar de secagem (40, 50, 60, 70, 80 e 90°C). Como pode ser visto, os resultados do teor de umidade estão plotados na forma adimensional.

Neste gráfico, percebe-se que houve equilíbrio satisfatório entre as curvas de secagem que pode levar a um produto final de qualidade aceitável comercialmente. De qualquer forma, verifica-se um comportamento similar ao apresentado para a secagem em estufa. Em geral, quanto maior a temperatura e menor a umidade relativa do ar, mais rápido é o processo de secagem. Contudo, ao se analisar esta figura, verifica-se este comportamento não é verificado completamente. A explicação para tal fato está relacionado com os diferentes teores de umidade inicial e final das sementes de mamona.

Figura 4.30 – Teor de umidade adimensional das sementes de mamona em função do tempo de secagem (T = 40, 50, 60, 70, 80 e 90°C, secagem em secador com esteira estática). Fonte: Autor (2019).



4.2.2 Cinética de aquecimento da semente de mamona

As Figuras 4.31 a 4.36 ilustram o comportamento transiente da temperatura superficial das sementes de mamona em função do tempo de secagem, para as temperaturas de 40, 50, 60, 70, 80 e 90°C, e secagem no secador com esteira estática. Após análises destas figuras, verifica-se que a temperatura da superfície da semente aumenta com o tempo de secagem tendendo ao equilíbrio térmico, para tempos longos do processo (400 min para T = 40°C), decrescendo este tempo para temperatura mais elevadas. Pode-se ver ainda que a taxa de aquecimento é mais elevada quando a temperatura de secagem é mais alta. Isto pode provocar tensões térmicas e hídricas mais acentuadas, que podem comprometer a qualidade do produto ao final do processo.

Figura 4.31– Temperatura superficial da semente de mamona em função do tempo de secagem ($T = 40^{\circ}\text{C}$, secagem em secador com esteira estática). Fonte: Autor (2017).

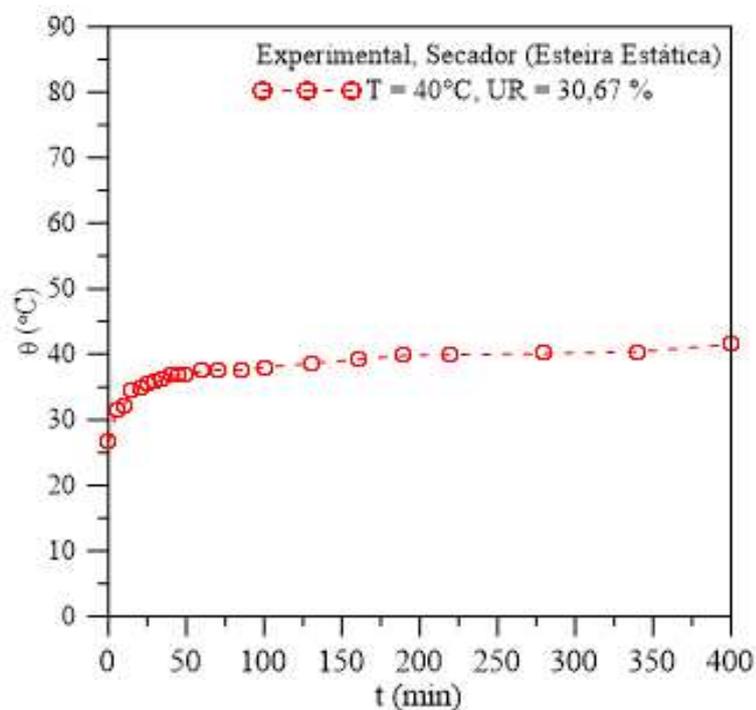


Figura 4.32 – Temperatura superficial da semente de mamona em função do tempo de secagem ($T = 50^{\circ}\text{C}$, secagem em secador com esteira estática). Fonte: Autor (2017)

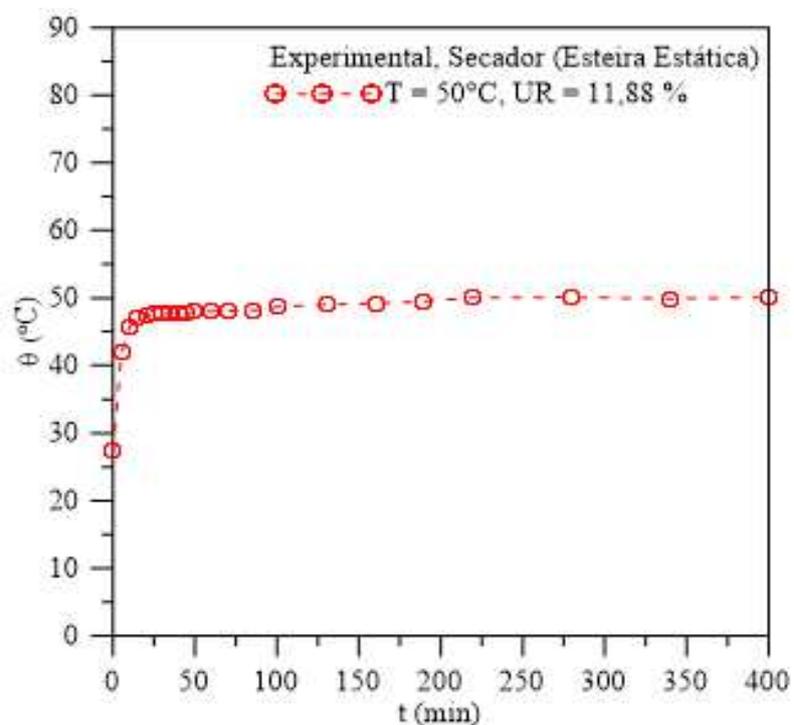


Figura 4.33 Temperatura superficial da semente de mamona em função do tempo de secagem (T = 60°C, secagem em secador com esteira estática). Fonte: Autor (2017).

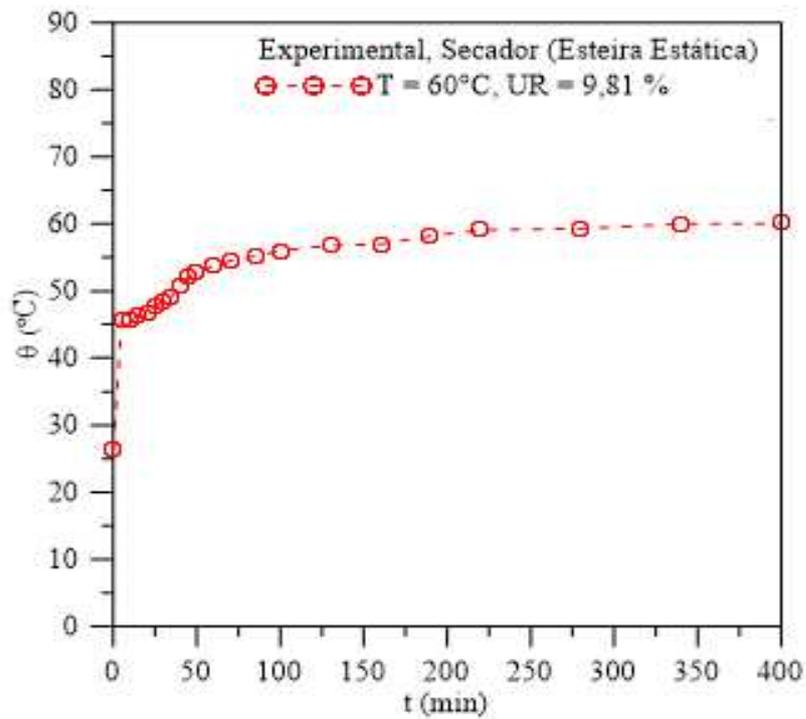


Figura 4.34 – Temperatura superficial da semente de mamona em função do tempo de secagem (T = 70°C, secagem em secador com esteira estática). Fonte: Autor (2017).

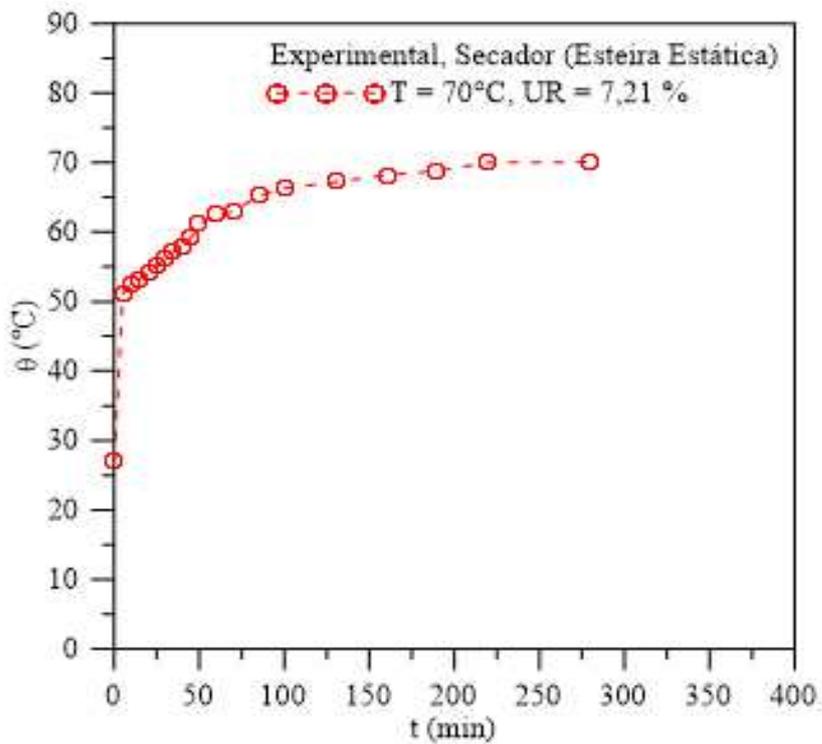


Figura 4.35 – Temperatura superficial da semente de mamona em função do tempo de secagem ($T = 80^{\circ}\text{C}$, secagem em secador com esteira estática). Fonte: Autor (2017).

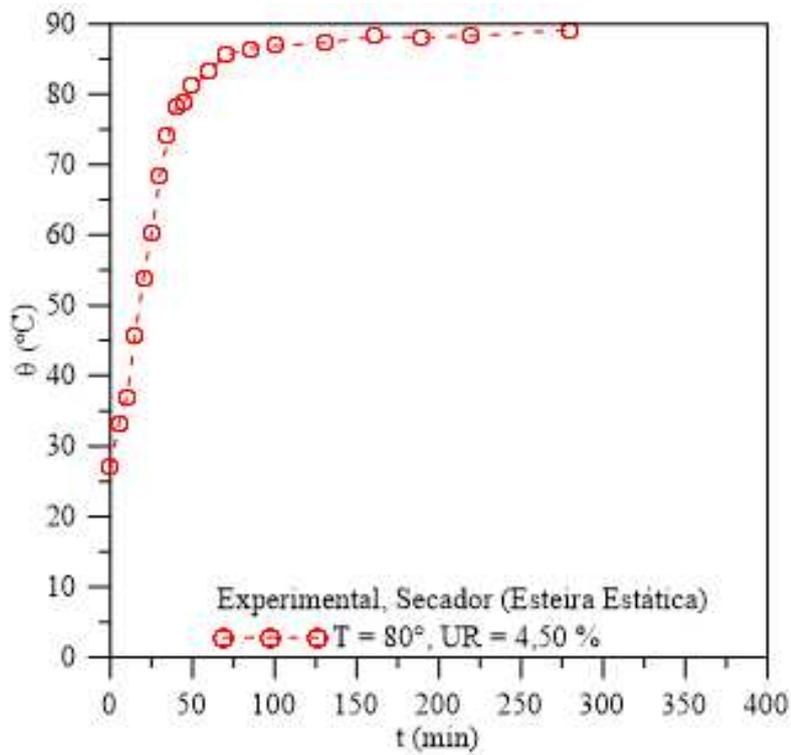
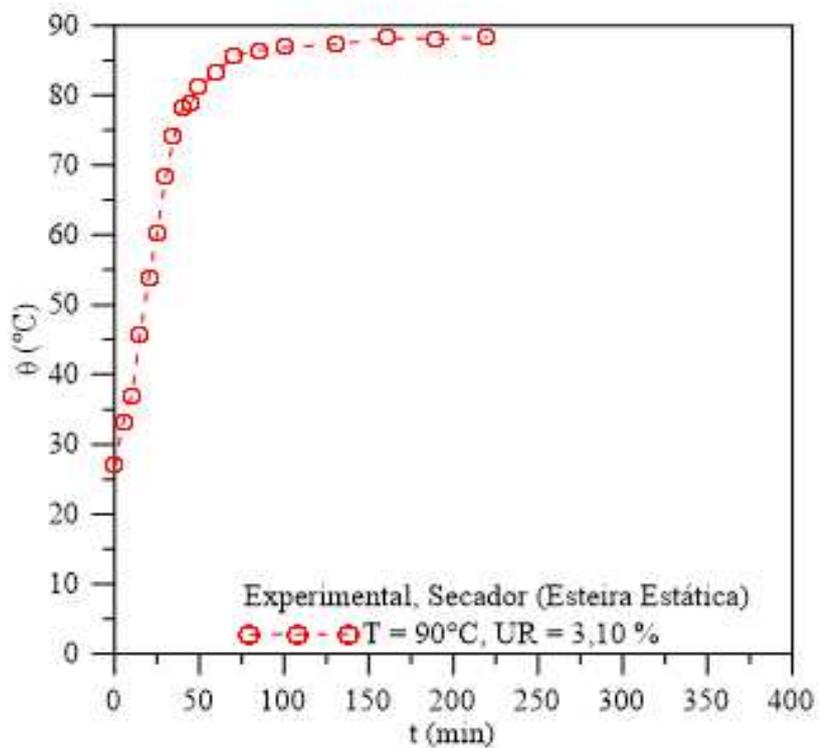


Figura 4.36 Temperatura superficial da semente de mamona em função do tempo de secagem ($T = 90^{\circ}\text{C}$, secagem em secador com esteira estática). Fonte: Autor (2017).



4.2.3 Dados geométricos da semente de mamona para secagem em secador com esteira estática

Uma das principais mudanças físicas que ocorrem nos produtos agrícolas durante o processo de secagem é a redução do seu volume interno. A perda de água causa danos à estrutura celular do produto, levando à mudança na forma e no decréscimo em sua dimensão (redução do tamanho do tecido celular).

Segundo CORREIA (2005), a contração volumétrica dos produtos vegetais durante o processo de secagem, não é função exclusivamente do teor de água, mas depende, também, das condições no qual é submetido todo processo e da geometria do produto (MAYOR e SERENO, 2004, RAMOS et al. 2003). Já segundo Goneli et al. (2010), dependendo do método e das condições de secagem, a contração volumétrica do produto pode tornar-se muito intensa, podendo até afetar parâmetros da transferência de calor e massa, significativamente.

As Tabelas 4.3 e 4.4 resumem todos os parâmetros geométricos das sementes de mamona, para cada condição de secagem, ante e após todo processo de secagem.

Tabela 4.3 – Parâmetros geométricos das sementes de mamona antes e após secagem em secador com esteira estática.

Dimensões das sementes de mamona								
T (°C)	Antes da secagem (t=0 min)				Após a secagem (t=2880 min)			
	a (mm)	b (mm)	c (mm)	V ₀ (mm ³)	a (mm)	b (mm)	c (mm)	V (mm ³)
40	17,60	7,61	14,00	985,62	17,37	7,48	13,79	942,08
50	17,58	7,55	13,59	941,11	17,44	7,48	13,40	912,47
60	17,20	7,42	13,31	885,06	17,15	7,34	13,17	865,61
70	18,88	7,22	14,60	890,02	18,70	7,15	13,90	852,28
80	18,13	7,51	14,15	946,48	18,18	7,45	14,00	904,86
90	17,52	7,53	13,66	950,50	17,27	7,35	13,46	900,42

Tabela 4.4 – Parâmetros geométricos das sementes de mamona antes e após a secagem em secador com esteira estática.

T (°C)	Antes da secagem (t = 0 s)				Após a secagem (t = 2880 min)				ψ (V/V ₀) (mm/mm)	A/A ₀
	D _{g0} (mm)	E _{s0} (mm)	A ₀ (mm ²)	V ₀ (mm ³)	D _g (mm)	E _s (mm)	A (mm ²)	V (mm ³)		
40	12,32	70,08	38,72	985,62	12,14	68,99	38,14	942,08	0,96	0,98
50	12,15	69,29	38,18	941,11	12,04	68,52	37,79	912,47	0,97	0,99
60	11,90	69,53	37,38	855,06	11,83	68,84	37,09	865,61	0,98	0,99
70	11,92	69,14	37,44	890,02	12,29	65,12	36,91	852,28	0,92	0,98
80	12,48	69,20	38,26	946,48	12,38	67,52	37,69	904,83	0,96	0,98
90	12,18	69,64	38,25	950,50	11,95	68,39	37,53	900,82	0,95	0,98

Após análise dessas tabelas verifica-se que a semente de mamona encolheu no máximo 8 % em volume, enquanto que sua área superficial variou, no máximo, 2 %, considerando a mesma como um elipsoide triaxial.

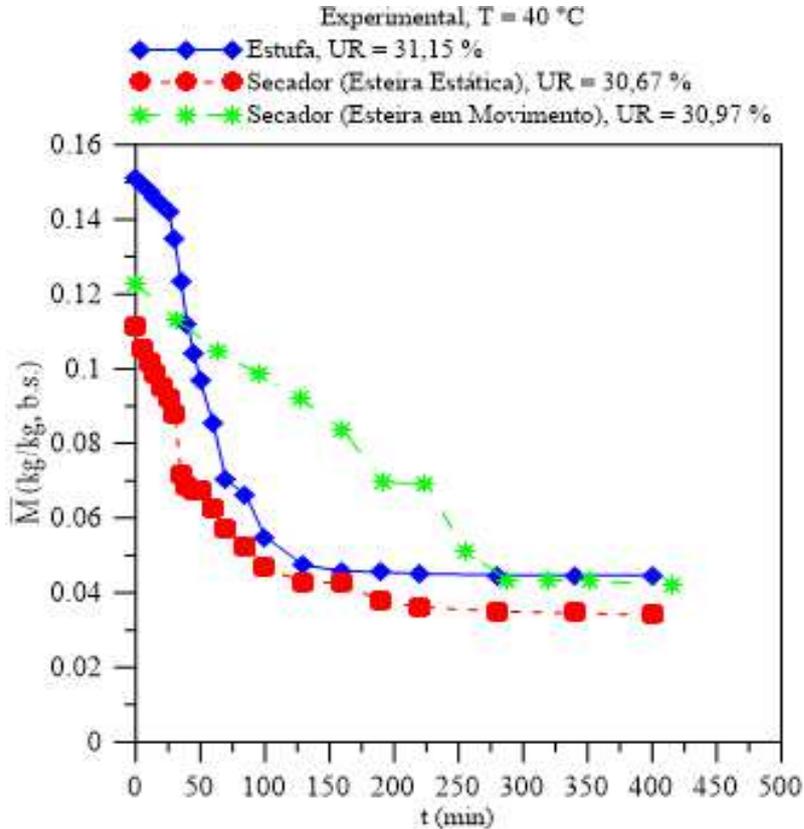
4.2.4 Comparação entre a secagem em estufa e secador de esteira.

As Figuras 4.37, 4.40 e 4.43 ilustram o comportamento da curva do teor de umidade em função do tempo, para a secagem em estufa e secador (com esteira estática e em movimento), para as temperaturas de 40, 70 e 90°C.

Já as Figuras 4.38, 4.41 e 4.44 ilustram o comportamento transiente de temperatura das sementes de mamona, para as mesmas condições de secagem. Sob estas mesmas condições, nas Figuras 4.39, 4.42 e 4.45 tem-se o comportamento da temperatura das sementes em função do teor de umidade em base seca.

Figura 4.37-Teor de umidade da semente de mamona (em base seca) em função do tempo de secagem (T=40°C, secador com esteira estática, secador com esteira em movimento e estufa).

Fonte: Autor (2019).



Após análises destas Figuras, verifica-se que não há um comportamento repetitivo. Quanto a perda de massa, observa-se que a semente de mamona seca mais rápido em temperaturas elevadas (Figura 4.43) quando se utiliza a estufa como equipamento de secagem.

Verifica-se ainda, um comportamento de perda de umidade bem diferente ao se utilizar o secador com esteiras em movimento, como equipamento de secagem.

Quanto ao comportamento do grão de mamona quando submetido a um processo transiente de secagem observa-se que, quanto mais elevada for a temperatura, o produto tende a entrar em equilíbrio em um intervalo de tempo mais curto, tendendo o grão a entrar em equilíbrio em um intervalo de tempo pequeno. As diferenças existentes entre as curvas são devido ao teor de umidade inicial das amostras em função temperatura e da velocidade do ar de secagem.

Figura 4.38-Temperatura da semente de mamona em função do tempo de secagem (T = 40°C secador com esteira estática, secador com esteira em movimento e estufa). Fonte: Autor (2019).

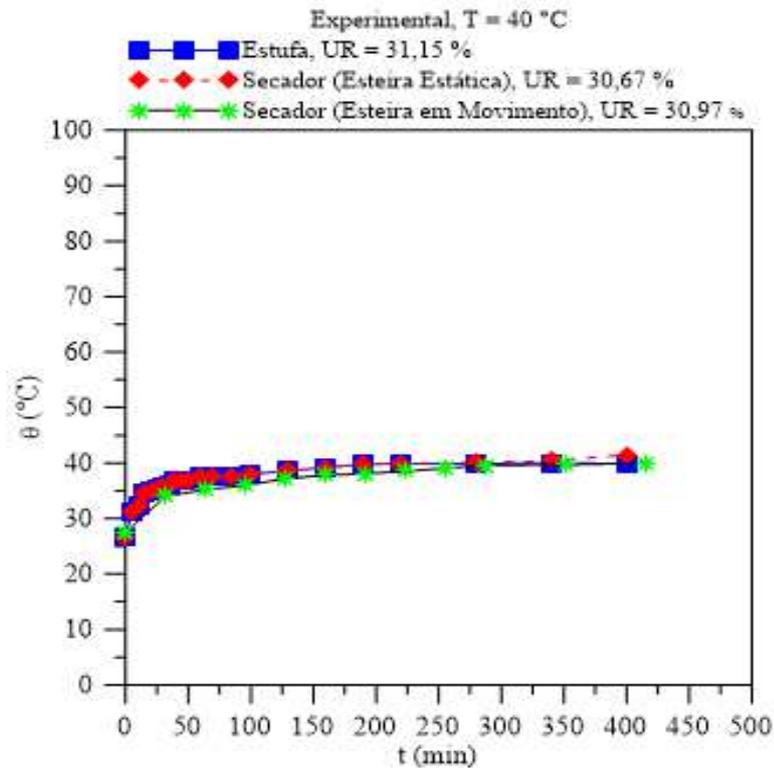


Figura 4.39-Temperatura da semente de mamona em função do teor de umidade em base seca (T=40°C, secador com esteira estática, secador com esteira em movimento e estufa). Fonte: Autor (2019).

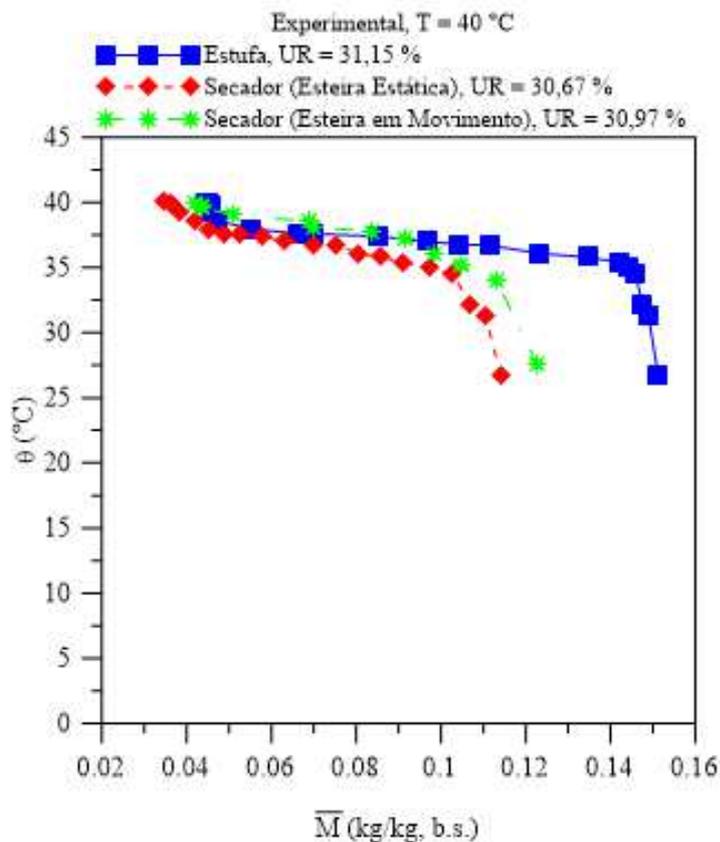


Figura 4.40-Teor de umidade da semente de mamona (em base seca) em função do tempo de secagem (T=70°C, secador com esteira estática, secador com esteira em movimento e estufa).

Fonte: Autor (2019).

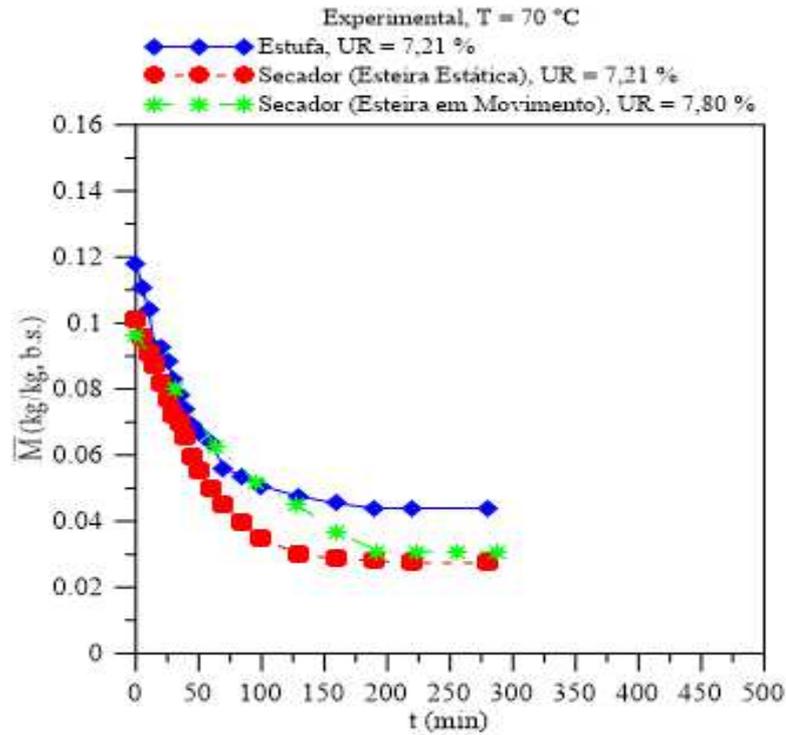


Figura 4.41-Temperatura da semente de mamona em função do teor de umidade em base seca (T=70°C, secador com esteira estática, secador com esteira em movimento e estufa). Fonte:

Autor (2019).

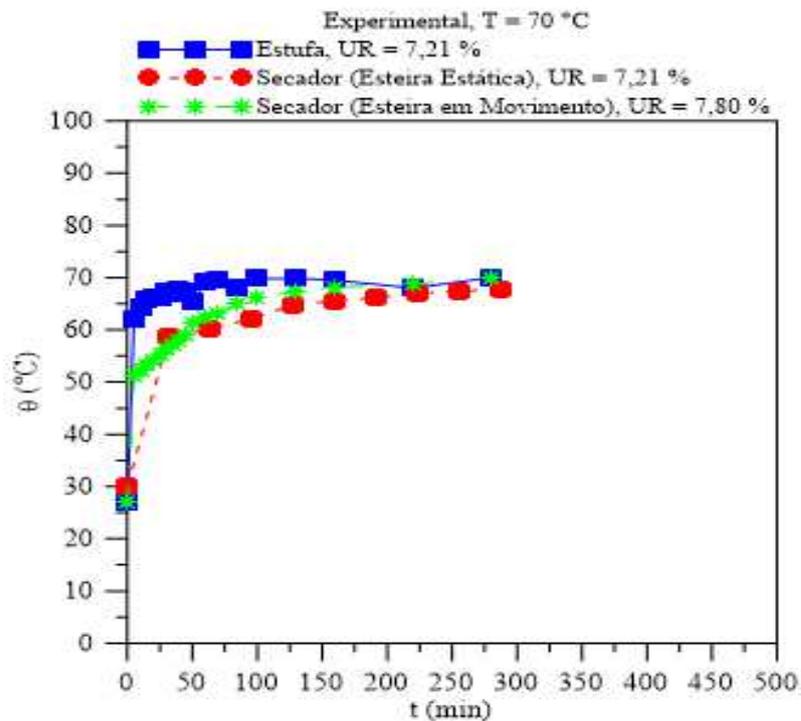


Figura 4.42 - Temperatura da semente de mamona em função do teor de umidade em base seca ($T=40^{\circ}\text{C}$, secador com esteira estática, secador com esteira em movimento e estufa).

Fonte: Autor (2019).

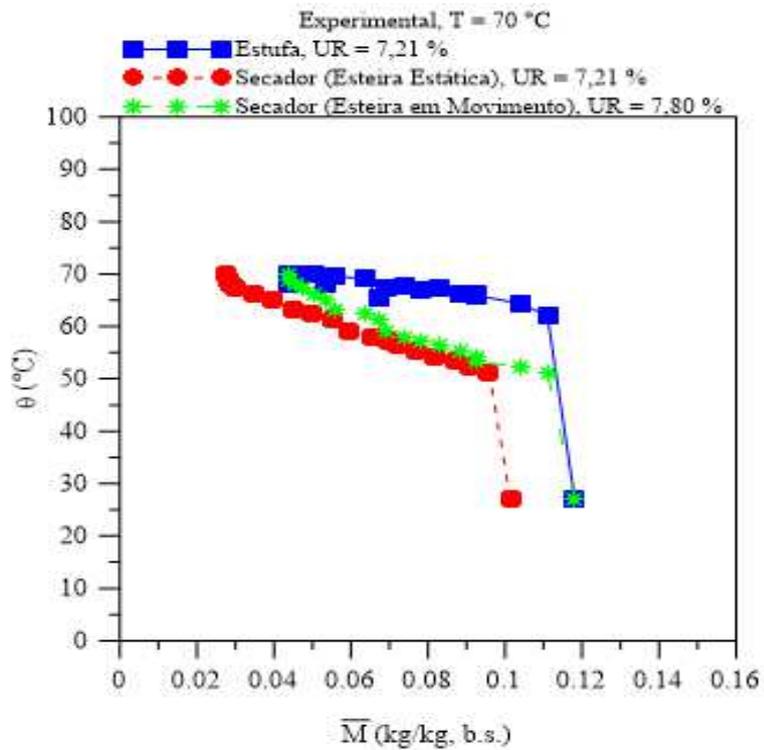


Figura 4.43 - Teor de umidade da semente de mamona (em base seca) em função do tempo de secagem ($T=70^{\circ}\text{C}$, em estufa, secador com esteira estática, secador com esteira em movimento). Fonte: Autor (2019).

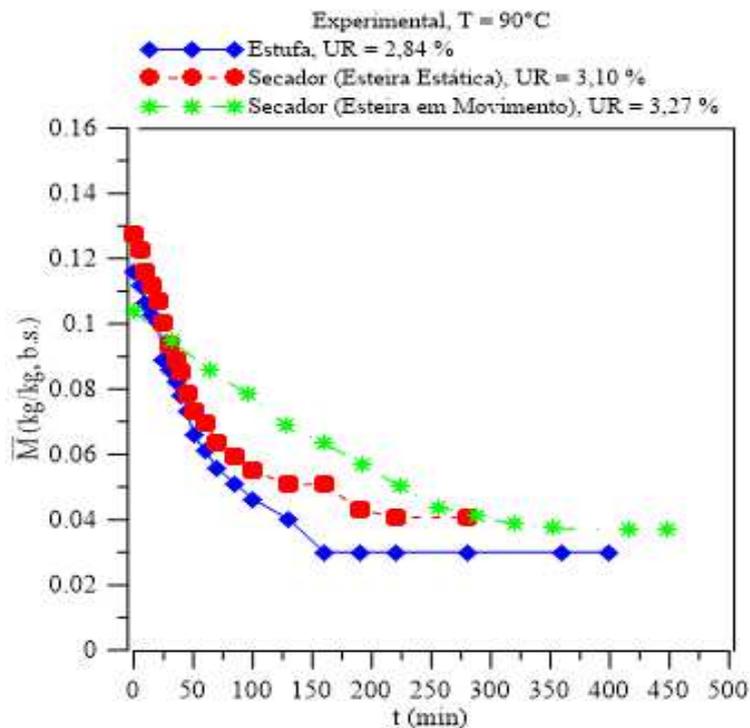


Figura 4.44 - Temperatura da semente de mamona em função do teor de umidade em base seca ($T=70^{\circ}\text{C}$, secador com esteira estática, secador com esteira em movimento e estufa).

Fonte: Autor (2019).

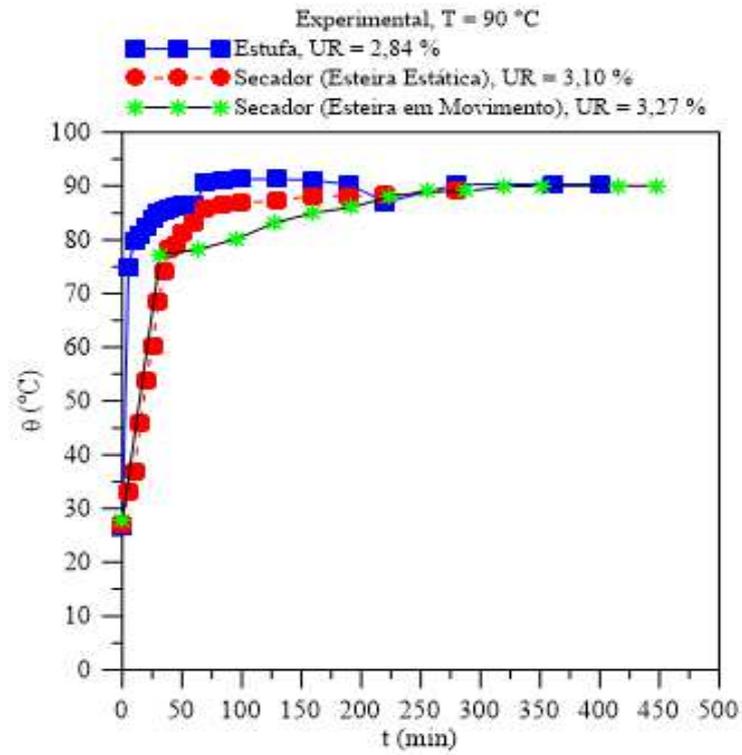
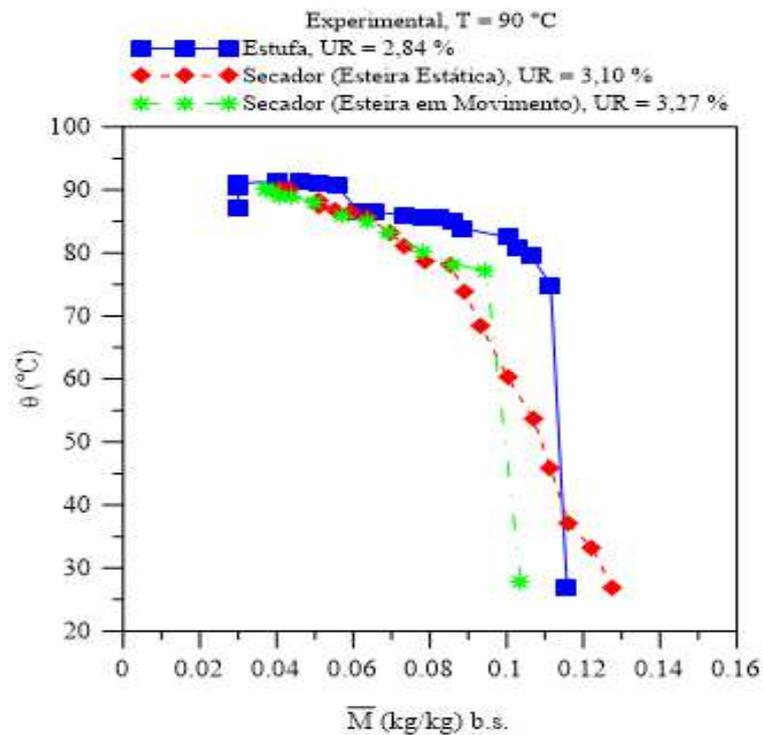


Figura 4.45 - Temperatura da semente de mamona em função do teor de umidade em base seca ($T=40^{\circ}\text{C}$, em estufa, secador com esteira estática, secador com esteira em movimento).

Fonte: Autor (2019).



4.3 Características do secador de esteira e fluxos cruzados

Como foi mencionado no capítulo 3, diversas modificações e testes foram realizados no secador relacionadas ao sistema de transmissão (velocidade da esteira, e tempo total gasto para percurso das seis esteiras), sistema de aquecimento diferentes para cada módulo e sistema de insuflamento (controle da vazão do fluxo de ar dos ventiladores, independentes). Assim, devido à importância, será mostrada a seguir alguns parâmetros de desempenho do secador (mecânico, elétrico e térmico), e discutido alguns aspectos financeiros do equipamento aperfeiçoado.

4.3.1 Sistema de transmissão e velocidade da esteira

O secador de esteiras e de fluxos cruzados foi desenvolvido para se adaptar a diferentes condições e tipo e natureza dos materiais de secagem (grãos, frutas, etc.). Para isso, o controle de velocidade das esteiras foi uma das etapas solucionada. Esse controle de velocidade foi conseguido através do uso de um inversor de frequência e um redutor de velocidade, acoplado ao motor que impulsiona todo sistema de transmissão.

Devido a versatilidade do inversor de frequência tornou-se possível obter controle total da velocidade e tempo gasto para execução do deslocamento do produto nas esteiras. A Tabela 4.5 resume a rotação do sistema de transmissão necessária para obtenção de um tempo de 32 minutos, para que produto realize todo percurso do secador em uma única esteira.

Tabela 4.5 - Velocidade do sistema de transmissão.

Ns (rpm)	If (Hz)	V (m/h)	t (min)
1450	5,55	0,00069	32

A velocidade da esteira foi determinada para uma rotação máxima permitida pelo fabricante do motor que é de 1450 rpm, obtendo uma velocidade correspondente na esteira de $6,9 \times 10^{-4}$ m/s. Para se alterar a velocidade da esteira, basta variar a frequência do inversor de velocidade em função do material a ser seco.

4.3.2 Sistema de aquecimento e controle temperatura do ar de secagem.

Para o processo de secagem de sólidos úmidos, entre outras variáveis, é necessário realizar um controle da temperatura no interior de cada câmara fechada. Dependendo do tipo de material a ser submetido a secagem, torna-se necessário especificar uma temperatura para que o processo seja realizado adequadamente.

No secador desenvolvido, as temperaturas de secagens podem variar de 40 a 110 °C. Cada módulo pode operar em diferentes temperaturas, podendo-se realizar três processos de secagens com materiais diferentes ao mesmo tempo, já que o controle dessa temperatura é feita de forma independente. Como elemento aquecedor, foi usado um arranjo de resistências em paralelo para que fosse atingida a menor resistência elétrica possível, de forma que a maior potência possível fosse dissipada e, por efeito joule o calor fosse liberado para o meio. Junto a cada grupo de resistências foi montado um sistema de ventilação forçada para dispersar o calor gerado no grupo de resistências elétricas.

Inicialmente, a opção considerada para acionar as resistências e realizar o controle de potência foi um circuito de controle de ângulo de disparo usando tiristores. Embora tenha sido projetado e simulado, esse sistema não chegou a ser implementado, pois foi substituído por relés de estado sólido o qual se apresentou como uma boa alternativa para o controle de potência. É bastante utilizado na automação industrial, tendo seu uso bastante seletivo no processo de aquecimento, onde liga e desliga várias resistências n vezes, ou seja, estabiliza o controle de temperatura, não permitindo queda deste parâmetro. Pode ser alimentado através de corrente contínua ou alternada (Figura 4.46).

Para fixar as resistências elétricas selecionadas na estrutura do secador, dois tipos de suportes foram construídos. O primeiro, visto na Figura 4.47 que foi desenvolvido por Holanda (2007) e o segundo foi um sistema artesanal selecionado para compor os módulos A e B, como expostas nas Figuras 4.48 e 4.49. No segundo suporte, diferente do primeiro, as resistências estão paralelas à direção do fluxo de ar. Essa posição tem a finalidade de reduzir ou eliminar as regiões incandescentes. Nesse novo modelo, verifica-se que as regiões incandescentes foram eliminadas.

Figura 4.46 - Curva de aquecimento e resfriamento da resistência elétrica medidos a 3 cm da fonte de calor. Fonte: Autor (2018).

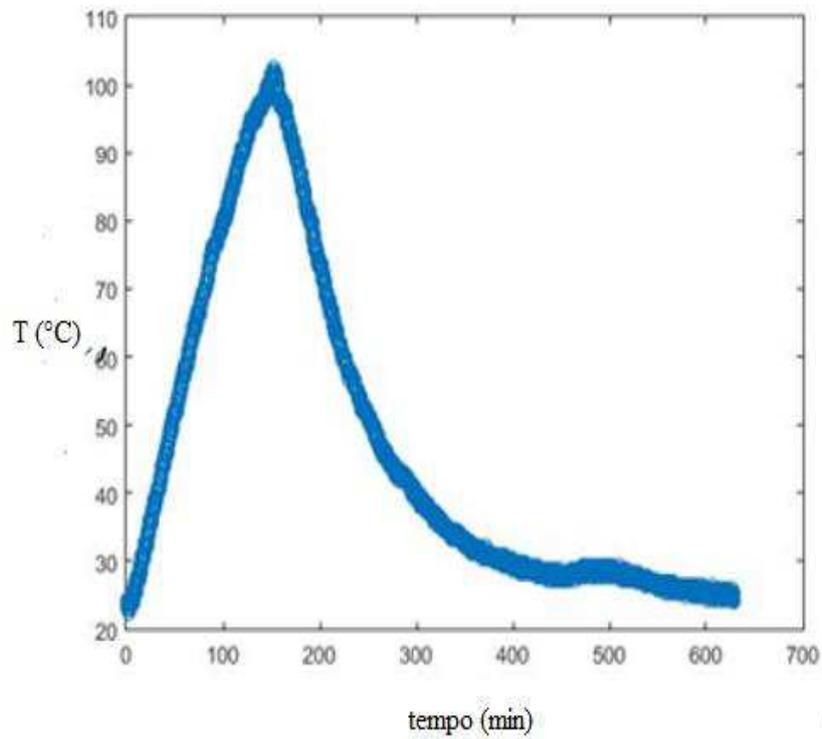


Figura 4.47 – sistema de resistências elétricas desenvolvido por Holanda (2007).



Somente um ponto de incandescência foi observado no interior do cone, porém facilmente corrigível com a mudança no sentido da resistência. Nesse último arranjo, tudo funcionou muito bem, devido a maior abrangência do fluxo de ar (Figura 4.50) sobre o conjunto de resistências.

Figura 4.48 - Sistema artesanal de resistência elétrica (700 W). Fonte: Autor (2017).



Figura 4.49 - Grupo de resistências montadas numa configuração tipo colmeia. Fonte: Autor (2017).



Figura 4.50 – Ventilador soprando o ar sobre o grupo de resistências, no módulo A. Fonte: Autor (2017).



4.3.3 Sistema de insuflamento e controle da velocidade do ar de secagem

Na medição da velocidade do ar, usou-se um anemômetro digital marca Wilh. Lambrecht GmbH, com precisão $\pm 3\%$ e resolução 0,1m/s. Para medição da velocidade, o aparelho foi colocado na parte traseira do ventilador, para que pudesse controlar a velocidade do ar, como mostra a Figura 4.51.

Figura 4.51 – Medição da velocidade do ar. Fonte: Autor (2017).



O controle da velocidade do ar foi outro requisito solucionado. Isto ocorreu devido ao adição de um dimmer interligado a cada ventilador, o que tornou possível ter um controle bem aproximado das velocidades dos ventiladores em cada câmara de secagem. Os testes de velocidade do ar foram realizados em três etapas, para cada módulo. As Tabelas 4.6 e 4.7 ilustram os resultados obtidos e medidos através de um Tacômetro digital ótico. Os testes foram realizados na parte traseira dos ventiladores, sendo medido o valor da velocidade do ar para cada janela (Figura 4.52). O tempo de aquecimento do secador de fluxo contínuo tipo esteira pode ser alterado, através da velocidade dos ventiladores.

Figura 4.52 – Medição da velocidade do ar quente na saída. Fonte: Autor (2017).



Tabela 4.6 - Valores de velocidade e vazão volumétrica obtidos para os módulos A, B e C, dados obtido na entrada e saída do fluxo.

Módulo	Rv (rpm)	V (m/s)	Vve (m ³ /s)
		Entrada	
A	1700	5,5	0,69
B	1700	5,6	0,70
C	1750	5,7	0,10
A	1275	4,4	0,55
B	1275	5,1	0,64
C	1275	4,9	0,61
A	750	3,3	0,41
B	750	3,5	0,44
C	750	3,7	0,46

Procedendo-se de maneira similar para os outros módulos e rotação do ventilador, obtém-se os resultados contido na tabela abaixo.

Tabela 4.7 - Valores da vazão volumétrica na saída do módulo A, obtidos num segundo teste.

Módulo	Rotação do ventilador (rpm)	Janela A (m/s)	Janela B (m/s)	Janela C (m/s)	Cálculo da vazão volumétrica (m ³ /s)	
					Vve (m ³ /s)	Vvs (m ³ /s)
A	1700	2,7	3,0	3,2	0,691	0,077
A	1270	2,6	2,7	2,8	0,553	0,074
A	850	1,9	1,9	1,9	0,414	0,054

4.3.4 Espaço Físico do secador de fluxo cruzado

As dimensões do secador proposto são de 1,20 × 2,10 × 2,50 m. Levando-se em conta a sobreposição das câmaras e a base, faz com que toda altura do equipamento tenha uma altura de 2,26 m. Toda Área ocupada pelo secador é de 3,0 m². Se esse protótipo fosse linear ou seja, no sentido longitudinal, ocuparia uma área superior a 9,0 m². Este protótipo em estudo ocupa 1/3 da área, quando desenvolvido horizontalmente. Em termos longitudinal, o secador teria um comprimento de 7,5 m ao invés dos 2,5 m desse projeto.

4.3.5 Manutenção, operação e transporte do secador de fluxo cruzado

O secador de grãos de fluxo contínuo tipo esteira foi projetado com base na facilidade para manutenção e traslado, sendo todos os componentes de pequenas dimensões, tanto que seu maior componente construído de perfis treilados possuem 1,2 m, sendo todos estes componentes aparafusados ou seja, bastante fácil para montagem, desmontagem e transporte. O sistema de transmissão é bastante simples com componentes pertencentes a uma bicicleta comum com, coroa, corrente e pinhão e, basicamente, por ser barato, torna-se bastante acessível quanto a manutenção. O sistema de aquecimento foi montado bastante semelhante a um sistema de prateleira, o que torna o secador bastante acessível para manutenção para o caso de pane em uma resistência, sendo estas resistências artesanais, de fácil aquisição e custo bastante reduzido. O sistema de insuflamento é composto de exaustores simples que foram aparafusados e, por essa razão, de fácil desmontagem, tendo um custo bastante reduzido e de fácil manutenção.

4.3.6 Aspectos financeiros do secador em estudo

4.3.6.1 Custo inicial de investimento e de manutenção do secador

Os investimentos iniciais para os secadores de fluxo contínuo no mercado internacional dependem do tamanho e grau de sofisticação do mesmo podendo variar entre US\$ 25.000,00 e US\$ 30.000,00. O investimento gasto para otimização do secador proposto está em torno de US\$ 3.500,00 que, quando comparado com os secadores industriais, pode ser considerado com baixo custo. Quanto a capacidade produtiva, o secador em estudo tem possibilidade de

processamento, segundo Holanda (2006), de 0,0046 kg/s contra 0,052 kg/s do secador comercial, ao estudar secagem de casulo do bicho-da-seda. O rendimento máximo de processamento do secador desenvolvido nessa pesquisa corresponde, segundo Holanda (2006), a 8,85% do secador comercial. O desempenho apresentado no secador em estudo foi bastante satisfatório em todos os detalhes de funcionamento.

O custo de manutenção deste equipamento é bastante reduzido, tendo em vista que: na parte mecânica, os rolamentos ficam protegidos de poeira, por estarem dentro dos rolos. Quanto a parte elétrica, esse custo torna-se ainda menor, pois as resistências, sendo energizadas com intermitência, a vida útil delas é bastante superior, podendo-se considerar vida infinita. Quanto ao sistema de controle, por serem bastantes simples, podem apresentar menor manutenção do que os secadores de grãos comerciais citados anteriormente, (HOLANDA, 2007).

CAPITULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

5.1 Conclusões

A partir dos dados obtidos com essa pesquisa, pode-se escrever:

5.1.1 Quanto a secagem da semente de mamona em estufa.

- a) A perda da umidade torna-se mais acentuada com o aumento da temperatura, tendendo de forma mais rápida ao equilíbrio higroscópico;
- b) A taxa de aquecimento é mais elevada quando a temperatura de secagem é mais alta, fazendo com que o produto entre em equilíbrio térmico em tempos curtos;
- c) A aparência externa do produto após todo processo de secagem se manteve inalterável.
- d) Não foi percebido rachaduras, fissuras e deformação do sólido, mesmo tendo sido este submetido a temperatura elevadas (90 °C);
- e) As dimensões características da semente de mamona (comprimento, largura e espessura) sofreram pequenas reduções, mesmo para secagens à altas temperaturas;

f) Houve um pequeno efeito do acréscimo da temperatura sobre os parâmetros geométricos (área, volume, diâmetro geométrico e esfericidade). Com o aumento da temperatura de secagem houve uma redução nesses parâmetros;

5.1.2 Quanto a secagem da semente de mamona no secador de fluxo cruzado.

- a) No secador com esteira estática, o comportamento da secagem e aquecimento da semente de mamona foi similar aquele obtido com a secagem em estufa;
- b) No secador com esteira em movimento, o tempo para a semente entrar em equilíbrio deferiu um pouco daquela obtida com a secagem em estufa, provavelmente devido a deficiência do sistema de ventilação durante o traslado na esteira e de medição;
- c) A medida que a semente vai aquecendo, sua umidade diminui alcançando no decorrer do tempo sua condição de equilíbrio. Quanto maior a temperatura mais rápido o processo;
- d) A aparência externa do produto após todo processo de secagem se manteve aparentemente inalterada;
- e) O grão atinge a temperatura máxima na primeira câmara de secagem, em aproximadamente 64 minutos. Todo processo, dependendo da temperatura, se completa até a segunda câmara, sendo que a terceira é usada somente para redução dos efeitos térmicos adquiridos nas câmaras anteriores.

5.1.3 Quanto ao secador desenvolvido

- a) No secador de fluxo contínuo torna-se possível obter o controle total (velocidade e temperatura do ar de secagem, e velocidades das esteiras), devido aos circuitos eletrônicos implantados;
- b) O sistema de transmissão único para todas as esteiras mostrou-se bastante eficiente devido a ação do inversor de frequência que, acoplado ao redutor de velocidade, permite especificar uma velocidade uniforme maior que zero;
- c) O sistema em operação é bastante silencioso;

- d) O sistema de insuflação do ar mostrou-se bastante eficiente, podendo assim alterar o gradiente de temperatura no interior de cada câmara, abreviando assim o tempo do processo de secagem;
- e) O controle eletrônico de temperatura através do arduíno atingiu seu objetivo devido a implantação de reles de estado sólido para cada módulo
- f) O conjunto de resistências elétricas desenvolvido atingiu o objetivo proposto, custo baixo e facilidade de manutenção, além de possuir um poder de aquecimento bastante rápido;
- g) A temperatura média no interior do secador, aumenta mais rápido quando o sistema usado for contínuo, podendo variar de 24 a 90°C dentro de minutos, devido ao controle de rotação dos ventiladores;
- h) O consumo de energia deu-se aproximadamente em torno de 17,5 kWh para os três módulos;
- i) Devido a facilidade operacional do conjunto de esteiras, a variação da velocidade e a variação da temperatura de aquecimento, o secador de esteira é bastante versátil, sendo capaz de secar vários tipos de produtos biológicos em diferentes condições do processo;
- j) A velocidade média do ar na entrada é de 6,0 m/s, obtendo assim uma vazão volumétrica distribuída no interior da câmara de secagem de 0,691 m³/s. A velocidade do ar sobre as esteiras com rotação do ventilador 1700 rpm, foi de 0,896 m/s;

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para futuras pesquisas pode-se citar:

- a) Desenvolver um sistema de controle eletrônico capaz de abranger a velocidade das esteira, tempo de ligar e desligar o conjunto de resistências e velocidade dos insufladores de ar;
- b) Testar o uso através de outras fontes de energia para o aquecimento do ar, no secador, no lugar da energia elétrica;
- c) Desenvolver estudos do reaproveitamento do ar oriundo de uma câmara para pré-aquecer o ar da própria câmara, ou até mesmo das outras câmaras de secagem;

- d) Fazer estudo experimental de secagem, de diversos produtos biológicos, usando o secador desenvolvido;
- e) Realizar um estudo energético e exerético no secador em estudo, visando sua otimização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M. F., “**Sistema automóveis “sistema de arranque”**”. 2009. 41 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto, Portugal.

ALVES, S. B., **Estudo teórico e experimental de secagem do abacate (Persea Americana Mill)**. 2014. 140 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Joao Pessoa, Brasil.

ANANDAN, S.; ANIL KUMAR, G. K.; GHOSH, J.; RAMACHANDRA, K. S. Effect of different physical and chemical treatments on detoxification of ricin in castor cake. **Animal Feed Science and Technology**, v. 120: p. 159–168, 2004.

ANDRADE, S. A. C. **Otimização da desidratação osmótica do jenipapo (Genipa americana L.)**. 2005. 111 p. Tese (Doutorado em nutrição), Ciência dos Alimentos, Centro de Ciência e Saúde, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.

ANDRADE, D. O. **Desenvolvimento de formulações adimensionais para simulação da transferência de calor e massa na secagem de grãos**. 2011. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, Brasil.

ARAÚJO, W. D.; GONELI, A. L. D.; MARTINS, E. A. S.; HARTMANN FILHO, C. P.; GOMES, L. D. C. **Efeito da Temperatura do Ar de Secagem Sobre a Contração Volumétrica dos Grãos de Amendoim**, In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola (CONBEA),43, 2013. **Anais**. Campo Grande: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, MS. Revista Caatinga, v. 28, n. 4, 170-180 p. out. – dez. 2014.

AZEVEDO, M. A. R. B. **Avaliação dos processos de secagem e da qualidade do sorgo granífero (*Sorghum bicolor* L. MOENCH)**. 1997. 71 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). UNICAMP. Campinas, Brasil.

AZEVEDO, D. M. P.; LIMA, E. F.; BATISTA, F. A. S.; BELTRÃO, N. E. M.; SOARES, J. J.; VIEIRA, R. M.; MOREIRA, J. A. M. **Recomendações técnicas para o cultivo de mamoneira *Ricinus communis* L. no nordeste do Brasil**. Embrapa – CNPA, **Circular Técnica**, 25. Campina Grande. 39 p. 1997.

AZEVEDO, D. M. P.; BELTRÃO, N. E. M. **O agronegócio da mamona no Brasil**. 2ª ed. Ver. Amp. Campina Grande: Embrapa Algodão: Brasília: Embrapa informação tecnológica. 350 p. 2007.

BARROS Jr, G., SILVA, J. E. B., GUERRA, H. O. C., LACERDA, R. D., FORMIGA, L. A. **Produção e qualidade do frutos da mamona em semeio e rebrote sob estresse hídrico fenológico**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.17, n.11, p.1167-1172, 2013.

BELTRÃO, N. E. M.; LIMA, R. L. S. **Aplicação do óleo de mamona como fonte de energia: biodiesel**. O agronegócio da mamona no Brasil. 2º ed.: EMBRAPA Informação Tecnológica, Brasília, DF. 504 p. 2007.

BELTRÃO, N. E. M. **Torta de mamona (*Ricinus communis* L. fertilizante e alimento: EMBRAPA Algodão. Comunicado Técnico**, Campina Grande 177 p. 2003.

BERGHEL, J.; RENSTROM, R.; NILSSON, L. **Particle mixing and residence time when drying sawdust in a continuous spouted**. v. 47, n.8, p. 1246-1251, 2007.

BIAGE, J. D., VALENTIN, S. R. T., QUEIROZ, D. M. **Secagem de produtos agrícolas.** Introdução à Engenharia Agrícola. Editora da Unicamp Campinas. UNICAMP. Cap. 3, p. 245-284. 1993.

BROOKER, D.B; BAKKER-ARKEMA, F.W. & HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds.** Westport, The Avi Publishing Company, Inc., 450 p. 1992.

BUZZETTI, A. R. **Falta estímulo à produção de mamona. Óleos & grãos,** São Caetano do Sul. **artigo,** v. 8, n. 47, p. 39-45, 1999.

CARNEIRO, J. F. **Caracterização morfoagronômica de sementes de mamoeira (*Ricinus communis* L).** 2013. 29 p. Monografia (Graduação em Ciências Biológicas) Universidade Federal da Paraíba. UFPB.

CONAB, Conjuntura mensal da Mamona. **Acompanhamento da safra brasileira.** v. 4 – Safra Período: Maio 2016/2017.

CONCEIÇÃO, M. M.; CANDEIA, R. A.; DANTAS, H. J.; SOLEDADE, L. E. B.; FERNANDES Jr., V. J.; SOUZA, A. G. **Rheological behavior of castor oil biodiesel.** Energy & Fuels, v. 19, n. 5, p. 2185-2188, 2005.

CORREA, P. C.; RESENDE, O.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M.; NOGUEIRA, B. L. **Determinação do coeficiente de difusão líquida dos grãos de feijão.** Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais. v.8, n.2, p.117-126, 2006.

COSTA, T. L.; MARTINS, M. E. D.; BELTRÃO, N. E. M.; MARQUES, L. F.; PAIXÃO, F. J. R. **Característica do Óleo de Mamona da Cultivar BRS-188 Paraguaçu.** Revista Pesquisa Aplicada e Agro tecnologia. v.1. n.1, p. 95-99, 2008.

COSTA, L. M. RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C., **Determinação das isotermas de equilíbrio higroscópico de frutos de chambre pelo método dinâmico.** Instituto Federal de Goiano, Rio Verde, GO. v. 31, n. 2, p. 382-391, 2015.

COSTA, F. X.; LIMA, V. L. A. de; BELTRÃO, N. E. M.; AZEVEDO, C. A. V.; THESENA, N. L. **Crescimento inicial da mamoeira, cultivar 188 BRS Paraguaçu, em solo compactado e com adubação orgânica.** Revista Engenharia Ambiental. v. 11, n.2, p.052-066, 2014.

DOPHEIDE, K. W. M. ; R. NEVES, L.; RAMANZINE, R. **Psicrômetro de bulbo úmido com aquisição de dados.** 2013, p. 27 Trabalho final da disciplina de medições térmicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil.

EMBRAPA, **Estatística agricultura.** Disponível em: <www.cpamn.embrapa.br/>. Acesso em agosto de 2018.

EMATERCE – **Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Ceará.** A Cultura da Mamona. 2006.

FIGUEIREDO, R. **Princípios de secagem de produtos biológicos.** Editora Universitária, João Pessoa –PB. 2003.

FOOD SAFETY BRASIL, **Conteúdo para segurança de alimentos.** Acesso em junho de 2016.

FREIRE, L. A. C. **Montagem e operação de um secador pneumático tipo flash.** 2011. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Programa de pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN, Brasil.

FORTES, M.; OKOS, M. R. **Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grains,** Advances in drying. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, chapter 5. p. 119-154. 1980.

GOMES, Í. A. **Desenvolvimento experimental de um secador solar de frutas com aproveitamento multi energético.** 2015. 102 p Dissertação (Mestrado em Engenharia

Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Brasil.

GONELI, A. L. D. **Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento.** 2008. 186 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Biosistemas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – Brasil.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BOTELHO, F. M. **Water desorption and thermodynamic properties of okra seeds.** Transaction of the ASAE, v. 53, n. 1, p. 191-197, 2010.

GUELFY, L. R.; SCHEER, A. P. **Estudo de adsorção para purificação e separação de misturas na indústria petrolífera.** Universidade Federal do Paraná, Engenharia Química, Curitiba - PR. 2007.

HOLANDA, P. R. H., **Secador para casulos do bicho – da – seda: desenvolvimento, simulação e experimentação.** 2007. 161 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola.** Janeiro de 2017.

KOOP, L. **Modelo de duas fases, transiente e bidimensional para simulação da secagem de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) em secador contínuo de camada espessa.** 2014. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Pós-Alimento). Departamento de Engenharia de Alimentos. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

KUDRA, T.; STRUMILLO, C., **Bio-materials as drying object. Thermal processing of bio-materials.** Amsterdam: Gordon and Breach Science. p. 295-320. 1998,

LACERDA, R. S. **Caracterização química, bioquímica e físico-química da torta de mamona para seu aproveitamento na produção de material biodegradável e na alimentação animal.** 2013. 209 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Zootecnia e engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, Brasil.

LIMA, A. G. B. **Estudo da secagem e dimensionamento de secador de casulos do bicho-da-seda.** 1995. 290 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Brasil.

LIMA, W. S. **Análises de sistemas de secagem: Solar, Elétrico e Misto na Produção de Banana passa.** 2017. 259 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Programa de pós-Graduação em Engenharia de Processos. Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande, Brasil.

LOBÃO, E. **O Brasil e as fontes renováveis de energia.** Jornal Opinião, Folha de São Paulo 2010.

LUZ, R. P. **Caracterização morfofisiológica, molecular e agrônômica de cultivares de mamona.** 2012. 94 p. Dissertação (Tese de Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil.

LUIKOV, A. V.; MIKHAILOV, Y. A. **Theory of energy and mass transfer.** Oxford:Pergamon Press Ltd. 392 p. 1964.

LUIKOV, A. V. **Analytical heat diffusion theory.** Academic Press, New York and London, 684 p. 1968.

MACIEL, C. D. G., **Manejo na cultura da mamona em de semeadura direta.** Escola Superior de Agronomia de Paraguaçu Paulista-SP. v. 96. p. 1-4, set-out 2006.

MACEDO, L. R.; WAGNER, W. J. **Revisão bibliográfica sobre a cultura da mamona.** Belém: Sudam/DSP. 35 p. 1984.

MAYOR, L., SERENO, A. M. **Modeling shrinkage during convective drying of food materials: a review.** Journal of Food Engineering. v. 61, n.3, p. 373-386, 2004.

MARTINS, E. A. S. **Dimensionamento e experimentação de um secador de leito fixo para secagem de produtos agrícolas.** 2015. 133 p. (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Dourados, Dourados, Brasil.

MASSAMBONI, O., **Crescimento de gotículas por difusão de vapor.** Departamento de ciências atmosféricas, AGI-USP. 2006.

MAZETO, N. M. S.; MANEIRA, A. A. M. **Tempo de armazenamento de alimentos prontos para consumo segundo RDC 216:** Revisão de literatura, c.4 p. 4-5. 2010.

MELO, F. A. O.; SILVA, J. S.; LOPES, R. P.; **Análise de um secador pneumático de fluxo concorrente com carga, revolvimento e descarga pneumáticos.** ISSN 1809-9475. p. 8 2013.

MENDONÇA, A. P.; SAMPAIO, P. T. B.; ALMEIDA, F. A. C.; FERREIRA, R. F.; NOVAIS, J. M. **Determinação das curvas de secagem das sementes de andiroba em secador solar.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.19, n.4 p.382-387, março de 2015.

MOREIRA, J. A. N.; LIMA, E. F.; FARIAS, F. J. C.; AZEVEDO, D. M. P. **Melhoramento de mamoneira (*Ricinus communis* L.).** Campina Grande - PB. Embrapa - CNPA. Documentos. V. 44, 29 p. 1996.

MOSHKIN, V. A. **Cytology and genetics of qualitative characteristics.** In: V. A. MOSHKIM. (Ed.) Castor. Amerind Publi. New Delhi, India. 125-132 p. 1986.

MOHSENIN, N. N. **Thermal properties of foods and agricultural materials.** New York: Gordon and Breach Science. 407 p. 1986.

MUJUMDAR, A. S. Principles, classification, and selection of dryers, In: **Handbook of Industrial Drying**. Ed. A. S. Mujumdar, CRC Press, Boca Raton, p. 4-31. 2006.

OLIVEIRA, G. H. H.; CORRÊA, P. C.; BOTELHO, F. M.; CAMPUS, S. C.; PAIXÃO, A. A. **Dimension Characteristics evaluation of Coffee Berries During Drying**. In: XVIIth World Congress of the International Commission. Anais. Universidade Federal de Viçosa-MG. p 13-17, junho de 2010.

OLIVEIRA, M. T. R. **Secagem e qualidade do óleo essencial da *pactis brevipedunculata* (Gardner)**. Seh. Bip. 2011. 170 p.. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Programa de Pós Graduação em Ciências e Tecnologia de Alimentos. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, Brasil.

OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; SMANIOTTO, T. A. S.; SOUSA, K. A. CAMPOS, R. C. **Propriedades termodinâmicas de grãos de milho para diferentes teores de água de equilíbrio**. Pesquisa. Agropecuária. Goiana, v.43, n.1, p. 50-56, mês, 2013.

OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O., CHAVES, T. H.; SOUZA, K. A.; SMANIOTTO, T. A. S.. **Propriedades termodinâmicas das sementes de pinhão-manso**. Biosci. J., Uberlandia, v.30, p. 147-157. Maio de 2014.

OLSNES, S. **The history of ricin, abrin and related toxins**. Toxicon, v. 44, , p. 361-370, 2004.

PARK, K. J. B.; ALONSO, L. F. T. ; CORNEJO, F. E. P.; FABBRO, I. M. D.; PARK, K. J.. **Seleção de secadores: fluxograma**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais. v.9, n.2, p.179-202, 2007.

PARK, K. J. ; VOHNIKOVA, Z.; BROD, F. P. R.. **Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of Garden mint leaves (*mentha crispa* L.)**. Jornal of Food Engineering, v.5, p 192-199, fevereiro de 2002.

PARK, K. J.; A. NTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B.. **Conceitos e processo e equipamentos de secagem**. Campinas - SP. UNICAMP. 121 p. 2007.

PARK, K. J. B., PARK, K. J., ALONSO, L. F. T., CORNEJO, F. E. P., FABBRO, I. M. D. **Secagem: Fundamentos e equações**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande. v.16, n.1, p. 93-127. 2014.

PASCOAL, T. S. **Genótipos de Cártamo: Produtividade de grãos, teor de óleo e acúmulo de nutrientes no oeste do paraná**. 2016. 34 p. Dissertação (Mestrado apresentado à Universidade do Oeste do Paraná) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura.

PASSINI, A. F. C. ; BENSO, M.; ZENI, C.; MANFIO, J.; CHINAZZO, I. B.; NECKEL, A. **Proposta de uso de alternativas energéticas em cooperativa de beneficiamento de grãos**. In: IX simpósio Internacional de Qualidade Ambiental. **Anais**. Porto Alegre – RS. 2014.

PELEGRINE, D. H. G.; CARROCCI, L. R. **Equilíbrio hidrofílico-lipofílico (ELH) do biodiesel proveniente do óleo de mamona**. Biodiesel. Outubro de 2018.

PEREIRA, E. M. A., **Secagem da mamona da variedade BRS Energia: experimentação e simulação**. 2015. 174 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil.

PORTER, P. M.; LAUER, J. G.; LUESCHEN, W. E.; FORD, H.G.; HOVERSTAD, T. R.; PLINGER, E. J.; CROOKSTON, R. K.. **Environment affects the corn and soy bean totation effect**, 1997.

QUEIROGA, V. P.; SANTOS, R. F.; QUEIROGA, D. A. N., **Levantamento da produção de mamona (*Ricinus communis* L.) em uma amostra de produtores em cinco municípios do Estado da Bahia**. Revista Agro@ambiente. v.5, n. 2, p.10, 2011.

RAGHAVAN, G.S.V.; RENNIE, T.J.; SUNJKA, P.S.; ORSAT, P.; PHAPHUNANGWITTAYAKUL, W; TERDTON, P., **Overview of new techniques for**

drying biological materials with emphasis on energy aspects. Vol. 22, No. 02, pp. 195 – 201, April - June, 2005.

RAMOS, I. N.; BRANDÃO, T. R. S.; SILVA, C. L. M. **Structural changes during air drying of fruits and vegetables.** Food Science and Technology International, v. 9, n. 3, p. 201-206, 2003.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M.; RODRIGUES, S. **Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (phaseolus vulgaris l.).** Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v.10, n.1 p.17-28, 2008.

RESENDE, O.; ULLMANN, R.; Siqueira, V. C.; CHAVES, T. H.; FERREIRA, L. U.; **Modelagem matemática e difusividade efetiva das sementes de pinhão-manso (Jatropha curcas L.) durante a secagem.** Departamento de Engenharia. Agrícola. Jaboticabal, v.31, n.6, p.1123-1135. 2011.

RIBEIRO, M.C.F.; ROCHA, F. A.; SANTOS, A. C.; SILVA, J. O.; PEIXOTO, M. F. S. P.; PAZ, V. P. S. **Crescimento e produtividade da mamoeira irrigada com diferentes diluições de esgoto doméstico tratado.** Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental, v.16, p.639-646, 2012.

RIBEIRO FILHO, J. **Cultura de mamoneira.** Viçosa: UFV. 75p. 1966.

RIOS, G. F. A. **Balanço de energia solar na cultura da mamoeira irrigada.** 2009. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil.

SANTOS, J. C.; SANTOS, R. S.; BARROS, G. D. T.; SANTOS, J. C.; GURGEL, J. M.; MARCORDES, F. **Estudo numérico da cinética de secagem em bananas.** In: IV congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Anais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil. 2010.

SANTOS, K. S. **Avaliação do crescimento de cultivares de Mamoeira (*Ricinus communis* L.) Submetidos a Diferentes Concentrações de Alumínio**. 2012. 64 p. (Monografia em Ciências Biológicas). Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Cruz das Almas, Brasil.

SAVY FILHO, A. **Mamona tecnologia agrícola**. Campinas: EMOPI. Revista (Pesquisa. Agropecuária). Bras. Brasília, v. 42, n.3. 105 p. 449 - 452, Março de 2005.

SEVERINO, L. S.; MORAES, C. R. A.; FERREIRA, G. B.; CARDOSO, G. D.; GONDIM, T. M. S.; BELTRÃO, N. E. M.; VIRIATO, J. R. Campina Grande: Embrapa Algodão. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**. 62 p. 2008.

SIMMONDS, N.W. **Evolution of crop plants**. Longman Inc. New York, USA. 339 p. 1976.

SILVA, M. S. **Desintoxicação do farelo de mamona em secador solar**. 2010. 73 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química. São Cristóvão, RJ. Brasil.

SILVA, J. A. C., **Obtenção de um lubrificante biodegradável a partir de ésteres do biodiesel da mamona via catalise enzimática e estudos de estabilidades oxidativa e térmica**, 2012. 188 p. Tese (doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

SIMIONI, D.; OLIVEIRA, M.; PAGNUSSATT, F. A.; DEUNER, C. C.; ELIAS, M. C.; GUTKOSKY, L. C.. **Parâmetros operacionais na secagem intermitente de grãos de aveia branca cultivar UFPA 20 Teixeira**. Revista Ciência Agrotécnica. v. 32 n. 2, 8 p. Lavras 2008.

SOUZA, M. B. **Processo de desintoxicação e aproveitamento da torta de mamona como ração animal**. 2013. p.178. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil.

STRUMILLO, C.; JONES, P. L.; ZYLLA, R. Energy aspects in drying. In: **Handbook of Industrial London** – UK. 1075-1099 p. 2006.

TERRA DA GENTE. **Mamoneira (Ricinus communis)**. Disponível em <http://g1.globo.com/sp/campinas-regiao/terra-da-gente/flora/noticia/2016/7/mamoneira.html>> Acesso em: 30 Julho de 2016.

VAN, W. G. J.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C., **Fundamentos da termodinâmica**, São Paulo, Editora Edgard Buchen. 584 p. 1998

ZUCHI, J. **Curva de secagem de frutos de mamona**. Journal of Seed Science, v. 22, n.1, p. 17-21, 2009.

APÊNDICE A

Dados da secagem de semente de mamona em estufa

Tabela A1 – Experimentos de secagem em estufa a 40 °C.

t	tc	tc+am	am	ma	ms	M(b.s.)	θ	URamb	Tamb.	Testufa.
(min)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(kg/kg)	(°C)	(%)	(°C)	(°C)
0	21,87	52,24	30,37	3,99	26,38	0,151	26,70	66	25,00	40,00
5	21,87	52,18	30,31	3,93	26,38	0,150	31,30	66	25,70	40,00
10	21,87	52,14	30,27	3,89	26,38	0,147	32,20	67	26,00	40,00
15	21,87	52,1	30,23	3,85	26,38	0,146	34,50	67	26,20	40,00
20	21,87	52,05	30,18	3,8	26,38	0,144	35,00	67	26,40	40,00
25	21,87	52,00	30,13	3,75	26,38	0,142	35,40	67	27,00	40,00
30	21,87	51,80	29,93	3,55	26,38	0,134	35,80	67	27,10	40,00
35	21,87	51,50	29,63	3,25	26,38	0,123	36,10	67	27,10	40,00
40	21,87	51,20	29,33	2,95	26,38	0,111	36,70	67	27,10	40,00
45	21,87	51,00	29,13	2,75	26,38	0,104	36,80	67	27,10	40,00
50	21,87	50,80	28,93	2,55	26,38	0,098	37,00	67	27,10	40,00
60	21,87	50,50	28,63	2,25	26,38	0,086	37,40	67	27,20	40,00
70	21,87	50,10	28,23	1,85	26,38	0,070	37,60	67	27,10	40,00
85	21,87	50,00	28,13	1,75	26,38	0,066	37,60	67	27,30	40,00
100	21,87	49,70	27,83	1,45	26,38	0,055	38,00	67	27,30	40,00
130	21,87	49,50	27,63	1,25	26,38	0,047	38,60	68	27,30	40,00
160	21,87	49,30	27,59	1,21	26,38	0,046	39,20	68	27,30	40,00
190	21,87	49,20	27,58	1,2	26,38	0,045	39,80	69	27,20	40,00
220	21,87	49,00	27,57	1,19	26,38	0,045	39,90	70	27,30	40,00
280	21,87	48,70	27,56	1,18	26,38	0,045	39,90	70	27,20	40,00
340	21,87	48,70	27,56	1,18	26,38	0,045	40,00	69	27,30	40,00
400	21,87	48,70	27,56	1,18	26,38	0,045	39,90	70	27,00	40,00
1840	21,87	49,07	27,2	1,18	26,38	0,040	40,00	73	27,20	40,00
3280	21,87	48,25	26,38	0	26,38	0,000	104,50	67	27,00	40,00

onde: tc: tara da cesta, am: amostra, ma: massa da água, ms: massa seca, M(b.s.): umidade em base seca, θ: temperatura do grão, U.R.amb, Tamb: temperatura ambiente, Testufa: temperatura da estufa .

Tabela A2 - Experimentos de secagem em estufa a 50 °C.

t (min)	tc (g)	tc+am (g)	am (g)	ma (g)	ms (g)	M(b.s.) (Kg/kg)	θ (°C)	URamb (%)	Tamb (°C)	Testufa (°C)
0	21,88	55,31	33,43	3,41	30,02	0,113	27,30	71	25,90	50
5	21,88	55,17	33,29	3,27	30,02	0,110	41,80	71	25,90	50
10	21,88	55,08	33,20	3,18	30,02	0,106	45,70	71	25,90	50
15	21,88	54,98	33,10	3,08	30,02	0,103	47,00	71	25,90	50
20	21,88	54,84	32,96	2,94	30,02	0,098	47,50	71	25,90	50
25	21,88	54,68	32,80	2,78	30,02	0,093	47,20	70	25,90	50
30	21,88	54,55	32,67	2,65	30,02	0,088	47,60	70	25,90	50
35	21,88	54,43	32,55	2,53	30,02	0,084	47,50	70	25,90	50
40	21,88	54,30	32,42	2,40	30,02	0,080	47,80	70	25,90	50
45	21,88	54,22	32,34	2,32	30,02	0,080	47,00	70	26,00	50
50	21,88	54,11	32,23	2,21	30,02	0,074	47,60	69	25,90	50
60	21,88	53,93	32,05	2,03	30,02	0,068	46,00	70	25,90	50
70	21,88	53,81	31,93	1,91	30,02	0,064	49,00	69	26,10	50
85	21,88	53,71	31,83	1,81	30,02	0,060	51,20	69	25,90	50
100	21,88	53,60	31,72	1,70	30,02	0,057	49,50	68	26,10	50
130	21,88	53,43	31,56	1,54	30,02	0,051	50,10	68	26,30	50
160	21,88	53,21	31,33	1,31	30,02	0,044	49,20	67	26,00	50
190	21,88	53,08	31,20	1,18	30,02	0,040	50,00	68	26,10	50
220	21,88	52,96	31,08	1,06	30,02	0,035	50,40	67	26,30	50
280	21,88	52,90	31,02	1,00	30,02	0,033	49,60	71	26,10	50
340	21,88	52,90	31,02	1,00	30,02	0,033	49,60	70	26,40	50
400	21,88	52,90	31,02	1,00	30,02	0,033	50,10	69	26,30	50
1840	21,88	52,89	31,01	0,99	30,02	0,033	50,10	71	25,90	50
3280	21,88	51,90	30,02	0,00	30,02	0,000	104,50	68	26,00	105

onde: tc: tara da cesta, am: amostra, ma: massa da água, ms: massa seca, M(b.s.): umidade em base seca, θ: temperatura do grão, U.R.amb, Tamb: temperatura ambiente, Testufa: temperatura da estufa

Tabela A3 - Experimentos de secagem em estufa a 60 °C.

t (min)	tc (g)	tc+am (g)	am (g)	ma (g)	ms (g)	M(b.s.) (kg/kg)	θ (°C)	URamb (%)	Tamb (°C)	Testufa (°C)
0	21,87	54,17	32,3	2,85	29,45	0,097	26,5	66	25,8	60
5	21,87	54,02	32,15	2,70	29,45	0,091	45,7	66	25,6	60
10	21,87	53,88	32,01	2,56	29,45	0,086	45,8	67	25,6	60
15	21,87	53,73	31,86	2,41	29,45	0,082	54,4	66	25,6	60
20	21,87	53,48	31,61	2,16	29,45	0,073	55,4	67	25,6	60
25	21,87	53,34	31,47	2,02	29,45	0,068	56,3	67	25,6	60
30	21,87	53,2	31,33	1,88	29,45	0,064	56,2	67	25,4	60
35	21,87	53,01	31,14	1,69	29,45	0,057	57,6	67	25,4	60
40	21,87	52,85	30,98	1,53	29,45	0,052	58,8	67	25,5	60
45	21,87	52,72	30,85	1,40	29,45	0,047	59,2	67	25,5	60
50	21,87	52,59	30,72	1,27	29,45	0,043	59,3	68	25,6	60
60	21,87	52,4	30,53	1,08	29,45	0,037	61,6	68	25,6	60
70	21,87	52,27	30,4	0,95	29,45	0,032	60,2	68	25,9	60
85	21,87	52,15	30,38	0,93	29,45	0,031	60,2	67	25,9	60
100	21,87	52,01	30,37	0,92	29,45	0,031	61,3	65	25,8	60
130	21,87	51,87	30,36	0,91	29,45	0,031	61,4	65	25,8	60
160	21,87	51,77	30,35	0,90	29,45	0,030	61,6	66	25,6	60
190	21,87	51,71	30,34	0,89	29,45	0,030	61,7	64	25,9	60
220	21,87	51,65	30,33	0,88	29,45	0,030	61,5	64	25,9	60
280	21,87	51,64	30,32	0,87	29,45	0,030	61,8	65	25,9	60
340	21,87	51,64	30,32	0,87	29,45	0,029	61	67	25,9	60
400	21,87	51,64	30,32	0,87	29,45	0,029	60	66	25,8	60
1840	21,87	51,62	30,31	0,86	29,45	0,030	61,8	69	25,8	60
3280	21,87	51,62	29,45	0,00	29,45	0	103,9	72	25,9	105

onde: t: tempo, tc: tara da cesta, am: amostra, ma: massa da água, ms: massa seca, M(b.s.): unidade em base seca, θ : temperatura do grão, U.R.amb, Tamb: temperatura ambiente, Testufa temperatura da estufa.

Tabela A4 - Experimentos de secagem em estufa a 70 °C.

t	tc	tc+am	am	ma	ms	M(b.s.)	θ	URamb	Tamb	Testufa
(min)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(kg/kg)	(°C)	(%)	(°C)	(°C)
0	21,87	53,42	31,55	3,33	28,22	0,118	27,10	68	26,4	70
5	21,87	53,22	31,35	3,13	28,22	0,111	62,00	67	26,5	70
10	21,87	53,02	31,15	2,93	28,22	0,104	64,44	66	26,5	70
15	21,87	52,81	30,98	2,76	28,22	0,970	65,90	66	26,5	70
20	21,87	52,67	30,83	2,61	28,22	0,092	66,00	65	26,5	70
25	21,87	52,51	30,71	2,49	28,22	0,088	66,05	65	26,5	70
30	21,87	52,38	30,56	2,34	28,22	0,084	67,40	65	26,6	70
35	21,87	52,19	30,42	2,20	28,22	0,078	67,00	64	26,6	70
40	21,87	52,03	30,3	2,08	28,22	0,074	67,70	64	26,6	70
45	21,87	51,85	30,17	1,95	28,22	0,070	67,40	64	26,5	70
50	21,87	51,62	30,11	1,89	28,22	0,064	65,40	63	26,5	70
60	21,87	51,41	30,02	1,80	28,22	0,059	69,10	63	26,6	70
70	21,87	51,25	29,88	1,66	28,22	0,056	69,20	63	26,6	70
85	21,87	51,17	29,8	1,58	28,22	0,053	71,40	62	26,8	70
100	21,87	51,12	29,73	1,51	28,22	0,050	68,00	62	26,8	70
130	21,87	51,05	29,65	1,43	28,22	0,047	71,30	62	26,9	70
160	21,87	51,02	29,56	1,34	28,22	0,045	70,70	61	27	70
190	21,87	51,01	29,5	1,28	28,22	0,044	69,50	62	26,9	70
220	21,87	50,98	29,46	1,24	28,22	0,044	68,00	61	26,9	70
280	21,87	50,96	29,44	1,22	28,22	0,044	70,10	59	26,8	70
1840	21,87	50,93	29,43	1,21	28,22	0,043	70,00	73	26,9	70
3280	21,87	50,92	28,22	0,00	28,22	0,000	105,10	67	27,3	105

onde: t: tempo, tc: tara da cesta, am: amostra, ma: massa da água, ms: massa seca, M(b.s.): umidade em base seca, θ : temperatura do grão, U.R: umidade relativa do ar, Tamb: temperatura ambiente, Testufa: temperatura da estufa.

Tabela A5 - Experimentos de secagem em estufa a 80 °C.

t (min)	tc (g)	tc+am (g)	am (g)	ma (g)	ms (g)	M(b.s.) (kg/kg)	θ (°C)	URamb (%)	tamb (°C)	Testufa (°C)
0	21,89	55,23	33,34	3,13	30,21	0,104	26,90	62	26	80
5	21,89	54,94	33,24	3,03	30,21	0,100	64,30	63	26,6	80
10	21,89	54,68	33,12	2,91	30,21	0,096	70,20	62	26,6	80
15	21,89	54,42	32,96	2,75	30,21	0,091	71,60	62	26,8	80
20	21,89	54,25	32,88	2,67	30,21	0,088	71,90	62	26,9	80
25	21,89	54,11	32,78	2,57	30,21	0,085	74,80	61	26,6	80
30	21,89	53,91	32,66	2,45	30,21	0,081	74,80	61	26,6	80
35	21,89	53,76	32,54	2,33	30,21	0,077	75,10	61	26,8	80
40	21,89	53,61	32,41	2,20	30,21	0,073	76,30	60	26,6	80
45	21,89	53,43	32,34	2,13	30,21	0,071	75,00	59	26,6	80
50	21,89	53,24	32,22	2,01	30,21	0,067	76,30	59	26,8	80
60	21,89	53,12	32,12	1,91	30,21	0,063	78,20	59	26,6	80
70	21,89	52,85	32,02	1,81	30,21	0,060	78,40	58	26,6	80
85	21,89	52,65	31,91	1,70	30,21	0,056	77,30	57	26,8	80
100	21,89	52,48	31,83	1,62	30,21	0,054	80,20	58	26,8	80
130	21,89	52,29	31,74	1,53	30,21	0,048	78,10	56	26,6	80
160	21,89	52,12	31,67	1,46	30,21	0,044	77,40	59	26,8	80
190	21,89	52,02	31,54	1,33	30,21	0,042	80,50	62	26,9	80
220	21,89	51,85	31,48	1,27	30,21	0,041	80,50	62	26,9	80
280	21,89	51,71	31,47	1,26	30,21	0,041	80,50	62	26,8	80
340	21,89	51,7	31,46	1,25	30,21	0,041	80,05	62	26,9	80
400	21,89	51,7	31,46	1,25	30,21	0,041	80,00	62	26,9	80
1840	21,89	51,69	31,45	1,24	30,21	0,040	81,40	73	26,4	80
3280	21,89	51,68	30,21	0,00	30,21	0,000	106,70	67	26,5	105

onde: t: tempo, tc: tara da cesta, am: amostra, ma: massa da água, ms: massa seca, M(b.s.): umidade em base seca, θ : temperatura do grão, U.R: Umidade relativa do ar.
Tamb: temperatura ambiente, Testufa: temperatura da estufa.

Tabela A6 - Experimentos de secagem em estufa a 90 °C.

t (min)	tc (g)	tc+am (g)	am (g)	ma (g)	ms (g)	M(b.s.) (kg/kg)	θ (°C)	URamb (%)	Tamb (°C)	Testufa (°C)
0	21,87	58,50	36,63	3,80	33,83	0,116	26,80	56	26,30	90
5	21,87	58,30	36,49	3,66	33,83	0,106	74,90	56	26,40	90
10	21,87	58,11	36,32	3,49	33,83	0,103	79,70	56	26,40	90
15	21,87	57,92	36,21	3,38	33,83	0,100	80,90	56	26,40	90
20	21,87	57,71	36,12	3,29	33,83	0,089	82,50	56	26,50	90
25	21,87	57,61	35,74	2,91	33,83	0,086	83,90	57	26,40	90
30	21,87	57,52	35,65	2,82	33,83	0,082	85,00	56	26,50	90
35	21,87	57,40	35,53	2,70	33,83	0,078	85,50	57	26,40	90
40	21,87	57,26	35,39	2,56	33,83	0,073	85,60	57	26,40	90
45	21,87	57,11	35,24	2,41	33,83	0,066	86,00	57	26,50	90
50	21,87	56,86	34,99	2,16	33,83	0,061	86,50	59	26,50	90
60	21,87	56,71	34,84	2,01	33,83	0,056	86,60	59	26,60	90
70	21,87	56,53	34,66	1,83	33,83	0,051	90,70	59	26,60	90
85	21,87	56,38	34,51	1,68	33,83	0,046	91,10	59	26,60	90
100	21,87	56,22	34,35	1,52	33,83	0,040	91,30	58	26,80	90
130	21,87	56,02	34,15	1,32	33,83	0,037	91,30	57	26,80	90
160	21,87	55,91	34,04	1,21	33,83	0,034	91,10	56	26,80	90
190	21,87	55,84	33,97	1,14	33,83	0,030	90,28	55	27,00	90
220	21,87	55,82	33,95	1,12	33,83	0,030	87,00	56	26,90	90
280	21,87	55,81	33,94	1,11	33,83	0,030	90,30	56	26,30	90
340	21,87	55,81	33,94	1,11	33,83	0,030	90,2	56	26,30	90
400	21,87	55,81	33,94	1,11	33,83	0,030	90,3	56	26,30	90
1840	21,87	55,80	33,93	1,10	33,83	0,029	90,90	64	26,40	90
3280	21,87	54,70	32,83	0,00	33,83	0,000	106,70	67	26,30	105

onde: t: tempo, tc: tara da cesta, am: amostra, ma: massa da água, ms: massa seca, M(b.s.): umidade em base seca, θ: temperatura do grão, URamb: umidade relativa do ambiente Tamb: temperatura ambiente, Testufa: temperatura da estufa.

APÊNDICE B

Dados de secagem de semente de mamona em secador com esteira estática

Tabela B1 – Experimento de secagem em secador (esteira estática) a 40 °C.

t	tc	tc+am	am	ma	ms	M(b.s.)	θ	URar	Tamb.	Tsec.
(min)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(kg/kg)	(°C)	(%)	(°C)	(°C)
0	21,87	56,24	34,37	3,52	30,85	0,114	26,70	67	25,90	40
5	21,87	56,13	34,26	3,41	30,85	0,111	31,30	67	25,90	40
10	21,87	56,02	34,15	3,3	30,85	0,107	32,20	68	26,10	40
15	21,87	55,89	34,02	3,17	30,85	0,103	34,50	68	26,00	40
20	21,87	55,72	33,85	3	30,85	0,097	35,00	66	26,10	40
25	21,87	55,53	33,66	2,81	30,85	0,091	35,40	67	26,00	40
30	21,87	55,37	33,5	2,65	30,85	0,086	35,80	67	26,00	40
35	21,87	55,21	33,34	2,49	30,85	0,081	36,10	67	26,10	40
40	21,87	55,04	33,17	2,32	30,85	0,075	36,70	67	26,10	40
45	21,87	54,87	33	2,15	30,85	0,070	36,80	67	26,10	40
50	21,87	54,66	32,79	1,94	30,85	0,063	37,00	67	26,10	40
60	21,87	54,51	32,64	1,79	30,85	0,058	37,40	67	26,10	40
70	21,87	54,34	32,47	1,62	30,85	0,053	37,60	67	26,30	40
85	21,87	54,23	32,36	1,51	30,85	0,049	37,60	67	26,30	40
100	21,87	54,12	32,25	1,4	30,85	0,045	38,00	67	26,10	40
130	21,87	54,01	32,14	1,29	30,85	0,042	38,60	67	26,30	40
160	21,87	53,9	32,03	1,18	30,85	0,038	39,20	66	26,30	40
190	21,87	53,86	31,99	1,14	30,85	0,037	39,80	68	26,40	40
220	21,87	53,83	31,96	1,11	30,85	0,036	39,90	68	26,40	40
280	21,87	53,79	31,92	1,07	30,85	0,035	40,10	70	26,30	40
340	21,87	53,78	31,91	1,06	30,85	0,034	40,00	70	26,30	40
400	21,87	53,78	31,91	1,06	30,85	0,033	39,90	70	26,30	40
1840	21,87	53,78	31,91	1,06	30,85	0,034	40,20	73	26,00	40
3280	21,87	52,72	30,85	0	30,85	0,00	104,70	67	26,5	

onde: t: tempo, tc: tara da cesta, am: amostra, ma: massa da água, ms: massa seca, M(b.s.): umidade em base seca, θ : temperatura do grão, URar: Umidade relativa do ar, Tamb: temperatura ambiente, Tsec: temperatura do secador.

Tabela B2 – Experimento de secagem em secador (esteira estática) a 50 °C.

t (min)	tc. (g)	tc+am (g)	am. (g)	ma (g)	ms (g)	M(b.s) (kg/kg)	θ (°C)	URamb. (%)	Tamb. (°C)	Tsecador (°C)
0	21,88	56,02	34,14	3,52	31,66	0,111	27,30	71	25,90	50
5	21,88	55,84	33,96	3,34	31,66	0,105	41,80	71	25,90	50
10	21,88	55,71	33,83	3,21	31,66	0,101	45,70	71	25,90	50
15	21,88	55,52	33,64	3,02	30,62	0,080	47,00	71	25,90	50
20	21,88	55,41	33,53	2,91	30,62	0,095	47,50	71	25,90	50
25	21,88	55,31	33,43	2,81	30,62	0,092	47,55	70	25,90	50
30	21,88	55,19	33,31	2,69	30,62	0,088	47,60	70	25,90	50
35	21,88	55,02	33,14	2,20	30,62	0,072	47,71	70	25,90	50
40	21,88	54,86	32,98	2,10	30,62	0,069	47,80	70	25,90	50
45	21,88	54,7	32,82	2,06	30,62	0,067	47,85	70	26,00	50
50	21,88	54,57	32,69	2,07	30,62	0,068	47,92	69	25,90	50
60	21,88	54,42	32,54	1,92	30,62	0,063	48,01	70	25,90	50
70	21,88	54,24	32,36	1,74	30,62	0,057	48,05	69	26,10	50
85	21,88	54,11	32,23	1,61	30,62	0,053	48,15	69	25,90	50
100	21,88	53,93	32,05	1,43	30,62	0,047	48,72	68	26,10	50
130	21,88	53,81	31,93	1,31	30,62	0,043	49,02	68	26,30	50
160	21,88	53,75	31,87	1,31	30,62	0,043	49,20	67	26,00	50
190	21,88	53,65	31,77	1,15	30,62	0,038	49,50	68	26,10	50
220	21,88	53,61	31,73	1,11	30,62	0,036	50,05	67	26,30	50
280	21,88	53,57	31,69	1,07	30,62	0,035	50,10	71	26,10	50
340	21,88	53,56	31,68	1,06	30,62	0,035	49,90	70	26,40	50
400	21,88	53,56	31,68	1,07	30,62	0,034	50,10	69	26,30	50
1840	21,88	53,55	31,67	1,04	30,62	0,033	51,00	71	25,90	50
3280	21,88	52,5	30,62	0,00	30,62	0,000	104,50	68	26,00	105

onde: t: tempo, tc: tara da cesta, am: amostra, ma: massa da água, ms: massa seca, M(b.s.): umidade em base seca, θ : temperatura do grão, URamb: Umidade relativa do ar. Tamb: temperatura ambiente, Tsec: temperatura do secador.

Tabela B3 – Experimento de secagem em secador (esteira estática) a 60 °C

t	tc.	tc+m	am.	ma	ms	M(b.s.)	θ	URamb.	Tamb.	Tsec.
(min)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(Kg/kg)	(°C)	(%)	(°C)	(°C)
0	21,87	52,81	30,94	3,30	27,64	0,119	26,50	66	25,80	60
5	21,87	52,71	30,84	3,20	27,64	0,116	45,70	66	25,60	60
10	21,87	52,53	30,66	3,02	27,64	0,109	45,80	67	25,60	60
15	21,87	52,32	30,45	2,81	27,64	0,102	46,20	66	25,60	60
20	21,87	52,19	30,32	2,68	27,64	0,097	46,70	67	25,60	60
25	21,87	52,09	30,22	2,58	27,64	0,093	47,80	67	25,60	60
30	21,87	51,92	30,05	2,41	27,64	0,087	48,40	67	25,40	60
35	21,87	51,81	29,94	2,30	27,64	0,083	49,20	67	25,40	60
40	21,87	51,68	29,81	2,17	27,64	0,079	50,70	67	25,50	60
45	21,87	51,51	29,64	2,00	27,64	0,072	52,00	67	25,50	60
50	21,87	51,38	29,51	1,87	27,64	0,068	52,80	68	25,60	60
60	21,87	51,22	29,35	1,71	27,64	0,062	53,70	68	25,60	60
70	21,87	51,09	29,22	1,58	27,64	0,057	54,50	68	25,90	60
85	21,87	50,97	29,1	1,46	27,64	0,053	55,20	67	25,90	60
100	21,87	50,83	28,96	1,32	27,64	0,048	56,00	65	25,80	60
130	21,87	50,71	28,84	1,20	27,64	0,043	56,80	65	25,80	60
160	21,87	50,65	28,78	1,20	27,64	0,043	57,00	66	25,60	60
190	21,87	50,61	28,74	1,10	27,64	0,040	58,20	64	25,90	60
220	21,87	50,57	28,7	1,06	27,64	0,037	59,10	64	25,90	60
280	21,87	50,55	28,68	1,04	27,64	0,037	59,30	65	25,90	60
340	21,87	50,54	28,67	1,03	27,64	0,037	60,00	67	25,90	60
400	21,87	50,54	28,67	1,03	27,64	0,037	60,10	66	25,80	60
1840	21,87	50,52	28,65	1,01	27,64	0,036	61,80	69	25,80	60
3280	21,87	49,51	27,64	0,00	27,64	0,000	103,90	72	25,90	105

onde: t: tempo, tc: tara da cesta, am: amostra, ma: massa da água, ms: massa seca, M(b.s.): umidade em base seca, θ : temperatura do produto, URamb: umidade relativa do ar, Tamb: temperatura ambiente, Tsec: temperatura do secador.

Tabela B4 – Experimento de secagem em secador (esteira estática) a 70 °C

t	tc	tc+am	am.	ma	ms	M(b.s.)	θ	URamb.	Tamb.	Tsec
(min)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(kg/kg)	(°C)	(%)	(°C)	(°C)
0	21,87	54,03	32,16	2,96	29,20	0,101	27,10	68	26,4	70
5	21,87	53,87	32	2,8	29,20	0,096	51,20	67	26,5	70
10	21,87	53,72	31,85	2,65	29,20	0,091	52,40	66	26,5	70
15	21,87	53,61	31,74	2,54	29,20	0,087	53,20	66	26,5	70
20	21,87	53,45	31,58	2,38	29,20	0,082	54,30	65	26,5	70
25	21,87	53,32	31,45	2,25	29,20	0,077	55,10	65	26,5	70
30	21,87	53,18	31,31	2,11	29,20	0,072	56,30	65	26,6	70
35	21,87	53,11	31,24	2,04	29,20	0,070	57,20	64	26,6	70
40	21,87	52,98	31,11	1,91	29,20	0,065	57,90	64	26,6	70
45	21,87	52,81	30,94	1,74	29,20	0,060	59,10	64	26,5	70
50	21,87	52,68	30,81	1,61	29,20	0,055	61,20	63	26,5	70
60	21,87	52,53	30,66	1,46	29,20	0,050	62,50	63	26,6	70
70	21,87	52,38	30,51	1,31	29,20	0,045	63,00	63	26,6	70
85	21,87	52,22	30,35	1,15	29,20	0,039	65,20	62	26,8	70
100	21,87	52,09	30,22	1,02	29,20	0,035	66,30	62	26,8	70
130	21,87	51,94	30,07	0,87	29,20	0,030	67,20	62	26,9	70
160	21,87	51,91	30,04	0,84	29,20	0,029	68,20	61	27	70
190	21,87	51,89	30,02	0,82	29,20	0,028	68,80	62	26,9	70
220	21,87	51,87	30	0,8	29,20	0,027	70,00	61	26,9	70
280	21,87	51,87	30	0,8	29,20	0,027	70,10	59	26,8	70
1840	21,87	51,87	30	0,8	29,20	0,027	71,20	73	26,9	70
3280	21,87	51,07	29,2	0	29,20	0,000	105,10	67	27,3	105

onde: t: tempo, tc: tara da cesta, am: amostra, ma: massa da água, ms: massa seca, M(b.s.): umidade em base seca, θ : temperatura do grão, U.R.amb.: Umidade relativa do ar. Tamb: temperatura ambiente, Tsec: temperatura da secador.

Tabela B5 – Experimento de secagem em secador (esteira estática) a 80 °C

t	tc	tc+am	am.	ma	ms	M(b.s.)	θ	URamb.	Tamb.	Tsec.
(min)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(kg/kg)	(°C)	(%)	(°C)	(°C)
0	21,89	51,93	30,04	2,98	27,06	0,110	26,90	65	26,6	80
5	21,89	51,78	29,89	2,83	27,06	0,105	33,21	65	26,6	80
10	21,89	50,64	28,75	2,69	27,06	0,099	37,00	66	26,6	80
15	21,89	50,51	28,62	2,56	27,06	0,095	45,70	66	26,8	80
20	21,89	50,68	28,79	2,40	27,06	0,089	53,80	67	26,9	80
25	21,89	50,37	28,48	2,22	27,06	0,082	60,20	68	26,6	80
30	21,89	50,24	28,35	2,15	27,06	0,079	68,30	66	26,6	80
35	21,89	50,11	28,22	2,02	27,06	0,075	74,00	67	26,8	80
40	21,89	49,85	27,96	1,90	27,06	0,070	78,20	67	26,6	80
45	21,89	49,71	27,82	1,76	27,06	0,065	78,80	66	26,6	80
50	21,89	49,57	27,68	1,62	27,06	0,060	81,20	67	26,8	80
60	21,89	49,45	27,56	1,50	27,06	0,055	83,20	67	26,6	80
70	21,89	49,32	27,43	1,37	27,06	0,051	85,60	65	26,6	80
85	21,89	49,25	27,36	1,22	27,06	0,045	86,50	66	26,8	80
100	21,89	49,15	27,26	1,10	27,06	0,041	86,90	65	26,8	80
130	21,89	49,07	27,18	0,98	27,06	0,036	87,32	65	26,6	80
160	21,89	49,06	27,17	0,88	27,06	0,033	88,20	65	26,8	80
190	21,89	49,05	27,16	0,85	27,06	0,031	88,10	66	26,9	80
220	21,89	49,05	27,16	0,85	27,06	0,031	88,30	64	26,9	80
280	21,89	49,05	27,16	0,85	27,06	0,031	89,20	65	0	80
1840	21,89	49,04	27,15	0,84	27,06	0,031	89,20	67	26,4	80
3280	21,89	48,95	27,06	0,00	27,06	0,000	102,80	67	26,5	105

onde: t: tempo, tc: tara da cesta, am: amostra, ma: massa da água, ms: massa seca, M(b.s.): umidade em base seca, θ : temperatura do grão, U.R.amb, umidade relativa do ar. Tamb: temperatura ambiente, Tsecador: temperatura do secador.

Tabela B6 – Experimento de secagem em secador (esteira estática) a 90 °C

t (min)	tc (g)	tc+am (g)	P.Am. (g)	ma (g)	ms (g)	M(b.s.) (kg/kg)	θ (°C)	URamb. (%)	Tamb. (°C)	Tsecador (°C)
0	21,89	51,22	29,33	3,32	26,01	0,128	26,90	65	26,6	90
5	21,89	51,08	29,19	3,18	26,01	0,122	33,21	65	26,6	90
10	21,89	50,92	29,03	3,02	26,01	0,116	37,00	66	26,6	90
15	21,89	50,80	28,91	2,90	26,01	0,111	45,70	66	26,8	90
20	21,89	50,68	28,79	2,78	26,01	0,107	53,80	67	26,9	90
25	21,89	50,51	28,62	2,61	26,01	0,100	60,20	68	26,6	90
30	21,89	50,33	28,44	2,43	26,01	0,093	68,30	66	26,6	90
35	21,89	50,21	28,32	2,31	26,01	0,089	74,00	67	26,8	90
40	21,89	50,12	28,23	2,22	26,01	0,085	78,20	67	26,6	90
45	21,89	49,95	28,06	2,05	26,01	0,079	78,80	66	26,6	90
50	21,89	49,81	27,92	1,91	26,01	0,073	81,20	67	26,8	90
60	21,89	49,71	27,82	1,81	26,01	0,070	83,20	67	26,6	90
70	21,89	49,56	27,67	1,66	26,01	0,064	85,60	65	26,6	90
85	21,89	49,45	27,56	1,55	26,01	0,060	86,50	66	26,8	90
100	21,89	49,33	27,44	1,43	26,01	0,055	86,90	65	26,8	90
130	21,89	49,22	27,33	1,32	26,01	0,051	87,32	65	26,6	90
160	21,89	49,14	27,25	1,32	26,01	0,051	88,20	65	26,8	90
190	21,89	49,02	27,13	1,12	26,01	0,041	88,10	66	26,9	90
220	21,89	48,96	27,07	1,06	26,01	0,041	88,30	64	26,9	90
280	21,89	48,96	27,07	1,06	26,01	0,041	89,20	65	0	90
1840	21,89	48,96	27,07	1,06	26,01	0,041	89,20	67	26,4	90
3280	21,89	47,90	26,01	0,00	26,01	0,00	102,80	67	26,5	105

onde: t: tempo, tc: tara da cesta, am: amostra, ma: massa da água, ms: massa seca, M(b.s.): umidade em base seca, θ : temperatura do grão, U.R.amb, umidade relativa do ar .Tamb: temperatura ambiente, Testufa: temperatura da estufa.

APÊNDICE C

Dados de secagem de semente de mamona em secador com esteira em movimento

Tabela C1 – Experimento de secagem em secador (esteira em movimento) a 40 °C

t	tc	tc+am	am	ma	ms	M(b.s.)	θ	URamb	Tamb.	Tsecador
(min)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(kg/kg)	(°C)	(%)	(°C)	(°C)102
0	60,10	84,71	24,61	2,69	21,92	0,123	27,50	61,00	27,80	40
32	60,10	84,50	24,40	2,48	21,92	0,113	34,00	57,00	28,30	40
64	60,10	84,31	24,21	2,29	21,92	0,104	35,20	54,00	28,50	40
96	60,10	84,18	24,08	2,16	21,92	0,099	36,00	52,00	28,80	40
128	60,10	84,00	23,89	2,01	21,92	0,092	37,20	52,00	28,60	40
160	60,10	83,85	23,75	1,83	21,92	0,083	37,80	51,00	29,00	40
192	60,10	83,68	23,58	1,66	21,92	0,070	38,10	50,00	29,10	40
224	60,10	83,53	23,43	1,51	21,92	0,069	38,52	50,00	29,10	40
256	60,10	83,41	23,31	1,39	21,92	0,051	39,10	49,00	29,40	40
288	60,10	83,96	23,21	0,99	21,92	0,045	39,60	49,00	29,40	40
320	60,10	83,19	23,09	1,17	21,92	0,044	39,70	49,00	29,50	40
352	60,10	83,09	22,99	1,07	21,92	0,043	39,70	50,00	29,90	40
416	60,10	83,01	22,91	0,99	21,92	0,043	40,00	51,00	27,90	40
448	60,10	83,01	22,91	0,99	21,92	0,043	40,02	51,00	29,80	40
1760	60,10	84,03	22,88	0,96	21,92	0,042	40,00	50,00	31,00	40
3200	60,10	82,02	21,92	0	21,92	0,000	104,80	49,00	31,50	105

onde: t: tempo, tc: tara da cesta, am: amostra, ma: massa da água, ms: massa seca, M(b.s.): umidade em base seca, θ : temperatura do grão, UR.amb: umidade relativa do ambiente. Tamb: temperatura ambiente, Tsecador: temperatura do secador.

Tabela C2 – Experimento de secagem em secador (esteira em movimento) a 50 °C

t	tc	tc+am	am	ma	ms	M(b.s.)	θ	URamb.	Tamb	Tsec
(min)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(kg/kg)	(°C)	(%)	(°C)	(°C)
0	64,04	88,48	24,44	2,42	22,02	0,110	28,30	58,00	28,30	50,00
32	64,04	88,28	24,24	2,22	22,02	0,100	38,20	57,50	29,60	50,00
64	64,04	88,10	24,06	2,04	22,02	0,090	39,50	54,00	29,60	50,00
96	64,04	87,94	23,90	1,88	22,02	0,090	41,30	52,80	29,50	50,00
128	64,04	87,81	23,77	1,75	22,02	0,080	42,30	52,00	29,60	50,00
160	64,04	87,67	23,63	1,61	22,02	0,070	43,20	51,00	29,80	50,00
192	64,04	87,50	23,46	1,44	22,02	0,070	44,80	50,00	30,00	50,00
224	64,04	87,48	23,44	1,42	22,02	0,060	45,40	50,00	29,90	50,00
256	64,04	87,32	23,28	1,26	22,02	0,060	46,20	49,00	30,00	50,00
288	64,04	87,19	23,15	1,13	22,02	0,050	47,30	49,00	29,80	50,00
320	64,04	87,08	23,04	1,13	22,02	0,050	49,40	49,00	30,00	50,00
352	64,04	87,06	23,02	1,00	22,02	0,050	49,80	50,00	29,90	50,00
416	64,04	87,05	23,01	0,99	22,02	0,040	49,80	51,00	30,00	50,00
448	64,04	87,05	23,01	0,99	22,02	0,040	49,80	50,00	30,00	50,00
1440	64,04	87,04	23,00	0,98	22,02	0,040	49,90	49,00	30,50	50,00
2880	64,04	86,06	22,02	0,00	22,02	0,000	105,00	48,50	30,00	105,00

onde: t: tempo, tc: tara da cesta, am: amostra, ma: massa da água, ms: massa seca, M(b.s.): umidade em base seca, θ : temperatura do grão, URamb: umidade relativa do ar. Tamb: temperatura ambiente, Tsecador: temperatura da estufa..

Tabela C3 – Experimento de secagem em secador (esteira em movimento) a 60 °C

t	tc	tc+am	am	ma	ms	M(b.s.)	θ	URar	Tamb.	Tsec
min	G	G	g	g	g	kg/kg	°C	%	°C	°C
0	60,01	92,8	32,79	2,62	30,17	0,087	30,00	59,00	28,00	60
32	60,01	92,61	32,60	2,43	30,17	0,081	50,20	59,00	28,10	60
64	60,01	92,43	32,42	2,25	30,17	0,075	52,30	58,00	28,40	60
96	60,01	92,23	32,22	2,05	30,17	0,068	53,40	57,00	28,90	60
128	60,01	92,04	32,03	1,86	30,17	0,062	54,00	56,00	29,10	60
160	60,01	91,90	31,89	1,72	30,17	0,057	55,60	55,00	29,60	60
192	60,01	91,75	31,74	1,57	30,17	0,052	55,20	54,00	29,90	60
224	60,01	91,63	31,62	1,45	30,17	0,048	57,20	53,00	29,90	60
256	60,01	91,52	31,51	1,34	30,17	0,044	58,20	52,00	30,30	60
288	60,01	91,41	31,40	1,23	30,17	0,041	58,80	51,00	31,00	60
320	60,01	91,28	31,27	1,10	30,17	0,036	59,10	50,00	31,00	60
352	60,01	91,18	31,17	1,00	30,17	0,033	59,80	48,00	29,10	60
416	60,01	91,14	31,13	0,96	30,17	0,032	60,00	47,00	29,00	60
448	60,01	91,14	31,13	0,96	30,17	0,032	60,00	48,00	30,00	60
1440	60,01	91,13	31,12	0,95	30,17	0,031	60,00	47,00	30,50	
2880	60,01	90,18	30,17	0,00	30,17	0,000	104,50	46,00	31,00	

onde: t: tempo, tc: tara da cesta, am: amostra, ma: massa da água, ms: massa seca, M(b.s.): umidade em base seca, θ : temperatura do grão, UR.amb: umidade relativa do ar., Tamb: temperatura ambiente., Tsecador: temperatura do secador.

Tabela C4 – Experimento de secagem em secador (esteira em movimento) a 70 °C.

t	tc	tc+am	am	ma	ms	M(b.s.)	θ	URamb	Tamb.	Tsec
(min)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(kg/kg)	(°C)	(%)	(°C)	(°C)
0	39,38	70,60	31,22	2,74	28,48	0,096	30,00	58	28	70
32	39,38	70,14	30,76	2,28	28,48	0,080	58,80	57	28,10	70
64	39,38	69,64	30,26	1,78	28,48	0,063	60,20	56	28,40	70
96	39,38	69,34	29,96	1,48	28,48	0,052	62,20	55	28,90	70
128	39,38	69,14	29,76	1,28	28,48	0,045	64,80	54	29,10	70
160	39,38	68,91	29,53	1,05	28,48	0,037	65,60	53	29,60	70
192	39,38	68,74	29,36	0,88	28,48	0,031	66,20	52	29,90	70
224	39,38	68,74	29,36	0,88	28,48	0,031	67,20	51	29,90	70
256	39,38	68,74	29,36	0,88	28,48	0,031	67,40	50	30,30	70
288	39,38	68,74	29,36	0,88	28,48	0,031	67,80	48	31,00	70
1440	39,38	68,71	29,33	0,85	28,48	0,030	69,80	46	29,50	70
2880	39,38	67,86	28,48	0,00	28,48	0,000	105,00	47	30,00	70

Tabela C5 – Experimento de secagem em secador (esteira em movimento) a 80°C.

t	tc	Tc+am	am	ma	ms	M(b.s.)	θ	URamb	Tamb	Tsec
(min)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(kg/kg)	(°C)	(%)	(°C)	(°C)
0	39,37	74,31	34,94	3,35	30,45	0,11	30,00	58	28,00	80
32	39,37	73,88	34,51	2,92	30,45	0,096	58,80	57	28,10	80
64	39,37	73,40	34,03	2,44	30,45	0,080	60,20	56	28,40	80
96	39,37	73,03	33,66	2,07	30,45	0,068	62,20	55	28,90	80
128	39,37	72,63	33,23	1,67	30,45	0,055	64,80	54	29,10	80
160	39,37	72,42	33,05	1,46	30,45	0,048	65,60	53	29,60	80
192	39,37	72,27	32,90	1,31	30,45	0,043	66,20	52	29,90	80
224	39,37	72,27	32,90	1,31	30,45	0,043	68,00	51	29,90	80
256	39,37	72,27	32,90	1,31	30,45	0,043	69,00	51	30,30	80
288	39,37	72,27	32,90	1,31	30,45	0,043	73,50	50	31,00	80
1440	39,37	70,85	31,59	1,28	30,45	0,042	80,00	53	29,50	80
2880	39,37	69,82	00,00	0,00	30,45	0,000	104,70	54	30,00	105

onde: t: tempo, tc: tara da cesta, am: amostra, ma: massa da água, ms: massa seca, M(b.s.): umidade em base seca, θ : temperatura do grão, URamb, umidade relativa do ambiente. Tamb: temperatura ambiente, Tsecador: temperatura do secador.

Tabela C6 – Experimento de secagem em secador (esteira em movimento) a 90 °C

t (min)	tc (g)	tc+am (g)	am (g)	ma (g)	ms (g)	M(b.s.) (kg/kg)	θ (°C)	URamb (%)	Tamb (%)	Tsec (°C)
0	39,37	70,83	31,46	2,87	27,58	0,104	27,80	63,00	27,60	90
32	39,37	70,44	31,07	2,48	27,58	0,090	77,29	60,00	28,30	90
64	39,37	70,06	30,69	2,10	27,58	0,076	78,19	54,00	30,40	90
96	39,37	69,78	30,41	1,82	27,58	0,066	80,21	51,00	30,80	90
128	39,37	69,48	30,11	1,52	27,58	0,055	83,21	50,00	31,10	90
160	39,37	69,28	29,91	1,32	27,58	0,048	85,00	49,00	31,40	90
192	39,37	69,25	29,88	1,30	27,58	0,047	86,05	47,00	31,60	90
224	39,37	69,25	29,88	1,30	27,58	0,047	88,05	61,00	32,20	90
256	39,37	69,25	29,88	1,30	27,58	0,047	89,00	62,00	32,00	90
1440	39,37	69,23	29,86	1,29	27,58	0,046	90,00	65,00	34,00	90
2880	39,37	66,95	27,58	0,00	27,58	0,00	104,50	64,50	35,00	105

onde: t: tempo, tc: tara da cesta, am: amostra, ma: massa da água, ms: massa seca, M(b.s.): umidade em base seca, θ : temperatura do grão, URamb: umidade relativa do ambiente; Tamb: temperatura ambiente, Tsec: temperatura do secador.

APÊNDICE D

Condições do ar de secagem dentro e fora do equipamento

Tabela D1 - Condições experimentais do ar dentro e fora do secador.

Secador esteira estática					
Testes	Ambiente externo			Ambiente interno	
	T (°C)	URe (%)	T (°C)	URi (%)	V (m/s)
1	26,17	67,71	40	30,67	0,66
2	26,02	69,54	50	11,88	0,66
3	25,70	66,71	60	9,81	0,66
4	26,69	64,18	70	7,21	0,66
5	26,69	66,00	80	4,50	0,66
6	25,47	66,00	90	3,10	0,66

onde: T: Temperatura da sala, URe: Umidade relativa da sala, T: Temperatura do secador, URi: Umidade no interior do secador durante o período de secagem, V: Velocidade do ar de secagem.

Tabela D2 - Condições experimentais do ar dentro e fora do secador.

Secador (Esteira em Movimento)					
Testes	Ambiente externo		Ambiente interno		
	T (°C)	URa (%)	T (°C)	URi (%)	V (m/s)
1	27,5	68,8	40	30,97	0,66
2	27,4	69,2	50	22,50	0,66
3	27,8	68,5	60	12,07	0,66
4	27,2	67,3	70	7,80	0,66
5	26,8	67,5	80	5,13	0,66
6	27,8	68,6	90	3,27	0,66

URa: umidade relativa do ar; Uri: umidade relativa no interior do secador.

Tabela D3 – Condições experimentais do ar dentro e fora da estufa.

Estufa					
Testes	Ambiente externo		Ambiente interno		
	T (°C)	URex (%)	URint (%)	T (°C)	V (m/s)
1	27	67	31,15	40	0,040
2	26	68	18,96	50	0,050
3	25,8	69	11,05	60	0,060
4	26,9	73	7,21	70	0,070
5	26,4	73	4,01	80	0,080
6	26,4	64	2,84	90	0,090

onde, T: Temperatura do secador, URex: Umidade relativa da sala, URint: Umidade relativa no interior do produto, V: velocidade do ar de secage

APÊNDICE E

Dados geométricos da semente de mamona antes e após a secagem

Tabela E1- Dados geométricos da semente de mamona na secagem em estufa a 40°C.

t (min)	ai(mm)	af(mm)	bi(mm)	bf(mm)	ci(mm)	cf(mm)	Vi(mm ³)	Vf(mm ³)	Vf/Vi	Dgi(mm)	Es(mm)	Ai(mm ²)	Dgf(mm)	Es(mm)	Af(mm ²)
5	17,60	17,42	8,03	7,95	14,86	14,56	1099,63	1055,79	0,96	12,81	72,76	40,23	12,63	71,78	39,69
10	16,72	16,57	7,44	7,29	14,02	13,82	913,18	874,09	0,96	12,04	71,99	37,82	11,86	70,95	37,27
15	18,25	17,95	7,44	7,29	14,02	13,82	996,74	946,89	0,95	12,39	67,91	38,94	12,18	66,76	38,28
20	17,32	17,10	8,02	7,83	13,48	13,24	980,42	928,21	0,95	12,33	71,16	38,72	12,10	69,88	38,02
25	18,57	18,29	7,56	7,45	14,94	14,84	1098,21	1058,77	0,96	12,80	68,93	40,21	12,65	68,10	39,73
30	18,66	18,35	7,91	7,77	14,7	14,50	1136,07	1082,49	0,95	12,95	69,38	40,67	12,74	68,27	40,02
35	15,20	14,95	7,05	6,89	12,45	12,19	698,56	657,45	0,94	11,01	72,43	34,58	10,79	70,98	33,89
40	18,02	17,83	7,55	7,42	13,73	13,56	978,07	939,32	0,96	12,32	68,34	38,69	12,15	67,43	38,17
45	18,44	18,36	7,88	7,80	14,44	14,30	1098,64	1072,27	0,98	12,80	69,43	40,22	12,70	68,87	39,90
50	18,49	18,20	8,08	8,00	14,73	14,48	1152,26	1103,90	0,96	13,01	70,35	40,86	12,82	69,35	40,28
60	18,12	17,95	7,65	7,57	13,66	13,47	991,45	958,36	0,97	12,37	68,28	38,87	12,23	67,51	38,43
70	18,50	18,15	7,92	7,88	14,17	13,94	1087,09	1043,92	0,96	12,76	68,96	40,08	12,59	68,03	39,54
85	17,87	17,59	7,76	7,62	14,52	14,29	1054,27	1002,89	0,95	12,63	70,66	39,67	12,42	69,50	39,02
100	17,76	17,50	7,35	7,30	13,45	13,25	919,29	886,29	0,96	12,06	67,93	37,90	11,92	67,10	37,44
130	18,58	18,34	7,91	7,84	14,26	13,92	1097,34	1047,98	0,96	12,80	68,88	40,20	12,60	67,83	39,59
160	17,76	17,46	7,64	7,44	14,07	13,88	999,61	944,07	0,94	12,41	69,85	38,97	12,17	68,53	38,24
190	17,43	17,23	7,33	7,16	13,56	13,40	907,11	865,57	0,95	12,01	68,91	37,73	11,82	67,84	37,15
220	16,40	16,17	7,34	7,12	12,78	12,58	805,51	758,35	0,94	11,54	70,39	36,27	11,31	68,99	35,54
280	16,36	16,11	7,26	7,06	16,25	16,02	1010,59	954,03	0,94	12,45	76,10	39,11	12,21	74,66	38,37
340	17,55	17,30	7,65	7,55	13,28	13,09	933,55	895,23	0,96	12,13	69,09	38,09	11,96	68,13	37,57
400	16,06	15,89	7,01	6,85	12,56	12,42	740,38	707,84	0,96	11,22	69,89	35,26	11,06	68,85	34,74
5	17,60	17,37	7,61	7,48	14,00	13,79	985,62	942,08	0,96	12,32	70,08	38,72	12,14	68,99	38,14

ai: Comprimento inicial do grão; af: comprimento final do grão; bi: espessura inicial do grão; bf: espessura final do grão; ci: largura inicial do grão; cf: largura final do grão; Vi: volume inicial do grão; Vf: volume final do grão; Dgi: diâmetro geométrico inicial; Dgf: volume geométrico final; Es: esfericidade; Ai e Af: área inicial e final do grão.

Tabela E2 - Dados geométricos da semente de mamona na secagem em estufa a 50°C.

t (min)	af(mm)	bi(mm)	bf(mm)	Ci(mm)	Cf(mm)	Vi(mm ³)	Vf(mm ³)	Vf/V1	Dgi(mm)	Esi(mm)	Ai(mm ²)	Dgf(mm)	Esf(mm)	Af(mm ²)
5	16,36	7,09	6,8	12,96	12,66	795,29	737,44	0,99	11,49	69,54	36,11	11,21	68,52	35,21
10	17,6	7,76	7,41	12,87	12,93	888,45	882,94	0,89	11,93	70,20	37,47	11,90	67,63	37,39
15	17,14	7,68	7,59	13,98	12,67	970,87	863,04	0,93	12,29	71,14	38,60	11,81	68,92	37,11
20	17,81	7,68	7,86	13,55	11,92	943,73	873,70	0,93	12,17	70,26	38,23	11,86	66,60	37,26
25	17,11	7,35	7,11	13,02	12,71	871,36	809,59	0,79	11,85	68,14	37,23	11,56	67,58	36,33
30	16,95	7,85	7,15	13,96	12,48	997,82	791,94	0,84	12,40	71,29	38,95	11,48	67,72	36,06
35	17,99	7,93	7,36	13,78	12,47	1028,18	864,52	0,93	12,52	69,69	39,34	11,82	65,70	37,13
40	17,94	7,89	7,37	13,96	13,63	1016,75	943,59	1,01	12,48	70,77	39,19	12,17	67,83	38,23
45	17,65	7,59	7,61	13,9	13,91	972,78	978,26	0,94	12,29	69,81	38,62	12,32	69,78	38,69
50	16,71	7,58	7,45	13,72	13,34	921,89	869,54	0,88	12,08	71,32	37,94	11,84	70,87	37,20
60	15,76	7,44	7,71	13,66	13,18	956,78	838,54	0,99	12,23	68,00	38,41	11,70	74,24	36,76
70	16,78	7,47	7,3	13,05	13,68	888,65	877,41	0,94	11,93	68,51	37,47	11,88	70,79	37,32
85	17,54	7,82	7,54	13,11	13,08	964,09	905,75	0,89	12,26	68,24	38,51	12,00	68,44	37,71
100	17,66	7,46	6,84	13,83	13,52	957,25	855,11	0,83	12,23	69,00	38,41	11,78	66,68	37,00
130	17,27	7,86	6,77	13,44	13,17	968,52	806,24	0,98	12,28	70,11	38,56	11,55	66,86	36,28
160	17,53	7,08	7,25	13,76	13,43	908,99	893,71	0,98	12,02	67,44	37,76	11,95	68,17	37,54
190	16,9	7,48	7,32	13,45	13,64	899,73	883,51	0,95	11,98	70,13	37,63	11,91	70,45	37,40
220	17,35	7,3	7,23	13,61	13,42	932,22	881,43	0,98	12,12	67,63	38,08	11,90	68,56	37,37
280	16,02	7,5	7,86	13,8	13,92	938,62	917,75	0,91	12,15	70,14	38,16	12,06	75,26	37,88
340	17,04	7,39	7,21	13,5	13,55	958,03	871,65	0,88	12,23	66,69	38,42	11,85	69,55	37,23
400	16,93	7,33	7,13	13,91	13,7	983,38	865,90	0,91	12,34	66,98	38,76	11,83	69,85	37,15

ai: Comprimento inicial do grão; af: comprimento final do grão; bi: espessura inicial do grão; bf: espessura final do grão; ci: largura inicial do grão; cf: largura final do grão; Vi: volume inicial do grão; Vf: volume final do grão; Dgi: diâmetro geométrico inicial; Dgf: diâmetro geométrico final; Es: esfericidade; Ai e Af: área inicial e final do grão.

Tabela E3 - Dados geométricos da semente de mamona na secagem em estufa a 60°C

t (min)	ai(mm)	af(mm)	bi(mm)	bf(mm)	ci(mm)	cf(mm)	Vi(mm)	Vf(mm ³)	Vf/V1	Dg(mm)i	Esi(mm)	Ai(mm ²)	Dg(mm)f	Esf(mm)	Af(mm ²)
5	16,43	14,13	6,99	6,51	11,49	11,2	690,93	539,44	0,86	10,97	66,76	34,46	10,10	71,48	31,73
10	16,48	15,72	6,99	6,52	12,27	11,92	740,08	639,70	0,86	11,22	68,10	35,26	10,69	68,00	33,58
15	16,8	15,78	6,99	6,55	12,99	12,7	798,72	687,31	0,94	11,51	68,52	36,16	10,95	69,39	34,40
20	16,06	16,17	7,85	7,42	12,66	12,45	835,70	782,14	0,97	11,69	72,77	36,71	11,43	70,69	35,91
25	16,16	16,65	7,08	6,8	12,85	12,56	769,80	744,58	0,93	11,37	70,36	35,72	11,25	67,54	35,33
30	16,88	16,77	7,74	7,35	12,87	12,65	880,42	816,41	1,03	11,89	70,45	37,36	11,60	69,15	36,43
35	14,9	16,29	7,24	7,01	12,42	12,1	701,53	723,48	0,87	11,02	73,99	34,63	11,14	68,37	34,99
40	17,7	16,5	7,5	7,22	13,96	13,6	970,33	848,32	0,90	12,28	69,40	38,59	11,75	71,18	36,90
45	17,54	16,93	7,59	7,25	13,49	13,22	940,34	849,62	0,90	12,16	69,30	38,19	11,75	69,41	36,92
50	17,67	16,9	7,75	7,42	13,66	13,4	979,46	879,82	0,95	12,32	69,73	38,71	11,89	70,35	37,35
60	17,58	17,91	7,37	7,01	13,07	12,82	886,67	842,75	0,94	11,92	67,80	37,45	11,72	65,43	36,82
70	17,34	17,51	7,47	7,15	13,53	13,22	917,63	866,61	0,93	12,06	69,53	37,88	11,83	67,55	37,16
85	17,86	17,48	7,7	7,45	13,99	13,72	1007,37	935,52	0,90	12,44	69,64	39,07	12,13	69,42	38,12
100	17,82	17,15	7,28	6,95	13,64	13,32	926,52	831,29	0,95	12,10	67,88	38,00	11,67	68,02	36,65
130	17,71	17,96	7,56	7,25	13,74	13,45	963,22	916,99	0,96	12,25	69,19	38,49	12,05	67,11	37,87
160	17,41	17,63	7,7	7,48	13,08	12,7	918,11	876,91	0,98	12,06	69,26	37,88	11,88	67,36	37,31
190	17,13	17,91	7,43	7,1	13,82	13,59	920,99	904,84	0,92	12,07	70,47	37,92	12,00	67,00	37,70
220	17,61	17,06	7,67	7,42	13,56	13,35	958,99	884,84	0,94	12,24	69,48	38,44	11,91	69,82	37,42
280	17,21	17,5	7,56	7,15	13,34	13,01	908,78	852,36	0,93	12,02	69,83	37,75	11,76	67,22	36,96
340	17,41	17,17	7,46	7,16	13,28	13,03	903,10	838,74	0,95	11,99	68,88	37,68	11,70	68,15	36,76
400	17,8	18,55	7,17	6,91	14,61	13,8	976,31	926,19	0,89	12,31	69,15	38,67	12,09	65,20	37,99

ai: Comprimento inicial do grão; af: comprimento final do grão; bi: espessura inicial do grão; bf: espessura final do grão; ci: largura inicial do grão; cf: largura final do grão; Vi: volume inicial do grão; Vf: volume final do grão; Dgi: diâmetro geométrico inicial; Dgf: diâmetro geométrico final; Es: esfericidade; Ai e Af: área inicial e final do grão.

Tabela E4 - Dados geométricos da semente de mamona na secagem em estufa a 70°C.

t (min)	ai(mm)	af(mm)	bi(mm)	bf(mm)	ci(mm)	cf(mm)	Vi(mm, ³)	Vf(mm ³)	Vf/Vi	Dg(mm)i	Esi(mm)	Ai(mm ²)	Dgf(mm)	Esf(mm)	Af(mm ²)
5	17,3	17,15	8,3	7,24	14,52	14,41	1091,67	936,84	0,98	12,78	73,84	40,13	12,14	70,97	38,14
10	16,71	16,58	7,4	7,34	13,5	13,43	874,06	855,77	0,94	11,86	70,99	37,27	11,78	71,17	37,01
15	18,25	18,1	7,8	7,5	14,2	14,07	1058,39	1000,08	0,98	12,64	69,28	39,72	12,41	68,76	38,98
20	17,28	17,14	7,2	7,14	14,3	14,18	931,56	908,63	0,92	12,12	70,12	38,07	12,02	70,31	37,75
25	18,55	18,4	8	7,5	13,3	13,21	1033,44	954,51	0,91	12,54	67,62	39,41	12,22	66,54	38,38
30	18,65	18,51	6,9	6,4	14,2	14,09	956,79	873,97	0,92	12,23	65,55	38,41	11,86	64,25	37,27
35	15,21	15,11	5,8	5,4	12,4	12,31	572,77	525,92	0,94	10,30	67,74	32,37	10,01	66,44	31,46
40	18	17,87	7,8	7,4	13,25	13,16	974,05	911,20	0,92	12,30	68,33	38,64	12,03	67,46	37,79
45	18,13	18	7,5	7	14,3	14,19	1018,11	936,17	0,92	12,48	68,84	39,21	12,14	67,60	38,13
50	18,8	18,67	7,7	7,2	14,35	14,23	1087,68	1001,57	0,92	12,76	67,87	40,09	12,41	66,68	39,00
60	17,5	17,37	7,8	7,3	13,3	13,19	950,57	875,72	0,91	12,20	69,71	38,32	11,87	68,53	37,29
70	19	18,85	7,9	7,3	14,2	14,09	1116,01	1015,18	0,91	12,87	67,73	40,43	12,47	66,32	39,17
85	18,3	18,16	8,1	7,5	14,45	14,35	1121,51	1023,36	0,91	12,89	70,44	40,50	12,50	69,01	39,28
100	17,3	17,14	7,2	6,7	14,2	14,09	926,12	847,22	0,94	12,09	69,91	37,99	11,74	68,67	36,88
130	16,5	16,47	7,1	6,7	13,2	13,11	809,68	757,48	0,98	11,56	70,08	36,33	11,31	68,83	35,53
160	17,4	17,37	7,4	7,34	14,3	14,19	964,09	947,28	0,98	12,26	70,44	38,51	12,19	70,33	38,28
190	18,4	18,25	7,8	7,74	14,7	14,65	1104,66	1083,53	0,98	12,83	69,70	40,29	12,74	69,91	40,03
220	18,2	18,06	7,9	7,84	14,9	14,78	1121,72	1095,74	0,98	12,89	70,83	40,50	12,79	71,02	40,18
280	19,1	18,94	8,1	8,04	15,1	15	1223,19	1195,99	0,92	13,27	69,47	41,69	13,17	69,69	41,37
340	18,5	18,36	7,8	7,3	16,2	16,09	1224,00	1129,15	0,91	13,27	71,74	41,69	12,92	70,53	40,59
400	18,2	18,07	7,4	7,34	15,1	14,01	1064,83	972,95	0,92	12,67	69,61	39,80	12,29	69,76	38,62

ai: Comprimento inicial do grão; af: comprimento final do grão; bi: espessura inicial do grão; bf: espessura final do grão; ci: largura inicial do grão; cf: largura final do grão; Vi: volume inicial do grão; Vf: volume final do grão; Dgi: diâmetro geométrico inicial; Dgf: diâmetro geométrico final; Es: esfericidade; Ai e Af: área inicial e final do grão.

Tabela E5 - Dados geométricos da semente de mamona na secagem em estufa a 80°C.

t(min)	ai(mm)	af(mm)	bi(mm)	bf(mm)	ci(mm)	cf(mm)	Vi(mm ³)	Vf(mm ³)	Vf/Vi	Dg(mm)i	Esi(mm)	Ai(mm ²)	Dgf(mm)	Esf(mm)	Af(mm ²)
5	16,52	16,39	7,08	7,02	12,94	12,84	792,46	773,54	0,98	11,48	69,50	36,07	11,39	69,67	35,78
10	16,97	16,84	7,4	7,34	12,85	12,74	844,92	824,53	0,98	11,73	69,12	36,85	11,63	69,28	36,55
15	17,5	17,36	7,6	7,54	13,1	12,99	912,27	890,29	0,98	12,03	68,76	37,80	11,94	68,95	37,50
20	18,2	18,07	7,9	7,84	14,2	14,09	1069,02	1045,16	0,91	12,69	69,70	39,85	12,59	69,86	39,56
25	18,4	18,27	7,7	7,1	14,1	14	1045,99	950,88	0,98	12,59	68,45	39,57	12,20	66,94	38,33
30	18,2	18,06	7,9	7,84	14,3	14,19	1076,55	1052,00	0,98	12,72	69,87	39,95	12,62	70,05	39,64
35	17,5	17,37	7,5	7,44	14,2	14,09	975,86	953,42	0,98	12,31	70,32	38,66	12,21	70,48	38,36
40	18	17,87	7,6	7,54	14,4	14,3	1031,45	1008,86	0,98	12,54	69,64	39,38	12,44	69,80	39,09
45	17,5	17,37	7,1	7,04	13,9	13,91	904,30	890,63	0,08	12,00	68,56	37,69	11,94	68,71	37,50
50	18,2	18,06	7,6	7,54	14,2	1,09	1028,43	77,72	0,98	12,52	68,81	39,34	5,29	68,98	16,63
60	17,5	17,37	7,3	7,24	14,7	14,59	983,28	960,71	0,98	12,34	70,50	38,76	12,24	70,66	38,46
70	18,1	17,96	7,9	7,84	14,8	14,69	1108,07	1083,04	0,98	12,84	70,93	40,33	12,74	71,12	40,03
85	17,7	17,57	7,4	7,35	14,2	14,11	973,85	954,08	0,98	12,30	69,48	38,64	12,21	69,66	38,37
100	18,2	18,06	7,8	7,74	15,3	15,19	1137,25	1111,77	0,98	12,95	71,16	40,69	12,85	71,34	40,38
130	17,9	17,77	7,5	7,44	15,8	15,69	1110,63	1086,13	0,98	12,85	71,78	40,37	12,75	71,94	40,07
160	18,3	18,16	7,9	7,84	14,7	14,57	1112,74	1086,15	0,98	12,86	70,26	40,39	12,75	70,44	40,07
190	17,5	17,36	7,4	7,33	14,2	14,09	962,85	938,78	0,98	12,25	70,01	38,49	12,15	70,16	38,17
220	18,1	17,96	8,2	8,13	14,9	14,79	1157,92	1130,75	0,98	13,03	71,98	40,93	12,93	72,15	40,61
280	16,4	16,29	6,8	6,76	13,2	13,11	770,77	755,91	0,98	11,38	69,36	35,74	11,30	69,54	35,51
340	16,8	16,68	6,5	6,46	13,3	13,21	760,46	745,30	0,98	11,32	67,41	35,58	11,25	67,59	35,34
400	17,2	17,07	7,1	7,04	13,9	13,79	888,79	867,70	0,98	11,93	69,35	37,48	11,83	69,51	37,18

ai: Comprimento inicial do grão; af: comprimento final do grão; bi: espessura inicial do grão; bf: espessura final do grão; ci: largura inicial do grão; cf: largura final do grão; Vi: volume inicial do grão; Vf: volume final do grão; Dgi: diâmetro geométrico inicial; Dgf: diâmetro geométrico final; Es: esfericidade; Ai e Af: área inicial e final do grão.

Tabela E6 - Dados geométricos da semente de mamona na secagem em estufa a 90°C.

ai(mm)	af(mm)	bi(mm)	bf(mm)	ci(mm)	cf(mm)	Vi(mm ³)	Vf(mm ³)	Vf/V1	Dg(mm)i	Esi(mm)	Ai(mm ³)	Dgf(mm)	Esf(mm)	Af(mm ²)
16,52	16,39	7,08	7,02	12,94	12,84	792,46	773,54	0,98	11,48	69,50	36,07	11,39	69,67	35,78
18,50	18,36	8,10	8,04	14,20	14,08	1114,15	1088,26	0,98	12,86	69,53	40,41	12,76	69,71	40,09
18,20	18,07	7,90	7,85	14,10	13,99	1061,49	1039,07	0,91	12,66	69,54	39,76	12,57	69,73	39,48
18,40	18,27	8,00	7,40	14,20	14,08	1094,45	996,72	0,98	12,79	69,49	40,17	12,39	68,03	38,94
17,50	17,37	7,60	7,54	13,80	13,68	961,02	938,12	0,98	12,24	69,96	38,46	12,15	70,13	38,16
17,80	17,66	7,50	7,44	14,20	14,09	992,59	969,34	0,98	12,38	69,53	38,88	12,28	69,71	38,58
18,20	18,07	7,90	7,84	14,10	14,00	1061,49	1038,49	0,98	12,66	69,54	39,76	12,56	69,70	39,47
17,80	17,67	7,30	7,25	13,80	13,69	938,90	918,29	0,98	12,15	68,25	38,17	12,06	68,43	37,89
17,50	17,36	7,20	7,14	13,70	13,59	903,84	882,00	0,90	12,00	68,55	37,69	11,90	68,72	37,38
18,20	18,05	7,40	6,80	13,90	13,79	980,21	886,24	0,98	12,32	67,72	38,72	11,92	66,20	37,44
17,40	17,26	7,20	7,15	13,08	12,98	858,00	838,73	0,98	11,79	67,76	37,04	11,70	67,96	36,76
18,10	17,96	7,60	7,54	14,40	14,28	1037,18	1012,52	1,04	12,56	69,39	39,45	12,46	69,56	39,14
16,70	17,56	6,90	6,86	13,80	13,69	832,62	863,48	0,98	11,67	69,89	36,67	11,81	67,46	37,12
17,50	17,37	7,20	7,14	13,90	13,79	917,03	895,49	0,98	12,05	68,88	37,87	11,96	69,03	37,57
18,20	18,07	7,60	7,54	14,00	13,88	1013,94	990,19	0,98	12,46	68,49	39,16	12,37	68,63	38,85
18,80	18,75	8,10	8,03	14,70	14,59	1172,09	1150,20	0,98	13,08	69,58	41,10	13,00	69,50	40,84
17,70	17,56	7,60	7,54	14,10	14,00	993,13	970,56	0,98	12,38	69,94	38,89	12,28	70,12	38,59
16,80	16,71	5,80	5,76	13,30	13,22	678,56	666,24	0,97	10,90	64,90	34,25	10,84	64,98	34,04
17,60	17,47	6,30	6,24	13,90	13,78	806,99	786,55	0,98	11,55	65,63	36,29	11,45	65,75	35,98
18,20	18,05	7,20	7,14	14,20	14,09	974,30	950,79	0,98	12,30	67,58	38,64	12,20	67,77	38,33
17,80	17,66	7,50	7,44	14,10	14,00	985,60	963,14	0,98	12,35	69,37	38,79	12,25	69,55	38,49
18,20	18,04	7,80	7,75	14,40	14,39	1070,36	1053,41	0,98	12,69	69,73	39,87	12,62	69,99	39,66
18,30	18,16	7,90	7,84	14,20	14,08	1074,90	1049,63	0,98	12,71	69,45	39,93	12,61	69,63	39,61
17,50	17,36	7,50	7,44	13,80	13,70	948,37	926,49	0,98	12,19	69,66	38,30	12,10	69,84	38,00

APÊNDICE F

Cálculo da vazão volumétrica e velocidade do ar no interior do módulo de secagem

a - Cálculo da vazão volumétrica do ar na entrada do secador com o ventilador em 1500 rpm.

a) Cálculo da vazão volumétrica do ar na entrada do secador (Módulo A)

a1) Rotação do ventilador 850 rpm

-Velocidade média do ventilador

$$V_v = 3,3 \text{ m/s}$$

$$Dt = 0,4 \text{ m}$$

-Área da seção transversal do tubo

$$A_t = \frac{3,14 \times (0,04^2)}{4} = 0,1256 \text{ m}^2$$

-Vazão volumétrica do ar na entrada do ventilador

$$V_V = v \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times A \text{ (m}^2\text{)} = 3,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,1256 \text{ m}^2 = 0,414 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

a2) Rotação do ventilador a 1275 rpm

-Vazão volumétrica do ar na entrada do ventilador

$$V_V = v \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times A \text{ (m}^2\text{)} = 4,4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,1256 \text{ m}^2 = 0,553 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

a3) Rotação do ventilador a 1700 rpm

-Vazão volumétrica do ar na entrada do ventilador

$$V_V = v \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times A \text{ (m}^2\text{)} = 5,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,1256 \text{ m}^2 = 0,691 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

b) Cálculo da velocidade do ar sobre a esteira

-Comprimento da esteira $L = 2,08 \text{ m}$

-Largura da esteira $E = 0,405 \text{ m}$

Área da esteira $Ae = 2,08 \text{ m} \times 0,405 \text{ m} = 0,84 \text{ m}^2$

b1) Velocidade do ar no interior da câmara de secagem (850 rpm)

$$V_{ar} = \frac{0,414 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,84 \text{ m}^2} = 0,493 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

b2) Velocidade do ar no interior da câmara de secagem (1275 rpm)

$$V_{ar} = \frac{0,553 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,84 \text{ m}^2} = 0,658 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

b3) Velocidade do ar no interior da câmara de secagem (1700 rpm)

$$V_{ar} = \frac{0,691 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,84 \text{ m}^2} = 0,823 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

c) Cálculo da vazão volumétrica na saída do secador

-Altura da seção de saída $E_s = 0,065 \text{ m}$

-Comprimento da seção de saída $L_s = 0,44 \text{ m}$

Área da seção, $A_s = 0,065 \text{ m} \times 0,44 \text{ m} = 0,0286 \text{ m}^2$

c1) Vazão volumétrica de saída (módulo A, 850 rpm)

$$V_{vs1} = 0,0286 \text{ m}^2 \times 1,9 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0,054 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

c2) Vazão volumétrica de saída (módulo A 1275

$$V_{vs2} = 0,0286 \text{ m}^2 \times 2,6 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0,074 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} =$$

c3) Vazão volumétrica de saída (módulo A 1700 rpm)

$$V_{vs3} = 0,0286 \text{ m}^2 \times 2,7 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0,077 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} =$$

ANEXOS
Dados do consumo de energia do secador de grãos

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
116	04/28/17	14:39:00	1,02	24,91	0,17	0	219,11	0	34,56	1,81	0	2,38	0,03	0,03	0,03	0
115	04/28/17	14:40:00	1,02	24,91	0,17	0	219,08	0	34,31	2	0	2,63	0,47	0,47	0,47	0
114	04/28/17	14:41:00	1,02	24,85	0,17	0	218,59	0	34,31	1,88	0	2,5	0,47	0,47	0,47	0
113	04/28/17	14:42:00	1,02	50,86	0,45	0	214,32	0	34,31	2	0	2,16	0,47	0,47	0,48	0
112	04/28/17	14:43:00	1,02	50,65	0,45	0	214,4	0	34,56	2	0	2,16	0,84	0,84	0,84	0
111	04/28/17	14:44:00	1,02	50,53	0,45	0	214,65	0	33,41	1,91	0	2,09	0,73	0,73	0,74	0
110	04/28/17	14:45:00	1,02	50,68	0,45	0	214,37	0	34,56	2	0	2,16	0,61	0,61	0,61	0
109	04/28/17	14:46:00	1,01	24,87	0,17	0	218,76	0	34,31	1,97	0	2,5	0,72	0,72	0,73	0
108	04/28/17	14:47:00	1,01	50,82	0,45	0	214,34	0	34,56	2,03	0	2,22	0,65	0,65	0,65	0
107	04/28/17	14:48:00	1,01	24,82	0,16	0	218,32	0	34,31	1,97	0	2,5	0,69	0,69	0,69	0
106	04/28/17	14:49:00	1,01	24,81	0,16	0	218,16	0	34,31	1,97	0	2,5	0,64	0,64	0,64	0
105	04/28/17	14:50:00	1,02	50,44	0,44	0	213,98	0	34,31	2	0	2,19	0,65	0,65	0,65	0
104	04/28/17	14:51:00	1,01	33,29	0,27	0	217,28	0	33,81	2,06	0	2,22	0,61	0,61	0,61	0
103	04/28/17	14:52:00	1,01	50,19	0,44	0	214,04	0	34,81	2	0	2,16	0,85	0,85	0,85	0
102	04/28/17	14:53:00	1,01	50,17	0,44	0	213,86	0	34,31	2	0	2,16	0,89	0,89	0,9	0
101	04/28/17	14:54:00	1,05	50,29	0,44	0	214,09	0	31,19	2	0	2,09	0,91	0,91	0,91	0
100	04/28/17	14:55:00	1,04	50,49	0,44	0	213,99	0	30,72	2	0	2,09	0,84	0,84	0,84	0
99	04/28/17	14:56:00	1,04	50,23	0,44	0	213,74	0	31,94	2,06	0	2,13	0,9	0,9	0,9	0
98	04/28/17	14:57:00	1,04	50,33	0,44	0	214,29	0	30,91	1,94	0	2,13	0,93	0,93	0,93	0
97	04/28/17	14:58:00	1,04	50,29	0,44	0	214,11	0	30,91	1,94	0	2,06	0,93	0,93	0,93	0
96	04/28/17	14:59:00	1,04	50,35	0,44	0	214,39	0	30,91	1,94	0	2,03	0,93	0,93	0,93	0
95	04/28/17	15:00:00	1,04	50,35	0,44	0	214,38	0	30,91	1,94	0	2,03	0,93	0,93	0,93	0
94	04/28/17	15:01:00	1,04	50,33	0,44	0	214,32	0	30,91	2,03	0	2,13	0,93	0,93	0,93	0
93	04/28/17	15:02:00	1,04	50,32	0,44	0	214,23	0	31,69	1,91	0	1,97	0,93	0,93	0,93	0
92	04/28/17	15:03:00	1,04	50,36	0,45	0	214,27	0	31,69	2	0	2,06	0,91	0,91	0,92	0
91	04/28/17	15:04:00	1,04	50,25	0,44	0	213,94	0	30,91	2,03	0	2,06	0,93	0,93	0,93	0
90	04/28/17	15:05:00	1,01	50,01	0,44	0	214,24	0	34,56	1,91	0	2,09	0,92	0,92	0,93	0
89	04/28/17	15:06:00	0,95	50,03	0,44	0	214,15	0	39,59	1,94	0	1,88	0,85	0,85	0,85	0
88	04/28/17	15:07:00	0,94	24,76	0,17	0	218,68	0	43,81	1,97	0	2,19	0,73	0,73	0,73	0
87	04/28/17	15:36:00	0,94	24,8	0,17	0	218,61	0	39,31	1,97	0	2,19	0,21	0,21	0,22	0
86	04/28/17	15:37:00	0,97	24,78	0,16	0	218,52	0	41,88	1,81	0	2,09	0,58	0,58	0,58	0
85	04/28/17	15:38:00	0,97	24,9	0,17	0	219,57	0	41,88	1,94	0	2,28	0,56	0,56	0,57	0
84	04/28/17	15:39:00	0,98	50,95	0,45	0	215,41	0	41,88	5,38	0	5,38	0,57	0,57	0,57	0
83	04/28/17	15:40:00	0,97	24,91	0,17	0	219,59	0	41,88	6,44	0	6,5	0,55	0,55	0,55	0
82	04/28/17	15:41:00	0,98	50,81	0,45	0	214,57	0	41,88	1,91	0	1,91	0,49	0,49	0,49	0
81	04/28/17	15:42:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,19	0,19	0,19	0
80	04/28/17	15:43:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
79	04/28/17	15:44:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
78	04/28/17	15:45:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
77	04/28/17	15:46:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
76	04/28/17	15:47:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

75	04/28/17	15:48:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
74	04/28/17	15:49:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
73	04/28/17	15:50:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
72	04/28/17	15:51:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
71	04/28/17	15:52:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	04/28/17	15:53:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
69	04/28/17	15:54:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
68	04/28/17	15:55:00	12,07	50,2	11,56	224,13	214,53	224,95	3,66	2	1,78	2,09	0,67	0,67	0,67	0	0
67	04/28/17	15:56:00	53,54	50,78	30,54	218,48	217,62	222,44	2,44	1,97	1,84	3,91	2,28	2,28	2,29	0	0
66	04/28/17	15:57:00	53,15	25,14	11,6	216,88	221,14	224,22	2,41	1,94	1,72	2,81	2,11	2,11	2,11	0	0
65	04/28/17	15:58:00	53,46	51,15	30,46	218,25	217,47	222,35	2,38	1,94	1,88	3,94	2,19	2,19	2,19	0	0
64	04/28/17	15:59:00	53,28	51,04	20,18	217,54	217,3	224,63	2,47	2,03	1,84	3,94	2,21	2,21	2,21	0	0
63	04/28/17	16:00:00	53,32	25,24	30,55	217,7	221,91	221,38	2,41	4,78	1,84	10,38	2,02	2,02	2,02	0	0
62	04/28/17	16:01:00	53,17	25,06	11,57	217,05	220,27	224,02	2,47	1,72	1,72	2,88	2,08	2,08	2,08	0	0
61	04/28/17	16:02:00	1,01	24,71	11,52	0	217,76	222,7	32,78	8,66	9,22	10,06	1,78	1,78	1,78	0	0
60	04/28/17	16:03:00	1,04	50,64	30,57	0	214,21	220,48	48	1,94	1,84	2,19	1,01	1,01	1,02	0	0

59	04/28/17	16:04:00	1,04	24,73	11,55	0	217,78	223,25	48,19	1,78	1,78	2,75	1,35	1,35	1,35	0
58	04/28/17	16:05:00	1,04	50,37	11,49	0	214,38	224,51	47,47	2	1,84	2,22	1	1	1	0
57	04/28/17	16:06:00	1,04	24,98	30,62	0	220,29	219,54	48	2,09	1,84	2,5	1,1	1,1	1,11	0
56	04/28/17	16:07:00	1,04	50,62	11,51	0	215,49	225,14	48	2,13	1,75	2,44	1,05	1,05	1,05	0
55	04/28/17	16:08:00	1,04	50,77	11,45	0	215,55	223,9	48	2,25	1,78	2,47	1,09	1,09	1,09	0
54	04/28/17	16:09:00	1,04	24,93	11,52	0	219,6	222,7	48	2,09	1,75	3,03	1,13	1,13	1,14	0
53	04/28/17	16:10:00	1,04	50,46	30,18	0	215,28	220,59	48,19	1,94	1,75	2,19	1,14	1,14	1,14	0
52	04/28/17	16:11:00	1,04	24,84	11,55	0	218,77	223,36	48,19	1,94	1,72	2,94	1,16	1,16	1,16	0
51	04/28/17	16:12:00	1,04	50,41	11,5	0	214,59	224,9	48,19	2,06	1,78	2,41	1,04	1,04	1,04	0
50	04/28/17	16:13:00	1,04	24,87	30,44	0	219,21	220,29	47,09	2,09	1,97	2,53	0,98	0,98	0,98	0
49	04/28/17	16:14:00	1,03	50,69	30,58	0	214,81	222,19	47,09	1,97	1,97	2,31	1,03	1,03	1,04	0
48	04/28/17	16:15:00	1,03	24,98	30,48	0	220,15	220,46	48	2,09	1,97	2,63	1,12	1,12	1,12	0
47	04/28/17	16:16:00	1,04	24,97	11,57	0	219,92	223,6	47,84	2,09	1,75	3,16	1	1	1,01	0
46	04/28/17	16:17:00	1,04	25,11	11,52	0	219,84	222,72	48,19	1,97	1,78	3,03	1,1	1,1	1,1	0
45	04/28/17	16:18:00	1,04	32,16	30,16	0	219,52	219,53	47,09	2,06	1,78	2,38	1,09	1,09	1,1	0
44	04/28/17	16:19:00	1,04	24,88	30,23	0	219,2	220,09	47,28	1,94	1,84	2,47	1,08	1,08	1,08	0
43	04/28/17	16:20:00	1,04	50,29	11,55	0	213,91	225,91	48,38	1,91	1,78	2,25	1,18	1,18	1,19	0
42	04/28/17	16:21:00	1,04	50,73	30,46	0	214,77	222,65	47,28	1,94	2	2,16	1,03	1,03	1,03	0
41	04/28/17	16:22:00	1,04	50,44	11,54	0	214,17	225,58	48,19	1,91	1,81	2,19	1,1	1,1	1,1	0
40	04/28/17	16:23:00	1,03	51	11,51	0	215,53	225,05	47,28	2,03	1,75	2,41	1,05	1,05	1,05	0
39	04/28/17	16:24:00	1,03	50,72	30,23	0	216,3	220,97	47,09	1,97	1,63	2,34	1,16	1,16	1,17	0
38	04/28/17	16:25:00	1,04	24,99	30,52	0	220,09	219,97	47,28	1,94	1,63	2,59	1,06	1,06	1,07	0
37	04/28/17	16:26:00	1,04	24,94	11,57	0	219,55	223,59	43,06	1,94	1,69	3,06	0,81	0,81	0,82	0
36	04/28/17	16:27:00	1,04	24,81	11,64	0	218,23	224,9	43,06	1,84	1,78	3	0,69	0,69	0,7	0
35	04/28/17	16:28:00	1,04	24,86	11,59	0	218,73	224,1	47,09	1,78	1,72	2,97	0,69	0,69	0,69	0
34	04/28/17	16:29:00	1,04	24,87	11,6	0	218,73	224,14	47,28	1,78	1,72	2,97	0,69	0,69	0,69	0
33	04/28/17	16:30:00	1,04	24,98	11,6	0	219,78	224,08	47,28	1,97	1,75	3,03	0,69	0,69	0,69	0
32	04/28/17	16:31:00	1,04	24,96	11,62	0	219,53	224,5	43,28	1,97	2,09	3,03	0,7	0,7	0,7	0
31	04/28/17	16:32:00	1,04	24,96	11,64	0	219,56	224,87	47,09	2	2,09	3,22	0,7	0,7	0,7	0
30	04/28/17	16:33:00	1,03	24,85	11,6	0	218,6	224,09	47,09	1,78	1,75	3,06	0,69	0,69	0,7	0
29	04/28/17	16:34:00	1,04	25	11,56	0	219,91	223,2	47,09	1,94	1,75	3,16	0,69	0,69	0,69	0
28	04/28/17	16:35:00	1,04	24,99	11,56	0	219,81	223,18	44,25	1,94	1,75	3,03	0,69	0,69	0,7	0
27	04/28/17	16:36:00	1,04	25,01	11,61	0	219,95	224,31	47,28	1,97	1,72	3,03	0,7	0,7	0,7	0
26	04/28/17	16:37:00	1,04	25,02	11,65	0	220,03	224,93	43,28	1,97	1,75	3,03	0,7	0,7	0,7	0
25	04/28/17	16:38:00	1,04	25,01	11,64	0	219,93	224,75	47,09	1,94	1,75	3,03	0,7	0,7	0,7	0
24	04/28/17	16:39:00	1,04	25,03	11,6	0	220,08	224,09	43,06	1,94	1,72	3,03	0,7	0,7	0,7	0
23	04/28/17	16:40:00	1,04	25,04	11,58	0	220,22	223,47	46,91	1,94	1,72	3,03	0,7	0,7	0,7	0
22	04/28/17	16:41:00	1,04	25,09	11,57	0	220,62	223,49	43,06	1,75	1,44	3,03	0,7	0,7	0,7	0
21	04/28/17	16:42:00	1,04	25,07	11,63	0	220,43	224,51	42,88	1,91	1,72	3,03	0,7	0,7	0,7	0

20	04/28/17	16:43:00	1,04	25,07	11,66	0	220,44	225,12	43,06	1,91	1,72	3,03	0,7	0,7	0,7	0
19	04/28/17	16:44:00	1,04	25,09	11,66	0	220,55	225,13	43,28	1,91	1,72	3,03	0,7	0,7	0,7	0
18	04/28/17	16:45:00	1,04	25,09	11,66	0	220,56	225,22	47,28	1,91	1,72	3,03	0,7	0,7	0,7	0
17	04/28/17	16:46:00	1,04	25,1	11,6	0	220,71	223,86	47,09	1,91	1,72	3,03	0,7	0,7	0,7	0
16	04/28/17	16:47:00	1,04	25,1	11,59	0	220,72	223,78	44,06	2,03	1,75	3,16	0,7	0,7	0,7	0
15	04/28/17	16:48:00	1,04	25,09	11,58	0	220,59	223,56	47,09	1,88	1,72	3,03	0,7	0,7	0,7	0
14	04/28/17	16:49:00	1,04	25,07	11,66	0	220,38	225,1	47,09	1,91	1,72	3,03	0,7	0,7	0,7	0
13	04/28/17	16:50:00	1,04	25,06	11,64	0	220,28	224,89	43,28	1,97	1,72	3,03	0,7	0,7	0,7	0
12	04/28/17	16:51:00	1,04	25,07	11,65	0	220,46	224,98	47,09	1,94	1,75	3,03	0,7	0,7	0,7	0
11	04/28/17	16:52:00	1,04	25,07	11,62	0	220,44	224,41	48,38	1,91	1,69	3,03	0,7	0,7	0,7	0
10	04/28/17	16:53:00	1,03	25,06	11,58	0	220,3	223,55	47,09	1,97	1,72	3,03	0,7	0,7	0,7	0
9	04/28/17	16:54:00	1,04	25,07	11,54	0	220,42	222,72	43,28	1,88	1,75	3,16	0,7	0,7	0,7	0
8	04/28/17	16:55:00	1,03	25,07	11,54	0	220,42	222,68	44,06	1,97	1,72	3,13	0,7	0,7	0,7	0
7	04/28/17	16:56:00	1,04	25,07	11,52	0	220,39	222,36	48	1,97	1,75	3,09	0,7	0,7	0,7	0
6	04/28/17	16:57:00	1,04	25,09	11,57	0	220,53	223,36	44,06	1,91	1,72	3,06	0,84	0,84	0,84	0
5	04/28/17	16:58:00	1,03	25,08	11,54	0	220,5	222,81	48,19	1,81	1,75	2,97	0,96	0,96	0,96	0
4	04/28/17	16:59:00	1,04	25,02	11,54	0	219,99	222,88	46,91	2	1,78	3,06	0,83	0,83	0,83	0
3	04/28/17	17:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,31	0,31	0,31	0
2	04/28/17	17:01:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	05/09/2017	16:28:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0