



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

HELLEN CARVALHO BARROS

**PROCESSO DE SECAGEM DE *Morinda citrifolia* L. EM SECADOR DE
RADIÇÃO COM LÂMPADAS REFLETORAS, UTILIZANDO PLANEJAMENTO
COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL**

BELÉM-PA

2015

HELLEN CARVALHO BARROS

**PROCESSO DE SECAGEM DE *Morinda citrifolia* L. EM SECADOR DE
RADIAÇÃO COM LÂMPADAS REFLETORAS, UTILIZANDO PLANEJAMENTO
COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Desenvolvimento de Processos

**ORIENTADORES: Prof. Dr. Lênio José Guerreiro de Faria
Prof. Dr. Davi do Socorro Barros Brasil**

BELÉM-PA

2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Barros, Hellen Carvalho, 1983-

Processo de secagem de morinda citrifolia l. em secador de radiação com lâmpadas refletoras,utilizando planejamento composto central rotacional / Hellen Carvalho Barros. - 2015.

Orientador: Lênio José Guerreiro de Faria;
Coorientador: Davi do Socorro Barros

Brasil.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Belém, 2015.

1. Secagem. 2. Radiação. 3. Noni (planta)-secagem. I. Título.

CDD 22. ed. 660.28426

HELLEN CARVALHO BARROS

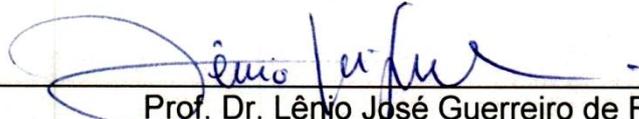
PROCESSO DE SECAGEM DE *Morinda citrifolia* L. EM SECADOR DE
RADIÇÃO COM LÂMPADAS REFLETORAS, UTILIZANDO PLANEJAMENTO
COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Desenvolvimento de Processos

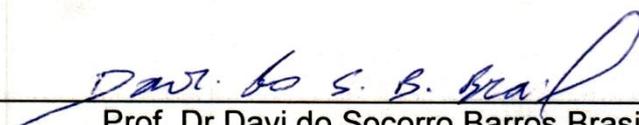
DATA DA AVALIAÇÃO: 16/10/2015

CONCEITO: Aprovada

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Lênio José Guerreiro de Faria
(PPGEQ – ITEC – UFPA – Orientador)



Prof. Dr. Davi do Socorro Barros Brasil
(PPGEQ – ITEC – UFPA – Coorientador)



Profa. Dra. Cristiane Maria Leal Costa
(PPGEQ – ITEC – UFPA – Membro)



Prof. Dr. Fernando Sergio Escócio Drumont Viana de Faria
(UFAC-AC- Membro externo)



Profa. Dra. Lorena Gomes Corumbá
(PPGEQ-PNPD-UFPA- Membro)

Ao meu pai, **Eurico do Pilar Barros**,
o meu maior incentivador e meu
melhor amigo.

AGRADECIMENTOS

A **DEUS**, pela sua bondade e misericórdia, em permitir-me chegar até aqui e ter saúde para concluir esta jornada

Ao Professor Doutor **Lênio José Guerreiro de Faria**, por sua orientação e confiança para tornar possível a realização deste trabalho, pelas lições e conhecimentos compartilhados, pela sua trajetória profissional exemplar e pelo privilégio de estar sob sua orientação;

Ao Professor Doutor **Davi do Socorro Barros Brasil**, pela co-orientação, paciência, confiança durante a realização deste sonho;

Aos meus pais: **Eurico do Pilar Barrose Diana de Jesus Carvalho Barros**, responsáveis pela minha criação e educação e que muito contribuíram para minha formação pessoal e acadêmica;

Aos meus amigos: **Tatiane Damasceno, Jully Hellen dos Santos Carvalho, Dilson cardoso, Halene Moraes, Selma Melo e Juliane Silva** por toda força e incentivo nas disciplinas do mestrado.

As amigas de laboratório: **Elza Brandão, Maria Valente, Elisângela Andrade, Carolina Cruz Silva, Daniela Santana, Lorena Corumbá, Rosilene Costa e Érica Souza**, pelo apoio, companheirismo, preocupação e confiança durante a realização deste trabalho.

Ao programa de pós graduação em engenharia Química (PPGEQ), pela oportunidade.

Ao CNPq pela concessão da bolsa.

A Universidade Federal do Pará.

Enfim, a todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, agradeço humildemente.

Existe apenas um bem, o
saber e apenas um mal, a
ignorância.

Sócrates

RESUMO

Morinda citrifolia Linn, conhecida popularmente como Noni, é uma planta da família Rubiaceae, usada por muitos séculos na medicina popular. A descoberta da planta se deu pelos ancestrais dos polinésios e tem sido largamente reportada por suas propriedades terapêuticas e nutricionais. Por esse motivo, resolveu-se realizar pesquisa com os frutos da espécie *Morinda citrifolia* L., Observar as propriedades do produto seco para o consumo na dieta alimentar, bem como, comprovar o potencial funcional pós-secagem. Neste trabalho foi realizado o estudo da secagem dos frutos de Noni, avaliação e quantificação dos compostos fenólicos e atividade antioxidante dos extratos obtidos. No processo de secagem, foi utilizado um secador com lâmpadas refletoras em escala laboratorial. Na análise do processo tomou-se por base o modelo estatístico, quantificando-se os efeitos das variáveis de entrada nas Respostas, por meio das análises de regressão através do planejamento composto central rotacional (PCCR) com duas variáveis de entrada, e cinco níveis. Empregando-se temperatura, e tamanho das polpas como variáveis de entrada e Teor de umidade final, capacidade antioxidante e teor de fenólicos totais como resposta. Observou-se que o aumento da temperatura de secagem, causou um decréscimo no teor de umidade final nos frutos de *Morinda citrifolia* L. A faixa de conteúdo de umidade final variou de 0,01 a 3,50 kg de água/kg de sólido seco e 1,32% a 38,8%, em base úmida. Os valores médios de compostos fenólicos totais variaram de 12,54 a 26,56 mgEAG/g, e capacidade Antioxidante foi de 23,12 a 77,86mg de Trolóx /g de amostra, dentro do domínio experimental. Somente variável de entrada isolada X_1 (temperatura) na forma linear e quadrática, foi estatisticamente influente sobre a variável de resposta X_{bs} .

Palavras-chave: Secagem por radiação , *Morinda citrifolia* L., Otimização

ABSTRACT

Morinda citrifolia Linn, popularly known as Noni, is a plant in the Rubiaceae, family that has been used for many centuries in popular medicine. The ancestors of the Polynesians discovered the plant and there have been numerous reports of its therapeutic and nutritional properties. For that reason, it was decided to carry out a study with the fruits of the species *Morinda citrifolia* L., in order to encourage use of the fruit for consumption in people's diet, as well as to confirm its functional potential after drying. In this research, the conditions for drying Noni fruits were studied, and the phenolic compounds and antioxidant activity of the extracts obtained were assessed and quantified. In the drying process a dryer with reflecting lamps was used at the laboratory scale. In analyzing the process a statistical model was used as a basis, to quantify the effects of the entry variables in the Responses, by means of regression analyses through rotational central compound planning (PCCR) with two entry variables and five levels, employing temperature and size of the pulp as entry variables and final humidity level, antioxidant capacity and free radical sequestration activity as responses. It was observed that increasing the drying temperature led to a decrease in the final humidity level of *Morinda citrifolia* L fruits.

The values of the responses observed varied from 0,01 a 3,50 bs, for drying; 1,32% a 38,8%, and 12,54 to 26,56(mg Eag/g) for phenolic levels. Within the experimental domain, only the variable of the isolated entry X_1 (temperature) in the linear and quadratic forms were statistically influential on the X_{bs} response variable.

Keywords: Drying radiation, *Morinda citrifolia* L., optimization

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Desenho 1: Ilustração da Atividade Antioxidante no combate aos Radicais livres...	32
Desenho 2: Redirecionamento da luz proporcionado por lâmpadas refletoras	45
Desenho 3: Desenho esquemático do secador	60
Esquema1: Modelo geral de um processo de transformação	47
Estrutura 1 e 2: Isoscopoletina e Quercetina	31
Estrutura 3 e 4: Narcissosideo e americanina A	31
Estrutura 5: Reação do ácido gálico com molibdênio, componente do reagente de Folin-Ciocalteu	33
Fluxograma 1: Sequência de experimentos para secagem de <i>Morinda citrifolia</i> L. ..	66
Fotografia 1: Fotografia 1(a) e (b): Fases de maturação do fruto	26
Fotografia 2: Árvore de Noni Embrapa-PA	27
Fotografia 3: Curva de calibração para dosagem de fenólicos totais	34
Fotografia 4: Amostra de Noni, em estágio ótimo de secagem	56
Fotografia 5: Características do secador	59
Gráfico 1: Curva típica de secagem	40
Gráfico 2: Curva típica de secagem (X versus W)	40
Gráfico 3: Curva Padrão de Ácido Gálico	72
Gráfico 4: Curva Padrão de Trolox.....	73
Gráfico5: Representação gráfica da % SRL dos diferentes extratos do fruto do Noni (<i>Morinda citrifolia</i> L.)	75
Gráfico 6: Gráfico de barras dos efeitos individuais e combinados para X_{bs}	80
Gráfico 7: Distribuição de resíduos para X_{bs}	83
Gráfico 8: Distribuição de resíduos para X_{bs}	83

Gráfico 9. Teste de probabilidade normal dos resíduos para X_{bs}	84
Gráfico 10: Superfície de resposta para umidade final X_{bs} em função de X_1 e X_2	85
Gráfico11: Curvas de nível para X_{bs} em função de X_1 e X_2	85
Gráfico12: Função de Desejabilidade para as respostas X_{bs} , TF e AA.....	89
Gráfico 13: Curva de Secagem em função do tempo(corrída 1)	101
Gráfico 14: Curva de Fluxo de Secagem-Wxt (corrída 1).....	101
Gráfico 15: Curva de secagem em função do tempo (corrída 2).....	103
Gráfico 16: Curva de Fluxo secagem em função do tempo (corrída 2)	103
Gráfico 17: Curva de secagem em função do tempo (corrída 3).....	105
Gráfico 18: Curva de Fluxo secagem em função do tempo (Corrída 3)	105
Gráfico 19: Curva de secagem em função do tempo (corrída 4).....	107
Gráfico 20: Curva de Fluxo secagem em função do tempo (Corrída 4)	107
Gráfico 21: Curva de secagem em função do tempo (corrída 5).....	109
Gráfico 22: Curva de Fluxo secagem em função do tempo (Corrída 5)	109
Gráfico 23: Curva de secagem em função do tempo(corrída 6).....	111
Gráfico 24: Curva de Fluxo secagem em função do tempo (Corrída 6)	111
Gráfico 25: Curva de secagem em função do tempo (corrída 7).....	113
Gráfico 26: Curva de Fluxo secagem em função do tempo (Corrída 7)	113
Gráfico 27: Curva de secagem em função do tempo (corrída 8).....	115
Gráfico 28: Curva de Fluxo secagem em função do tempo (Corrída 8)	115
Gráfico 29: Curva de secagem em função do tempo (corrída 9).....	117
Gráfico 30: Curva de fluxo de secagem em função do tempo (corrída 9)	117
Gráfico 31: Curva de secagem em função do tempo (corrída10).....	119

Gráfico 32: Curva de fluxo de secagem (corrida 10).....	119
Gráfico 33: Curva de secagem em função do tempo (corrida 11).....	121
Gráfico 34: Curva de fluxo de secagem em função do tempo (corrida 11)	121
Gráfico 35: Curva de secagem em função do tempo(Corrida 12)	122
Gráfico 36: Curva de fluxo de secagem em função do tempo (Corrida 12)	122
Gráfico 37: Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para (corrida 1)	124
Gráfico 38: Ajuste dos dos dados de secagem ao modelo Não-linear para (corrida 1) ao modelo de Henderson e Pabis(1961).....	124
Gráfico 39: Gráfico de valores preditos versus residuais para corrida1	124
Gráfico 40: Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para (corrida 2)	125
Gráfico 41: Ajuste dos dos dados de secagem (Não-linear) para corrida 2 ao modelo de Midilli et al (2002)	125
Gráfico 42: Gráfico de valores preditos versus residuais para corrida 2	125
Gráfico 43: Ajuste dos dados de secagem ao modelo linearpara corrida 3	126
Gráfico 44: Gráfico de valores preditos versus residuais para corrida 3	126
Gráfico 45: Ajuste dos dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 4....	127
Gráfico 46: Gráfico de valores preditos versus residuais para corrida 4	127
Gráfico 47: Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 5	128
Gráfico 48: Gráfico de valores preditos versus residuais para corrida 5	128
Gráfico 49 Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 6	129
Gráfico 50: Ajuste dos dos dados de secagem ao modelo (Não-linear) para corrida 6 ao modelo de Henderson e Pabis(1961).....	129
Gráfico 51: Gráfico de valores preditos versus residuais para corrida 6	129
Gráfico 52: Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 7	130

Gráfico 53: Ajuste dos dados de secagem ao modelo (Não-linear) para corrida 7 ao modelo de Midilli et al. (2002).....	130
Gráfico 54: Gráfico de valores preditos versus residuais para corrida 7	130
Gráfico 55: Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 8	131
Gráfico 56: Ajuste dos dados ao modelo não linear de Midilli et al. (2002), para corrida 8	131
Gráfico 57: Gráfico de valores preditos versus residuais para corrida 8.....	131
Gráfico 58: Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 9	132
Gráfico 59: Ajuste dos dados de secagem modelo (Não-linear) para corrida 9 ao modelo de Henderson e Pabis(1961).....	132
Gráfico 60: Gráfico de valores preditos versus residuais para corrida 9	132
Gráfico 61: Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 10	133
Gráfico 62: Ajuste dos dados de secagem ao modelo (Não-linear) modelo de Midilli et al. (2002).	133
Gráfico 63 Gráfico de valores preditos versus residuais para corrida 10	133
Gráfico 64: Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 11	134
Gráfico 65: Gráfico de valores preditos versus residuais para corrida 11	134
Gráfico 66: Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 12	135
Gráfico 67: Gráfico de valores preditos versus residuais para corrida 12.....	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Nomes populares de <i>Morinda citrifolia</i> L.	25
Tabela 2: Evolução da cor e textura ao longo dos estádios de amadurecimento da fruta	25
Tabela 3: Características químicas e físico-químicas da polpa do Noni	29
Tabela 4: Matriz de planejamento do experimento fatorial 2^3	49
Tabela 5: Matriz de planejamento com adição de ensaios no ponto central	50
Tabela 6: Escala de valores de desejabilidade individuais ou global.....	55
Tabela 7: Variáveis operacionais de entrada e seus respectivos níveis.....	58
Tabela 8: Matriz de experimentos da metodologia do planejamento composto centralrotacional na ordem padronizada	59
Tabela 9: Grandezas luminotécnicas Fundamentais	62
Tabela 10: Modelos matemáticos utilizados para avaliar a cinética de secagem de <i>Morinda citrifolia</i> L	64
Tabela 11: Parâmetros Fotométricos(grandezas luminosas) e Quantidade de Calor Produzidos pelo Secador de lâmpadas Refletores.....	76
Tabela 12: Matriz de planejamento do PCCR com suas respostas	78
Tabela 13: Análise de variância para a variável de resposta X_{bs}	79
Tabela 14: Coeficientes de regressão para a Resposta X_r	81
Tabela 15: Coeficientes de regressão para a resposta X_{bs}	82
Tabela 16: Análise de variância para a resposta atividade antioxidante – AA.....	86
Tabela 17: ANOVA para a resposta teor de fenólicos – TF	88
Tabela 18: Parâmetros para a otimização das respostas do processo de secagem	87
Tabela 19: Dados da cinética de secagem de <i>Morinda citrifolia</i> L (corrida 1).....	100

Tabela 20: Dados da cinética de secagem de <i>Morinda citrifolia</i> L.(corrida2).....	102
Tabela 21: Dados da cinética de secagem de <i>Morinda citrifolia</i> L.(corrida 3).....	104
Tabela 22: Dados da cinética de secagem de <i>Morinda citrifolia</i> L.(corrida 4).....	106
Tabela 23: Dados da cinética de secagem de <i>Morinda citrifolia</i> L.(corrida 5).....	108
Tabela 24: Dados da cinética de secagem de <i>Morinda citrifolia</i> L.(corrida 6).....	110
Tabela 25: Dados da cinética de secagem de <i>Morinda citrifolia</i> L.(corrida 7).....	112
Tabela 26: Dados da cinética de secagem de <i>Morinda citrifolia</i> L.(corrida 8).....	114
Tabela 27: Dados da cinética de secagem de <i>Morinda citrifolia</i> L.(corrida 9).....	116
Tabela 28: Dados da cinética de secagem de <i>Morinda citrifolia</i> L.(corrida 10).....	118
Tabela 29: Dados da cinética de secagem de <i>Morinda citrifolia</i> L.(corrida 11).....	120
Tabela 30: Dados da cinética de secagem de <i>Morinda citrifolia</i> L.(corrida 12).....	122
Tabela 31: Qualidade dos modelos cinéticos para a corrida 1	124
Tabela 32: Qualidade dos modelos cinéticos para a corrida 2	125
Tabela 33: Qualidade dos modelos cinéticos para a corrida 3	126
Tabela 34: Qualidade dos modelos cinéticos para a corrida 4	127
Tabela 35: Qualidade dos modelos cinéticos para a corrida 5	128
Tabela 36: Qualidade dos modelos cinéticos para a corrida 6	129
Tabela 37: Qualidade dos modelos cinéticos para a corrida 7	130
Tabela 38: Qualidade dos modelos cinéticos para a corrida 8	131
Tabela 39: Qualidade dos modelos cinéticos para a corrida 9	132
Tabela 40: Qualidade dos modelos cinéticos para a corrida 10	133
Tabela 41: Qualidade dos modelos cinéticos para a corrida 11	134
Tabela 42: Qualidade dos modelos cinéticos para a corrida 12	135

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.

A	Área exposta à secagem
AA	Atividade Antioxidante
A,b,c,d	Constante dos modelos cinéticos de secagem
Abs	Absorbância
Ag	Ácido Gálico
ANOVA	Análise de variância
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
b_k	Coefficientes de regressão
C_0	Número de pontos centrais
Cd	Candela
D	Desejabilidade Global
d_i	Metade da diferença dos valores dos níveis altos e baixos z_i
Dx/dt	Variação da umidade com o tempo
E	Espessura
EAG	Equivalente de ácido gálico
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
F	Estatística de Fischer
FEQ	Faculdade de engenharia Química
f_k	Função de variáveis
GL	Grau de liberdade
H_0	Hipótese nula
K	Número de variáveis
L	Linear
LEPRON	Laboratório de Engenharia de Produtos Naturais
Lm	Lúmen
Ma	Massa da amostra
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
Mss	Massa de sólido seco

N	Número de experimentos
n_c	Número de repetições de repetições no ponto central
n_f	Números de ensaios do planejamento fatorial
OMS	Organização mundial de saúde
P	Probabilidade de significância
PCCR	Planejamento Composto Central Rotacional
PPEQ	Programa de Pós Graduação em Engenharia Química
Q	Quadrática
®	Marca registrada
RCF	Reagente de Folin-Ciocalteu
SQ	Soma quadrática
SRL	Percentual de sequestro de radicais livres
T	Tempo
TEAC	Atividade Antioxidante Total Equivalente ao Trolox
TF	Teor de fenólicos
UFPA	Universidade Federal do Pará
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
W	Fluxo de secagem
W_r	Fluxo de secagem adimensional
X_r	Teor de umidade adimensional
X_1	Variável codificada temperatura do secador
X_2	Variável codificada espessura das amostras
X_{bs}	Teor de umidade em base seca
X_{bu}	X_{bu} - é o teor de umidade em base úmida

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	20
INTRODUÇÃO	20
1.1 Noni: aspectos gerais	20
1.2 Objetivos	21
1.2.1 Objetivo geral	21
1.2.2 Objetivos específicos.....	22
CAPÍTULO 2	23
REVISÃO DE LITERATURA	23
2.1 Histórico da planta	23
2.1.1 Descrição botânica	24
2.2 Distribuição geográfica	27
2.2.1 Constituição química	28
2.2.2 Atividade antioxidante	30
2.2.3 Espécies Reativas do oxigênio e radicais livres	32
2.2.4 Compostos fenólicos totais.....	33
2.4 Trabalhos realizados com <i>Morinda citrifolia</i> L.	34
2.5 Considerações sobre a secagem	36
2.5.1 Cinética de secagem	39
2.5.2 Secagem por radiação	42
2.5.3 Lâmpadas incandescentes refletoras (espelhadas)	44
2.5.4 Principais Grandezas Fotométricas.....	45
2.5.5 Planejamento e otimização experimental	46
2.5.6 Planejamento fatorial dois níveis 2 ^k	48
2.5.7 Planejamento fatorial com pontos centrais.....	50
2.5.8 Metodologia da superfície de resposta (MSR)	50

2.5.9 Função desejabilidade global	52
CAPÍTULO 3	55
METODOLOGIA	55
3.1 Coleta e preparo das amostras (frutos).....	55
3.2 Planejamento e otimização experimental.....	55
3.2.1 Variáveis Operacionais de Entrada e Respostas	56
3.2.2 Planejamento Fatorial Composto Central Rotacional.....	56
3.3 Processo de secagem por radiação com lâmpadas refletoras	58
3.3.1 Descrição do Secador	58
3.3.2 Intensidade Luminosa e quantidade de calor fornecida pelo secador	60
3.3.3 Obtenção das Curvas de Secagem.....	61
3.4 Determinação de compostos fenólicos totais e capacidade antioxidante...65	
3.4.1 Preparação dos Extratos	65
3.4.2 Determinação dos compostos Fenólicos Totais (Método do Folin Ciocauteu) .66	
3.4.3 Determinação da atividade antioxidante (método de captura de radicais DPPH•).....	66
CAPÍTULO 4	68
RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.1 Análise da cinética de secagem.....	68
4.1.1 Curvas de Secagem	69
4.1.2 Curvas de Taxas de Secagem	70
4.2 Resultado da determinação do teor de fenólicos e da capacidade antioxidante	70
4.2.1 Determinação de Fenólicos Totais	71
4.2.2 Determinação da Capacidade Antioxidante	72
4.2.3 Sequestro do Radical Livre (%SRL).....	74
4.3 Determinação dos parâmetros fotométricos necessários para o funcionamento do secador.....	75

4.4 Planejamento experimental do processo de secagem	76
4.4.1 Planejamento experimental do processo de secagem	76
4.4.2 Resultados para a variável de resposta teor de umidade final - X_{bs}	77
4.4.2 Resultados para a variável de resposta capacidade antioxidante - AA	85
4.4.3 Resultados para a variável de resposta teor de fenólicos - TF	86
4.5 Estimativa da condição ótima do processo de secagem	86
CONCLUSÕES E SUGESTÕES	89
5.1 Conclusões	89
5.2 Sugestões	90
REFERÊNCIAS	91
APÊNDICES	98

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Noni: aspectos gerais

Existem registros da utilização de plantas medicinais pelo homem desde a Antiguidade para o tratamento de doenças. Nas últimas décadas, houve a revalorização do emprego de preparações fitoterápicas uma vez que os medicamentos sintéticos, em sua maioria, apresentam efeitos colaterais indesejáveis (NEVES, 2012).

O uso das plantas medicinais permanece como forma alternativa de tratamento em várias partes do mundo. De acordo com a WHO (*World Health Organization*), devido à pobreza e o escasso acesso à medicina moderna, cerca de, 65 a 80% da população mundial dependem essencialmente das plantas como forma primária de cuidar da saúde. Em quase todos os sistemas tradicionais da medicina, as plantas medicinais desempenham um papel importante (KRISHNAIAH et al., 2013).

Morinda citrifolia L., conhecida popularmente como Noni, é uma planta da família Rubiaceae, usada por muitos séculos na medicina popular dos povos da Polinésia. (CHAN-BLANCO et al., 2006).

A planta tem origem no sudeste da Ásia, e posteriormente foi distribuída através de vários colonizadores pelas ilhas do Pacífico. Os animais e o próprio oceano contribuíram para a difusão da planta pelas ilhas (McCLATCHEY, 2002). Na Polinésia, todas as partes da planta, casca, raiz, folhas e, principalmente a fruta, são usadas como ervas medicinais há mais de 2000 anos (BUI et al., 2006).

Na planta existem em mais de 40 combinações já registradas de remédios herbais. Em particular, o suco do Noni, tem grande demanda na medicina alternativa para o tratamento de diversas doenças como artrite, diabetes, hipertensão sanguínea, dores musculares, doenças cardíacas, cânceres, úlceras gástricas e arteriosclerose (KAMIYA et al., 2010).

O seu cultivo e consumo tem se expandido rapidamente em todas as regiões brasileiras não apenas por ser uma rica fonte de nutrientes, mas principalmente

devido às propriedades fitoterápicas a ele atribuídas e à sua facilidade de adaptação. O Noni é cultivado nos mais variados tipos de solos e sobrevive em *habitats* severos, caracterizados por terrenos rochosos, arenosos, solos costeiros e vulcânicos. Apesar de tolerar a saturação dos solos, cresce e produz mais adequadamente em solos bem drenados evidenciando que se adapta em solos ácidos e alcalinos (SILVA, 2010).

As frutas e as folhas tem um histórico de uso tanto para a alimentação como para promover a saúde. As raízes e cascas têm sido utilizadas como um corante para roupas; Estudos têm caracterizado os vários produtos naturais com o intuito de identificar e quantificar os componentes bioativos destes vegetais a fim de utilizá-los na alimentação da população e, com isso, reduzir o risco de surgimento de doenças (NEVES, 2012).

Por esse motivo, resolveu-se realizar pesquisa com os frutos da espécie *Morinda citrifolia* L., a fim de estudar produto seco para o consumo na dieta alimentar, bem como, comprovar o potencial funcional pós-secagem.

Este trabalho tem como base, a secagem do Noni em secador por radiação de lâmpadas incandescentes refletoras, bem como, a verificação das propriedades físico-químicas pós-secagem, tais como: teor de umidade final, atividade antioxidante e compostos fenólicos totais.

A metodologia utilizada para realizar os ensaios baseia-se na construção de uma matriz de variáveis de entrada e respostas, com base na técnica de planejamento estatístico de experimentos. As análises, ou corridas, foram realizadas de forma aleatória, a fim de evitar erros de tendência.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

- Estudar o processo de secagem dos frutos de Noni, em secador por radiação, a partir de experimentos estatisticamente planejados.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar o comportamento da secagem dos frutos do Noni, verificando a influência das variáveis de entrada, temperatura e espessura das amostras durante o processo de secagem;
- Quantificar as influências sofridas nas respostas especificadas durante o processo de secagem, em função das variáveis operacionais de entrada, estatisticamente significativas;
- Por meio da análise dos dados experimentais obtidos na secagem, propor um modelo que represente a cinética de secagem do Noni em secador de radiação por lâmpadas refletoras.
- A partir da Metodologia de Superfícies de Resposta, propor as condições ótimas do processo de secagem do Noni em secador de radiação, em função das variáveis significativas para as respostas: teor de umidade final; teor de fenólicos totais; e atividade antioxidante.
- Quantificar a influência do tipo de solvente na obtenção o extrato de Noni, no teor de fenólicos e percentual do sequestro de radicais livres.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Histórico da planta

Os povos polinésios já usavam o Noni como planta medicinal há mais de 2000 anos e atualmente ainda é utilizada na medicina tradicional para diversas enfermidades. O Noni ou *Morinda citrifolia* Linn é uma planta que teve sua origem na região do sudeste da Ásia e, posteriormente, foi distribuída por vários viajantes colonizadores das ilhas do pacífico (BASAR *et al.*, 2010; YANG *et al.*, 2010).

As plantas do gênero *Morinda*, estão distribuídas nas zonas tropicais do mundo. A origem da espécie da espécie *Morinda citrifolia* L., pode ser encontrada desde a Índia até o Norte da Austrália. No Caribe e ao longo da costa da América central. Seu cultivo ocorre na Polinésia, Índia, Caribe, regiões centro e norte da América do Sul, locais que oferecem condições adequadas desenvolvimento (NEVES, 2012).

O Noni é uma planta pantropical e cresce muito em todo pacífico, é uma das mais significativas fontes tradicionais de medicamentos entre as sociedades das ilhas do pacífico. Possui uma gama de ambientes toleráveis em solos inférteis, ácidos, e alcalinos e cresce naturalmente em ambientes muito secos e locais méxicos (ambientes com dupla estacionalidade climática) ou nas florestas das ilhas do pacífico, o extenso intervalo de tolerância ambiental também inclui exposição ao vento, inundações, vulcões e as condições salinas.

Rubiaceae é a quarta maior família botânica entre as angiospermas e possui distribuição cosmopolita com 550 gêneros e 9000 espécies, dessas, 2000 são encontradas no Brasil. A maior parte das rubiáceas é própria de regiões quentes, principalmente os trópicos. A família é conhecida devido a sua importância econômica do café (*Coffea arábica*), e terapêutica do Noni (*Morinda citrifolia*), sendo amplamente utilizada na medicina popular e na fabricação de fitofármacos (OLIVEIRA, 2009).

Nesse contexto, as frutas exóticas, como o Noni têm ganhado cada vez mais espaço, tanto pela busca de benefícios que estas possam oferecer, como pela procura por diferentes tipos de fontes alimentares.

No Japão, o suco da fruta e o chá das folhas de *Morinda citrifolia* L. foram lançados no mercado de alimentos funcionais e são ingeridos na expectativa de que eles possam ajudar a prevenir doenças. Por volta de 1996, houve advento do suco de Noni (TAHITIAN NONI[®] JUICE), devido a sua grande procura da população, o que culminou no aumento das pesquisas acerca dos possíveis efeitos que esse material poderia promover com relação aos seus benefícios à saúde. Nos Estados Unidos os produtos da fruta de *Morinda citrifolia* L. são comercializados desde 1990, sendo principalmente vendidos em lojas de produtos naturais, internet e outros (NEVES, 2012).

2.1.1 Descrição botânica

A classificação botânica do Noni *Morinda citrifolia* L., segundo MÜLLER (2007) pode ser descrita a seguir:

Reino: Plantae

Divisão: Magnoliophyta

Classe: Magnoliopsida

Ordem :Gentianales

Família: Rubiaceae

Gênero: *Morinda*

Espécie: *M. citrifolia*

Nome científico: *Morinda citrifolia* Linn

Apresenta-se como uma árvore de pequeno porte e que, frequentemente, cresce em regiões costeiras e em áreas florestais com cerca de 400 metros acima do nível do mar. É considerada uma planta que apresenta, em geral, de 3 a 10 m de altura. Os galhos jovens são angulares e observam-se ranhuras (estrias). As folhas são elípticas, opostas e com margens onduladas, possuindo coloração verde brilhante na face superior e opaca na inferior, as quais apresentam de 10 a 40 cm de comprimento e 5 a 17 cm de largura (DIXON et al., 1999). Popularmente existem

várias denominações para a espécie que variam de acordo com a cultura local de cultivo (Tabela 1).

Tabela 1: Nomes populares de *Morinda citrifolia* L.

Nome popular	Origem
Ba ji tian	China
Nono	Tahiti
Meng Kuds	Malásia
Nhau	Sudoeste da Ásia
Painkiller Tree	Caribe
Grand Morinda	Vietnã
Bumbo	África
Noni	Havaí

Fonte: Morton (1992); Nelson (2003)

Os frutos são ovais, carnosos, ligeiramente enrugados, semi-translúcidos, com uma coloração que varia entre verde ao amarelo e, após a colheita, apresentam-se com odor forte e desagradável além de conterem muitas sementes (CHAN-BLANCO et al., 2006).

Dependendo das técnicas de pós-colheita adotadas, as frutas podem ser coletadas nos mais diversos estádios de desenvolvimento e continuarem amadurecendo. As frutas ficam com a textura macia muito rapidamente, passando do estágio de maturidade 4 para o 5 (descrito a baixo) em poucas horas. No ultimoestágio a polpa torna-se quase liquefeita. A fruta madura de coloração pouco acinzentada exala um forte cheiro de ranço devido à presença de ácido butírico (DIXON et al., 1999).

Por se tratar de uma planta perene e muito comum encontrar frutas em diferentes estágios de maturidade na mesma planta (Tabela 2).

Tabela 2: Evolução da cor e textura ao longo dos estádios de amadurecimento da fruta

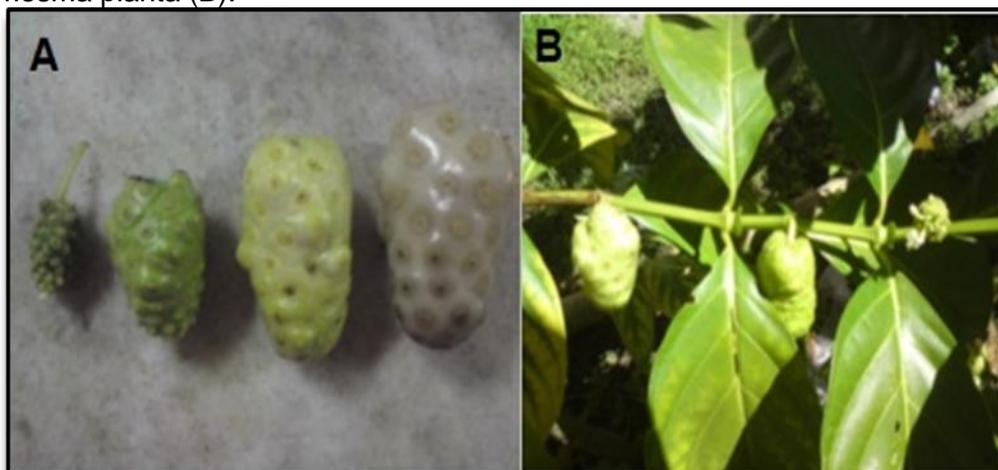
Estádio de Maturidade	Cor	Textura
1	Verde escuro	Muito firme
2	Verde amarelado	Muito firme
3	Amarelo pálido	Muito firme
4	Amarelo pálido	Firme
5	Acinzentado/Translúcido	Macio

Fonte: CHAN-BLANCO et al.(2006)

O período de florescência da planta compreende de novembro a fevereiro, sendo todas as suas partes (frutos, folhas, cascas, tronco e raízes) destinadas para fins terapêuticos. As diversas partes da planta são coletadas em diferentes épocas do ano, sendo as raízes coletadas no inverno e as folhas na primavera (WANG et al., 2002).

O fruto é climatério e geralmente é coletado verde ou na fase amarela ou esbranquiçada, sendo ainda possível seu transporte nessas fases, o processo de maturação é acelerado e o armazenamento acontece de 1 a 2 dias até o amolecimento, nessa última fase o fruto deve ser logo processado, antes de iniciar a deterioração (Fotografia 1A). É possível encontrar frutas em diferentes estádios de maturidade na mesma planta (Fotografia 1B), ao mesmo tempo (CHAN-BLANCO et al., 2006).

Fotografia 1: Fases de maturação do fruto (A); Frutos em diferentes estádios e uma mesma planta (B).



Fonte: CHAN-BLANCO et al., 2006

A fruta é composta por 90% de água, e muitos dos componentes do seu peso e composta por ser de sólidos solúveis, fibra alimentar e proteínas. A composição proteica no suco de Noni corresponde a aproximadamente 11,3%, já os minerais correspondem a 8,4% de matéria seca, e se constituem principalmente de potássio, cálcio e fósforos (CHUNHIENG, 2003). A presença de vitaminas no fruto também foi reportada, principalmente ácido ascórbico e provitamina A. (KAMIYA et al., 2010).

Dessa forma, além dos benefícios causados de forma direta à saúde dos seres humanos, o Noni (especificamente as sementes) poderia ser utilizado de diversas maneiras em benefício à população e ao meio ambiente. Uma dessas

maneiras seria no fornecimento de óleo vegetal de qualidade, rico em ácidos graxos essenciais. (KAMIYA et al., 2010).

2.2 Distribuição geográfica

A ampla distribuição é atribuída em parte à dispersão trans-oceânica de suas sementes flutuantes, autopolinização e sua capacidade de produzir flores e frutos o ano todo, o que implica dizer que o Noni provavelmente já estava presente na Micronésia antes da chegada dos ancestrais micronesianos do Sudoeste da Ásia há mais de 3000 anos (SILVA, 2010).

Encontram-se plantios de Noni no Nordeste do Brasil, especialmente nos Estados de Sergipe e Ceará, embora também possamos encontrar plantios no Acre, São Paulo e Minas Gerais. Apesar da crescente distribuição geográfica, há poucos trabalhos realizados com essa planta no país (CORREIA et al., 2011).

Fotografia 2: Árvore de Noni (Embrapa– PA)



O cultivo do Noni é relatado nos Estados do Acre, São Paulo, Minas Gerais, Pará(fotografia 2), Sergipe e Ceará, dentre outros. Contudo, os estudos de pesquisa desenvolvidos com essa espécie no país ainda são incipientes. Além disso, a composição química dos frutos pode variar de acordo com fatores ambientais, genéticos, distribuição geográfica e estádios de maturação. Assim, torna-se imprescindível estudar a composição do fruto cultivado em diferentes partes do Brasil (CORREIA et al., 2011).

2.2.1 Constituição química

A composição química da espécie se observa de acordo com a parte da planta em análise. A composição fitoquímica completa do fruto Noni foi descrita apenas como forma de informações parciais do suco de Noni (CHAN-BLANCO et al., 2005).

Segundo CHAN-BLANCO et al., (2005), existem uma grande quantidade de proteínas contidas no fruto sendo, representando 11,3% da matéria seca do suco, e os principais aminoácidos encontrados são o ácido aspártico, ácido glutâmico e isoleucina. Os minerais representam 8,4% da matéria seca, e os principais são o potássio, enxofre, cálcio e fósforo. Elementos traços de selênio tem sido descritos também no suco do fruto Noni. As principais vitaminas encontradas no fruto são o ácido ascórbico (24 – 158 mg/100 g matéria seca) e provitamina A.

Os compostos fenólicos desse fruto foram descritos como o maior grupo de micronutrientes funcionais presentes em seu suco. Os seguintes compostos foram identificados: damnacanthal, morindone, alizarin, aucubin, nordamnacanthal, rubiadin, rubiadin-1-methyl ether e outros glicosídeos antraquinônicos. Cerca de 51 compostos voláteis foram identificados no fruto maduro incluindo ácidos orgânicos (principalmente ácido hexanóico, octanóico e ácido asperulosídico), alcoóis (3-metil-3-buteno-1-ol), ésteres (metil octanoato, metil decanoato), cetonas (2-heptanona) e lactonas (E-6-dodeceno-lactona). (KRISHNAIAH et al., 2013).

Algumas características físico-químicas da polpa do fruto, observadas por diferentes autores, podem ser representadas através da Tabela 3.

Tabela 3: Características químicas e físico-químicas da polpa do Noni

Características	Chunhieng (2003)	Shovic e Whistler (2001)	Barros et al(2007)	Chan-Blanco et al. (2007)	Silva et al. (2009)*
pH	3,72	-	3,85	4	4,66-5
Umidade	-	-	-	91,8/100g	-
Matéria seca	9,8+0,4%	-	-	-	-
AT ¹	-	-	0,82%	-	0,21-0,39%
Açúcares Totais	-	-	5,19%	-	-
SS ²	8	-	8,4	7,3	4,83-10,33
Proteína	2,5%	0,4g/100g	-	-	-
Lípido	0,15%	0,30g/100g	-	0,016g/100g	-
Glicose	11,9+0,2g/l	-	-	-	-
Frutose	8,2+0,2g/l	-	-	-	-
Potássio	3900mg/l	188mg/100g	-	-	-
Sódio	214mg/l	21mg/100g	-	-	-
Magnésio	14mg/l	14,5mg/100g	-	-	-
Cálcio	28mg/l	41,7mg/100g	-	-	-
Vitamina C ³	-	155mg/100g	105,3mg/100g	316mg/100g	101,385mg/100g
Fenólicos	-	-	160,84mg/100g	-	-

¹AT: acidez titulável(% de ácido cítrico) ,²SS: Sólidos solúveis(°Brix),³VitaminaC: ácido ascórbico(mg.100⁻¹ de polpa) . * Valores mínimos e máximos da composição do Noni em diferentes estádios de maturação

A cumarina presente em *Morinda citrifolia* L. possui odor característico. Dentre os compostos cumarínicos, aescopoletina é responsável pela atividade antimicrobiana, anti-inflamatória e antioxidante(DENG et al., 2010).

Os valores de vitamina C presentes na polpa do fruto (105,3 mg/100g) estão acima do Índice Diário de Referência (IDR) para adultos, que varia de 75 mg/dia para mulheres e 90mg/dia para homens, teor de açúcares totais presentes na polpa do Noni (5,19%) está abaixo da média geral para frutas que varia entre 6 -12% (KRISHNAIAH et al., 2013).

Segundo Deng et al. (2010), até o ano de 2010, mais de 100 metabólitos secundários já tinham sido identificados na fruta. As estruturas destes são classificadas como flavonoides, ligninas, iridóides, cumarinas, antraquinonas, polissacarídeos, terpenos, esteróis e ácidos graxos. Os compostos fenólicos são mais resistentes ao tratamento com calor do que outros antioxidantes. As sementes são ricas em ácidos graxos, tais como ácido oléico (11,7%), ácido linoléico (68,6%), ácido cáprico (0,4%), ácido palmítico (12,2%), ácido esteárico (4,36%) e ácido araquidônico (0,43%).

2.2.2 Atividade antioxidante

Os organismos vivos estão constantemente sujeitos à ação do oxigênio, sendo que diversos estudos têm demonstrado que o consumo de substâncias antioxidantes na dieta diária, pode produzir uma ação protetora efetiva contra estes processos oxidativos que ocorrem no organismo. Uma série de doenças entre as quais câncer, aterosclerose, diabetes, artrite, doenças do coração, podem estar ligadas aos danos causados por formas do oxigênio extremamente reativas. Estas substâncias também estão ligadas com processos responsáveis pelo envelhecimento do corpo (DEGÁSPARI e WASZCZYNSKYJ, 2004).

West et al. (2012) realizaram um estudo com o extrato etanólico das sementes de Noni objetivando avaliar sua toxicidade e potencial antioxidante e verificaram que esse extrato não causou nenhum efeito citotóxico contra a espécie *Artemia salina*, nenhum efeito genotóxico e, ainda, apresentaram atividade antioxidante *in vitro*.

Estudos farmacológicos mostram que o consumo de compostos antioxidantes está associado a baixos riscos de doenças. De acordo com Halliwell (2007), os efeitos defensivos de antioxidantes naturais em frutas e plantas têm relatado três grandes grupos: vitaminas, fenólicos e carotenoides.

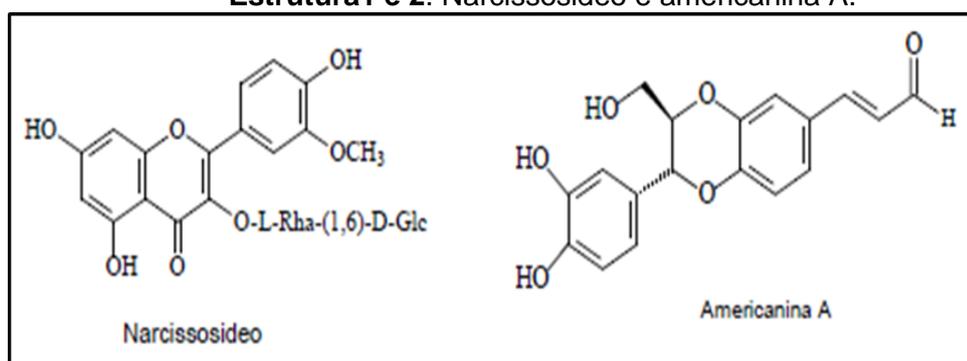
A maioria dos compostos fenólicos de ocorrência natural possui propriedades antioxidativas aumentando o interesse na substituição de antioxidantes alimentares sintéticos por naturais despertando intensa procura por materiais vegetais brutos para a identificação de novos antioxidantes (MOURE et al., 2011).

Em decorrência da grande diversidade química existente, em especial entre os compostos fenólicos, vários ensaios têm sido desenvolvidos para avaliação da capacidade antioxidante de amostras. Alguns deles determinam a habilidade dos antioxidantes em sequestrar espécies reativas geradas no meio reacional. Outros avaliam a eficiência dos antioxidantes em inibir a peroxidação lipídica por meio de quantificação dos produtos da reação; quantificação dos produtos da decomposição da peroxidação lipídica, ou medição da inibição da oxidação do lipídio do sistema pelo antioxidante a ser testado (KAMIYA et al., 2010).

Su et al. (2005) isolaram 19 compostos das frutas de *Morinda citrifolia* L. e todos foram avaliados quanto a sua atividade antioxidante pelo método do DPPH e

do ânion ONOO^- . Desses compostos, somente a americanina A apresentou ação antioxidante com o método do DPPH, com IC_{50} 16,9 μM . Já para o método do ânion ONOO^- a americanina A e o narcissosideo (Estrutura 1 e 2) apresentaram atividade, sendo os seus IC_{50} de 3,3 μM e 3,8 μM , respectivamente. SU et al. (2005) relataram que o isolamento da americanina A nos frutos de *Morinda citrifolia* L. pode ser uma das principais substâncias responsáveis pela boa ação antioxidante encontrada no seu suco.

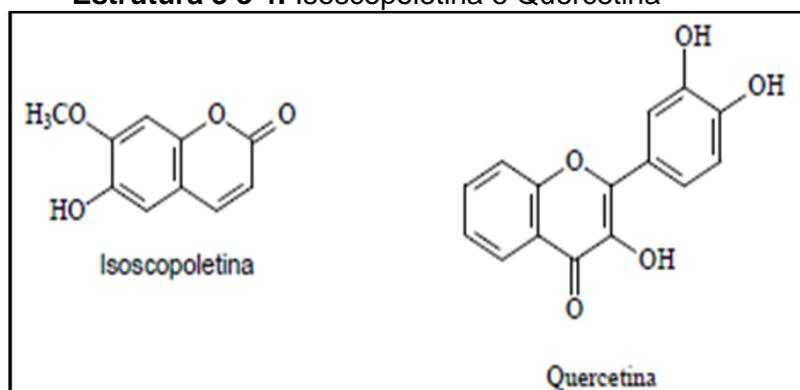
Estrutura 1 e 2. Narcissosideo e americanina A.



A Isoscooletina e quercetina (Estrutura 3 e 4), substâncias pertencentes aos grupos dos compostos fenólicos, foram isoladas do suco fermentado da fruta de *Morinda citrifolia* L. indicando que as propriedades antioxidantes desse suco estar, possivelmente, atribuída a presença desses compostos fenólicos (LIU et al., 2007).

A quercetina apresenta diversas atividades biológicas, tais como anti-úlceras, anti-alérgico, antiviral, atividade imuno moduladora e inibição da peroxidação lipídica (SUBRAMANIAM et al., 2003; VOLONTE et al., 2002).

Estrutura 3 e 4: Isoscooletina e Quercetina

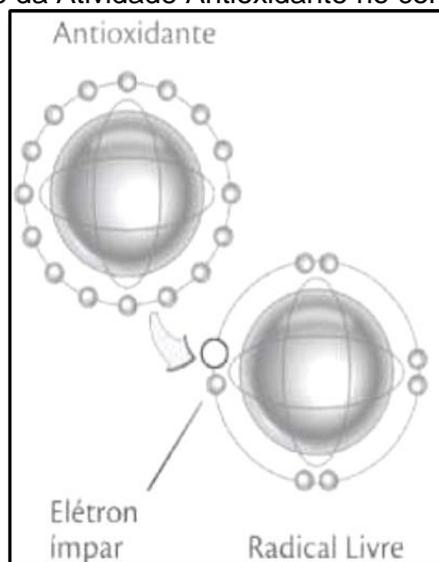


2.2.3 Espécies Reativas do oxigênio e radicais livres

Os radicais livres do oxigênio podem atacar e danificar praticamente qualquer molécula encontrada no organismo (Desenho 1). De uma forma ou de outra, os radicais acabam ficando estáveis, mas a molécula atacada, em si, transformou-se em um radical. Isso inicia uma reação em cadeia que pode agir destrutivamente sobre um tecido, por exemplo (YOUNGSON, 1995).

As espécies reativas do oxigênio (EROs) relatadas são: ânion superóxido (O_2^-), radical hidroxila (OH), óxido nítrico (NO), peróxido de hidrogênio (H_2O_2), entre outros, que desempenham um papel vital em processos biológicos de produção de energia, fagocitose e transdução de sinais (BOREK, 1997). Destes, o radical hidroxila é o mais reativo na indução de lesões nas moléculas celulares e o peróxido de hidrogênio, apesar de não ser considerado um potente radical livre, é capaz de atravessar a membrana nuclear e induzir danos na molécula de DNA.

Desenho1: Ilustração da Atividade Antioxidante no combate aos Radicais Livres.



Fonte: Maceratti (2012)

A produção excessiva de radicais livres pode conduzir a diversas formas de dano celular e sua cronicidade pode estar envolvida com o desenvolvimento de numerosas doenças (SPEISKY e JIMÉNEZ, 2000). Sabe-se que grande parte das principais doenças que matam as pessoas prematuramente ou destroem sua qualidade de vida o fazem através dos radicais livres. Se não forem detectados, eles

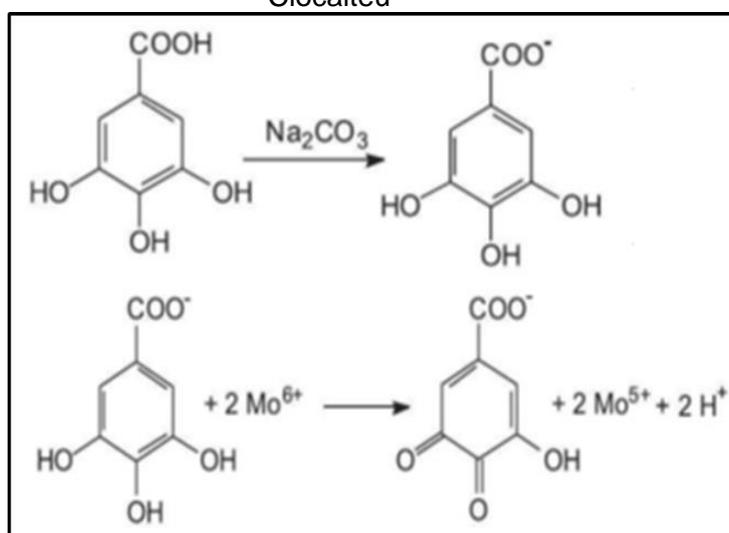
atacam constantemente as proteínas, os carboidratos, as gorduras e o DNA, causando danos potencialmente sérios.

2.2.4 Compostos fenólicos totais

A quantificação de compostos fenólicos é realizada por meio de uma variedade de métodos. Todavia, o que utiliza o reagente de Folin-Ciocalteu (RFC) é o mais extensivamente empregado. Assim, o ensaio de Folin-Ciocalteu (1927) tem sido utilizado para mensurar os fenólicos totais em produtos. O RFC consiste de mistura dos ácidos fosfomolibdico e fosfotungstico, na qual o molibdênio se encontra no estado de oxidação (VI) (cor amarela no complexo $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Porém, em presença de certos agentes redutores, como os compostos fenólicos ou outros de natureza não fenólica, formam-se os complexos molibdênio-tungstênio azuis $[(\text{PMoW}_{11}\text{O}_4)^4]$, (Fotografica 3) nos quais a média do estado de oxidação dos metais está entre 5 (V) e 6 (VI) e cuja coloração permite a determinação da concentração das substâncias redutoras (DE OLIVEIRA, 2010).

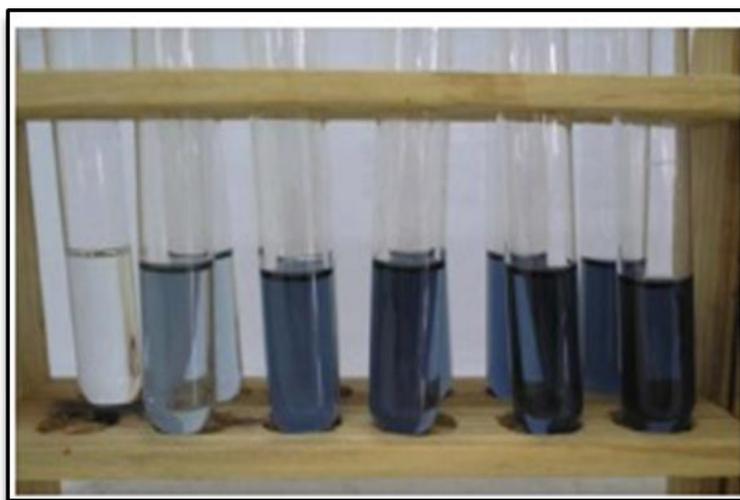
A estrutura 5 mostra a desprotonação dos compostos fenólicos (no exemplo, o padrão ácido gálico) em meio básico, gerando os ânions (neste caso, carboxilado). A partir daí, ocorre uma reação de oxi-redução entre o ânion e o reagente de Folin, na qual o molibdênio, componente do reagente de Folin, sofre redução e o meio reacional muda de coloração do amarelo para azul.

Estrutura 5: Reação do ácido gálico com molibdênio, componente do reagente de Folin-Ciocalteu



O método de RFC é amplamente utilizado em pesquisa de produtos naturais antioxidantes, porque é simples, sensível e preciso. Assim, os resultados são calculados com base na equação da reta obtida a partir da curva padrão do ácido gálico. Os resultados são expressos em mg de equivalentes de ácido gálico (EAG) por g de amostra.

Fotografia 3.Preparo da curva de calibração para análise de fenólicos totais



Fonte: Vedana (2008)

2.4 Trabalhos realizados com *Morinda citrifolia* L.

COSTA, et al. (2013): Realizaram a caracterização química e a atividade antioxidante da polpa, casca e sementes do Noni. Determinadas a composição centesimal (umidade, cinzas, proteínas, carboidratos e lipídios); os compostos bioativos (fenólicos totais, carotenoides totais e vitamina C) e a atividade *in vitro* em extratos aquoso, etanólico e acetônico. Os resultados demonstraram que o Noni possui quantidades significativas de carboidratos (27,21%; 9,70% e 8,37%) e de proteínas (2,64%; 2,23%; e 2,24%) nas sementes, casca e polpa, respectivamente. No extrato acetônico da polpa, foram quantificados 109,81 mg/100g de fenólicos totais, seguidos pelos extratos acetônicos da casca (76,01 mg/100g), das sementes (28,75 mg/100g) e do extrato etanólico da polpa (20,33 mg/100g). Todos os extratos avaliados apresentaram atividade antioxidante *in vitro*; os extratos acetônico e etanólico da casca e das sementes do Noni apresentaram maior atividade pelo método β -caroteno/ ácido linoleico, enquanto o extrato etanólico da

polpa teve maior atividade antioxidante pelo ensaio DPPH e ABTS, e o extrato acetônico da polpa, pelo método ABTS.

POLA, et al. (2011): Quantificaram os compostos fenólicos do Noni cultivado em Alegre - ES e avaliaram seu potencial antioxidante por meio do método de DPPH, submetido a diferentes formas de processamento e durante o armazenamento. O fruto refrigerado foi analisado quanto a sua capacidade antioxidante e concentração de compostos fenólicos durante os tempos zero, 1, 2 e 3 dias. Já o pó, resultado do processamento do Noni e que foi armazenado sob refrigeração, foi submetido às mesmas análises, durante os tempos zero, 25, 50 e 75 dias. Como resultados observaram que o noni em pó obteve maior capacidade antioxidante, principalmente devido à concentração da matéria seca, e esta se manteve estável a médio prazo de armazenamento sob refrigeração a 8°C.

KRISHNAIAH(2013): Avaliaram a atividade antioxidante e teor de fenólicos totais de *Morinda citrifolia* L. Utilizando extrato metanólico, através do separador de membrana. O extrato de *Morinda citrifolia* L. por metanol foi separado em permeado e retido por poli - ethersulphone (PES utilizando temperaturas de temperatura na gama de 30°C a 70°C A atividade seqüestradora de radicais livres e teor de fenólicos totais foram encontrados foram de 55,60% e 43,18 mg ácido gálico/10 g de amostra, respectivamente.

CORREIA et al. (2011): Avaliaram a composição química de Noni cultivado no Ceará e reportaram médias de 91,91% de umidade, 0,63% de cinzas, 0,08% de lipídeos totais; 1,06% de proteínas; 6,32% de carboidratos e um valor energético de 30,25 kcal/100g. Costa (2010): Avaliando frutos do Piauí, encontrou 88,36% de umidade; 0,93% de cinzas; 0,37% de lipídeos totais; 2,24% de proteínas; 8,37% de carboidratos e um valor energético de 45,77 kcal/100g

YANG et al.(2007): Estudaram a atividade antioxidante do suco de *Morinda citrifolia* L. não fermentado e fermentado, utilizando o método do radical livre DPPH. Os autores observaram que o suco não fermentado apresentava 210 mg de ácido gálico/100mL. Após o processo fermentativo, o suco fermentado apresentou uma redução de 90% dessa capacidade, mostrando que mesmo diante da grande popularidade do suco fermentado de Noni, esse processo reduz significativamente a qualidade antioxidante.

2.5 Considerações sobre a secagem

A secagem é uma operação unitária bastante utilizada nos processos industriais, e embora seja grande o interesse em sua compreensão, ela ainda é uma das operações menos entendidas em função da complexidade dos fenômenos envolvidos na transferência simultânea de calor, massa e quantidade de movimento no sólido durante o processo (KINGSLEY et al., 2007).

As formas de preservação do alimento através da técnica de secagem é bastante antiga, o método compreendia o uso do sol e vento, para a evaporação de água dos alimentos. A partir do século passado, durante a Primeira Guerra Mundial, a demanda por produtos desidratados para o suprimento das Forças Armadas americana, na Europa, estimulou a transição da antiga técnica em ciência, a partir da qual passou a ser estudada e interpretada como tecnologia (GREENSMITH, 1998).

Em relação às frutas, a secagem visa a conservação através da redução do teor de água do alimento até um determinado ponto, no qual a concentração dos sólidos naturais (açúcares, ácidos, sais minerais, vitaminas e outros componentes) seja elevada o suficiente para diminuir a atividade de água e inibir o desenvolvimento de microrganismos responsáveis pela deterioração dos alimentos (TRAVAGLINI et al., 1993).

O processo de secagem pode ser definido como a operação unitária que remove água (ou uma substância volátil qualquer) de um produto sólido por evaporação, com transferência de energia (calor) e massa (umidade), acarretando na redução de massa do produto (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 1997). Para evaporar a umidade do sólido é necessário fornecimento de calor, bem como um meio de transporte para remover o vapor de água formado na superfície do material a ser seco. O processo de secagem pode envolver três meios de transferência de calor: convecção, condução e radiação. A transferência de calor por convecção é o meio mais utilizado na secagem comercial, nela um fluxo de ar aquecido passa através da camada do material. Durante o processo, a umidade migra do interior para a superfície do produto, de onde se evapora para o ambiente. Nos processos de secagem, a água se movimenta de zonas de alta umidade para zonas de baixa umidade, o que significa que a parte externa do material está mais seca que seu interior. A taxa de remoção de água como vapor da superfície do alimento depende

de condições externas tais como: temperatura, umidade e fluxo do ar, área de superfície do produto e pressão. Já a taxa de migração de umidade no interior do alimento para a superfície é função de condições internas, tais como: natureza estrutural do material, temperatura e quantidade de umidade do produto (MUJUMDAR, 1995).

Estes de secagem envolvem dois fenômenos fundamentais e simultâneos, onde o calor é transferido do fluido de secagem para o sólido, evaporando o líquido contido na superfície do material e a massa é transferida em fase líquida ou vapor no interior do material, ocorrendo à transferência do vapor da superfície para a vizinhança do sólido. A secagem artificial de sementes, embora possua custo superior ao da secagem natural, proporciona controle do processo reduzindo rapidamente o conteúdo de umidade a níveis aceitáveis, sendo possível obter um material com umidade mais uniforme e sem a necessidade de riscos às intempéries ambientais. As técnicas utilizadas na secagem de sementes variam dependendo das variedades das mesmas e necessidades finais do produto (FERREIRA, 2003).

De acordo com Mujumdar (2006), no processo de secagem, observa-se dois fenômenos ocorrendo instantaneamente:

- Transferência de energia (calor) do ambiente para evaporar a umidade superficial. Esta transferência depende das condições externas de temperatura, umidade do ar, fluxo e direção do ar, área e exposição do sólido e pressão e transferência de massa, do interior para a superfície do material e sua subsequente evaporação devido ao primeiro processo.
- O movimento interno da umidade do material no sólido é função da natureza física do sólido, sua temperatura e conteúdo de umidade. Logo, se faz necessário um bom entendimento da cadeia de fenômenos de transporte.

A secagem é um dos processos mais utilizados para melhorar a estabilidade do alimento, pois diminui a atividade da água do produto, reduz a atividade microbiana e minimiza as mudanças físicas e químicas que ocorrem durante o armazenamento (MIHOUBI, et al., 2009).

De acordo com Park (2007) existem três estágios na secagem de um material. No primeiro estágio é a etapa do aquecimento do material, onde a energia absorvida pelo material é utilizada na forma de calor sensível. No segundo estágio ocorre o período de taxa constante, onde a transferência de massa e calor são equivalentes.

Este período continua enquanto a migração de água do interior até a superfície do produto seja suficiente para suprir a perda por evaporação de água na superfície.

No terceiro estágio a uma predominância das forças resistivas a transferência de massa, tendo como efeito imediato o surgimento de pontos secos na superfície da partícula e conseqüentemente ocorre o decrescimento da taxa de secagem.

A partir do estudo da cinética de secagem em camada fina se estabelecem equações da umidade do material em função do tempo de secagem para os diferentes períodos de taxa de secagem. Sendo que, os modelos utilizados para representar a cinética de secagem podem ser classificados em três classes: teóricos, semiempíricos e empíricos. Os modelos teóricos apresentam a vantagem de ser baseado nos princípios fundamentais, no entanto apresenta uma dificuldade em se determinar parâmetros existentes na equação. O modelo teórico mais utilizado para secagem de materiais que apresentam apenas o período à taxa decrescente é o modelo difusivo, que descreve a migração da umidade no interior de sólidos durante o processo de secagem. De acordo com Gelye Giner (2007), o modelo difusivo é um modelo teórico amplamente empregado para descrever o mecanismo de migração de umidade no interior de sólidos durante o processo de secagem. Mas, a complexidade dos fenômenos de secagem conduz os pesquisadores a proporem equações empíricas para prever a taxa de secagem. Pois, os modelos empíricos apresentam bom ajuste dos dados, uma matemática pouco complexa e uma completa flexibilidade na abordagem.

De acordo com o comportamento da transferência de calor e massa ao longo da operação, a secagem pode ser dividida em três períodos: período de indução, período em taxa constante e período em taxa decrescente de secagem, como mostra a figura a seguir. A temperatura do sólido aumenta até alcançar a do ar de secagem, e ao produto atingir a umidade de equilíbrio com o ar de secagem, a taxa de secagem passa a ser nula e o processo é encerrado (PARK et al., 2007).

O período de indução é insignificante em relação ao período total de secagem, enquanto que o primeiro período, taxa constante de secagem, é dificilmente observado na secagem dos materiais biológicos, dentre os quais estão os produtos alimentícios. (BARBOSA NETO, 2010).

Esta operação unitária consome até 10% da energia total usada no setor industrial de alimentos, porém a escolha de um secador é mais direcionada pelas

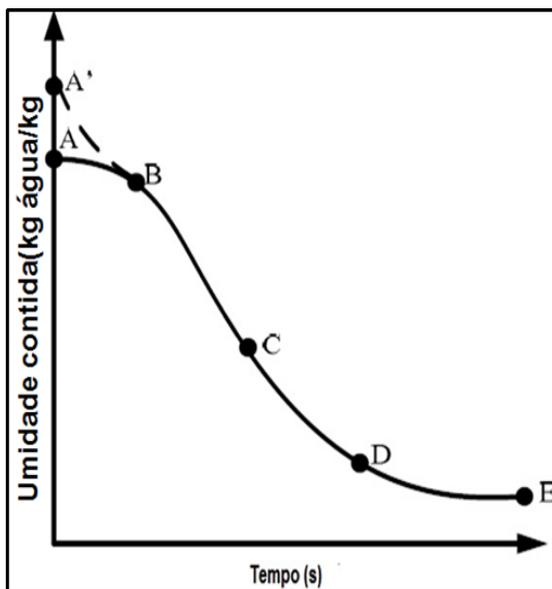
características desejadas no produto do que pelo consumo de energia. Mais de duzentos tipos diferentes de secadores têm uma aplicação na indústria, porém cerca de vinte tipos básicos são comumente usados. Esta grande variedade de tipos ocorre devido à variedade de formas físicas dos materiais a serem desidratados, à taxa de produção desejada e a característica dos produtos finais (MUJUMDAR, 1997; GREENSMITH, 1998).

2.5.1 Cinética de secagem

O estudo da cinética de secagem visa o conhecimento do comportamento do material ao longo do processo e a predição do tempo de secagem (Gráfico 1), uma vez que a modelagem do processo é de grande importância para o desenvolvimento e a otimização dos secadores, além de possibilitar padronização do processo.

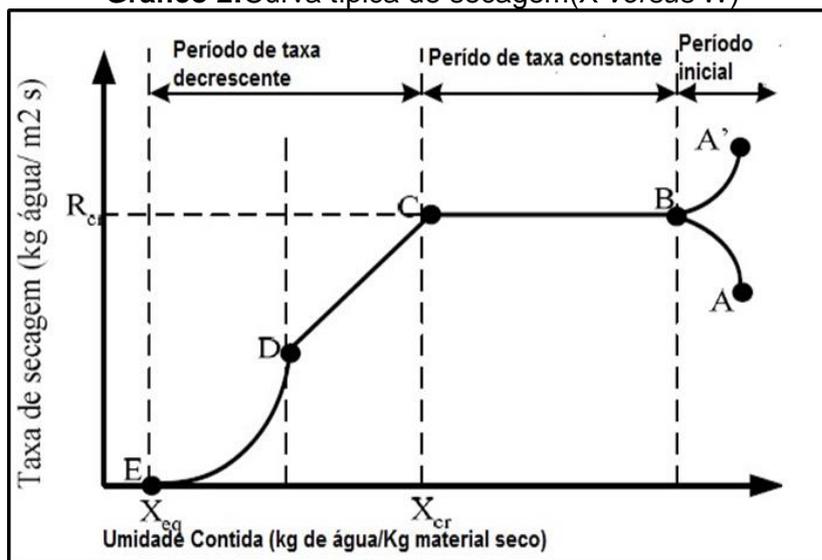
Kim et al. (2009) descrevem os períodos de secagem e o comportamento da água na partícula ao longo da secagem. O primeiro período é caracterizado pela evaporação da água livre presente na partícula e se chama período de taxa constante, nesta etapa a gotícula ainda líquida exposta ao ar quente de secagem sofre arrasto da água superficial e, para manter o equilíbrio dinâmico, a água interior migra para as extremidades, mantendo as condições de saturação. A evaporação de água a partir da superfície do produto ocorre a uma taxa constante, diminuindo a quantidade de umidade presente na gota, uma vez que está sendo evaporada. No começo dessa fase, a temperatura da gota diminui até a temperatura de bulbo úmido do ar de secagem. Como a água é evaporada, a partícula se resfria não sendo superior à temperatura de bulbo úmido.

A secagem de materiais biológicos é bastante complexa, em função das interações na matriz sólida que afetam diretamente a transferência de massa e calor no decorrer do processo. A fim de explicar o mecanismo de migração de umidade no interior dos alimentos, vários modelos matemáticos foram propostos para descrever a influência de cada variável no processo e estimar a difusividade da água (TORGRUL e PEHLIVAN, 2004).

Gráfico1: Curva típica de secagem

Fonte: Geankoplis (1993)

Esta curva representa um caso geral, quando inicialmente o sólido perde umidade por evaporação da superfície saturada (controle convectivo) e ao final por evaporação da umidade no seu interior (controle por difusão interna). O Gráfico 2 ilustra a variação da taxa ou velocidade de secagem com teor de umidade livre do material.

Gráfico 2: Curva típica de secagem (X versus W)

Fonte: Geankoplis (1993)

Nas curvas de secagem e de taxa de secagem (Gráficos 1 e 2, respectivamente) os segmentos AB e A'B, são termos representativos do período de aquecimento do material, também pode se caracterizar por período de acomodação térmica do produto às condições de secagem. Os segmentos BC, CD e DE, representam, respectivamente, os períodos de velocidade constante, e o primeiro e o segundo período de velocidade decrescente.

O ponto C, onde o período da velocidade constante termina e da velocidade decrescente começa, o que corresponde ao teor de umidade crítico do material, quando a taxa de migração de umidade interna não é suficiente para manter a superfície úmida. No ponto D, tem início a última etapa do processo de secagem, onde a difusão interna da umidade é o mecanismo controlador. No ponto E, a taxa de secagem é praticamente nula e o sólido atinge sua umidade de equilíbrio.

Durante os períodos de taxa constante e decrescente, os métodos de cálculo da secagem diferem. No primeiro caso, as transferências de calor e massa são analisadas na superfície do material em contato com o ar de secagem, já para o segundo caso, as análises são baseadas nas transferências internas que governam a secagem (PARK, 2001).

O período de taxa decrescente é quase sempre o único observado na secagem de frutas. De acordo com Strumillo e Kudra (1986), o comportamento da secagem no período decrescente ocorre por migração capilar da água líquida, sob a ação da tensão superficial e este mecanismo controla a velocidade da secagem.

Entretanto, após a desidratação osmótica, a taxa de remoção de água do sólido ao longo da secagem diminui em comparação com o produto sem pré-tratamento, por dois motivos principais: a incorporação de sólidos na superfície do material dificultando a evaporação da secagem. A perda de água do produto por secagem está diretamente relacionada com a superfície exposta do material, a temperatura, a velocidade do ar, a umidade do ar, o tempo do processo, a pressão e as características do produto.

A maioria dos modelos utilizados para o estudo da cinética de secagem são baseados na segunda Lei de Fick e nas soluções analíticas da equação de difusão. Segundo Geankoplis (1983), na secagem de um sólido mediante um gás, fixadas temperaturas e umidade, manifesta-se sempre um determinado tipo de comportamento do produto.

Imediatamente após o contato entre a amostra e o meio secante, a temperatura do sólido ajusta-se até atingir um regime permanente. Supõe-se que a temperatura e a umidade do ar sobre a superfície de secagem mantêm-se constante durante todo o ciclo da mesma e que todo o calor necessário é transferido ao produto por convecção. Se a troca de conteúdo de umidade do produto registra-se continuamente durante todo o processo de secagem, os dados podem ser representados em forma de curvas. O estudo dessas curvas mostra que o ciclo da secagem é constituído por diversas etapas (FELLOWS, 1994; EARLE, 1988).

Em muitos casos de secagem de produtos alimentícios não se observa o período de taxa constante de perda de água porque, ao iniciar a secagem, esses produtos geralmente já se encontram no período de razão decrescente. Os modelos matemáticos que descrevem a taxa decrescente de secagem de um sólido consideram, geralmente, como mecanismo principal, a difusão baseada na segunda Lei de Fick, que expressa que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água.

2.5.2 Secagem por radiação

Dentre os vários métodos existentes, a secagem convectiva (em leito fixo ou móvel) é uma das mais utilizadas para remover a umidade de uma grande variedade de materiais biológicos, incluindo grãos e sementes. Isto em razão da simplicidade de construção e facilidade de operação (PRADO, 2004). Entretanto, trata-se de uma operação com grande consumo de energia. Longos tempos de secagem são usualmente requeridos, por causa das baixas condutividades térmicas dos materiais durante o período de taxa decrescente, que dificultam a transferência interna de calor, e à impermeabilização que tende a ocorrer na superfície do sólido, aumentando a resistência à transferência de massa e a possibilidade de “overdrying” do produto. Poucos sistemas possuem reciclo do ar de exaustão, o qual é geralmente descarregado diretamente para a atmosfera, reduzindo a eficiência energética do secador. Além disso, a maior parte da energia para a secagem é obtida da queima de combustíveis fósseis, ocasionando também um impacto ambiental negativo.

Os custos crescentes de combustíveis fósseis, a preocupação em assegurar a qualidade do produto e reduzir o impacto ambiental, têm impulsionado as pesquisas para a compreensão dos fenômenos complexos envolvidos na secagem convectiva e para a melhoria do desempenho dos secadores industriais (MUJUMDAR, 2006).

Novos produtos, novos processos, maiores taxas de produção e legislações ambientais mais rigorosas requerem maior nível de desempenho em custos menores que o obtido com secadores convencionais, o que tem fornecido uma nova motivação para pesquisas neste campo multi-disciplinar, concernentes ao desenvolvimento de tecnologias de secagem com maior eficiência energética, e até mesmo envolvendo o uso de fontes de energia renovável (RAGHAVAN et al., 2005).

Novas tecnologias de secagem são ainda necessárias para produtos tradicionais, como grãos e sementes, em razão da massiva escala global de produção destas “commodities”. Em adição, a globalização de mercado tem obrigado demandas mais rigorosas sobre as tecnologias de secagem.

Na grande maioria dos processos industriais de secagem, o tratamento térmico dos materiais envolve técnicas convencionais de fornecimento de energia tais como convecção e condução. Entretanto, estes modos de transferência de calor restringem as possibilidades de aumentar a eficiência de secadores no processamento de determinado produto e até mesmo no aumento da capacidade de produção. Neste contexto, as tecnologias radiantes se tornam particularmente interessantes, a medida que permitem imediata e significativo fornecimento de energia ao produto a ser processado (SALAGNAC et al., 2004).

As vantagens desta técnica da secagem por radiação incluem:

- A simplicidade do equipamento requerido;
- Fácil incorporação do aquecimento com outros métodos de aquecimento (convectivo, condutivo e micro-ondas);
- Fácil direcionamento da fonte de calor e transferência da energia eletromagnética no regime o para a superfície do material sem aquecimento do ar;
- A obtenção de altas taxas de transferência de calor com aquecedores compactos; reduzida necessidade de uma alta velocidade do ar, minimizando o contato do material submetido à secagem com o oxigênio,

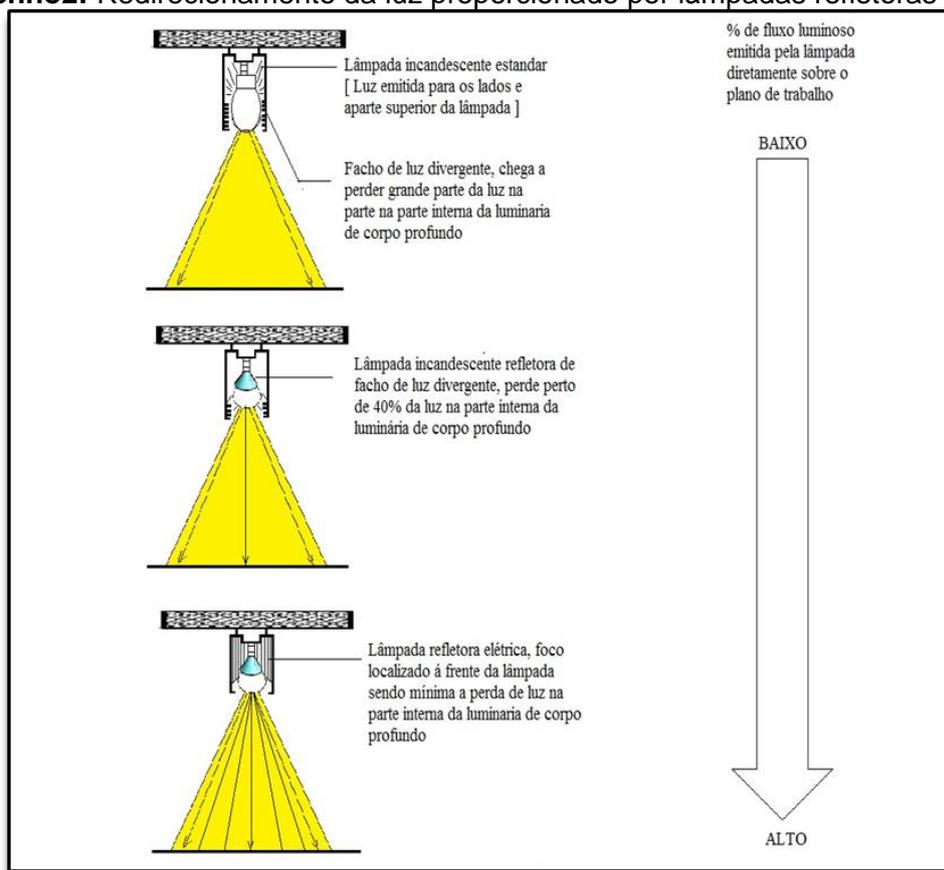
- Alta qualidade dos produtos finais e significativa economia de energia (RATTI e MUJUMDAR, 1995).

Diante da necessidade de aplicar fontes alternativas e eficientes de energia para reduzir o tempo e os custos com o processo, as investigações sobre tecnologias de secagem por radiação eletromagnética crescem de importância (MUJUMDAR, 2006).

2.5.3 Lâmpadas incandescentes refletoras (espelhadas)

São lâmpadas que possuem um refletor interno para melhorar o direcionamento da luz produzida. A área espelhada funciona como uma luminária, com a vantagem de não necessitar limpeza ou sofrer deterioração, garantindo um alto rendimento durante a vida da lâmpada. O refletor pode ter um perfil parabólico ou elíptico, sendo este último especialmente importante quando a lâmpada está embutida numa luminária de corpo profundo e aletas anti-ofuscantes (Desenho 2). Permitem a obtenção de um fluxo luminoso constante de alta intensidade e distribuição precisa, devido ao formato do bulbo e ao espelho na sua superfície interna. Essas lâmpadas encontram um vasto campo de aplicações, podendo ser utilizadas em local onde um determinado objeto necessita de destaque especial (CAVALIN; CEVELIN, 2005).

Desenho2: Redirecionamento da luz proporcionado por lâmpadas refletoras



Fonte: Mascaró(1992)– adaptado.

2.5.4 Principais Grandezas Fotométricas

O termo fotometria, originado diretamente do grego ($\phi\omega\varsigma$ - luz; $\mu\epsilon\tau\omicron\upsilon$ - medida) é definido simplesmente como: o ramo da ciência que trata da medição da luz. Ela estuda o balanço de energia nos processos de emissão, propagação e absorção de radiação. A quantidade de radiação pode ser avaliada em unidades de energia ou no seu efeito sobre o receptor: o olho humano, a película fotográfica, a pele humana, etc(COSTA,1998).O Sistema Internacional (SI) define algumas grandezas e unidades utilizadas em Fotometria, das quais extraímos algumas que são importantes neste trabalho:

a) Intensidade Luminosa(cd):

Se a fonte luminosa irradiasse a luz uniformemente em todas as direções, o Fluxo Luminoso se distribuiria na forma de uma esfera. Tal fato, porém, é quase impossível de acontecer, razão pela qual é necessário medir o valor dos lumens

emitidos em cada direção. Essa direção é representada por vetores, cujo comprimento indica a Intensidade Luminosa. Em outras palavras é a potência da radiação luminosa em uma dada direção. Como a maioria das lâmpadas não apresenta uma distribuição uniformemente em todas as direções é comum o uso das curvas de distribuição luminosa, chamadas CDL's.

b) Fluxo Luminoso(lm):

É a potência de radiação total emitida por uma fonte de luz em todas as direções do espaço e capaz de produzir uma sensação de luminosidade através do estímulo da retina ocular. Em outras palavras, é a potência de energia luminosa de uma fonte percebida pelo olho humano.

Um lúmen é a energia luminosa irradiada por uma candela sobre uma superfície esférica de 1 m^2 e cujo raio é de 1 m. Assim o fluxo luminoso originado por uma candela é igual à superfície de uma esfera unitária de raio ($r = 1 \text{ m}$) $A = 4 \cdot r^2 = 12.57 \text{ lm}$. A sensibilidade visual para a luz varia não só de acordo com o comprimento de onda da radiação, mas também com a luminosidade:

- Iluminância ou iluminamento (lux, lx) : É a relação entre o fluxo luminoso incidente em uma superfície pela área dessa superfície. Sua fórmula é $\text{lux} = \frac{\text{lúmen}}{\text{m}^2}$ (CAVALIN; CEVELIN, 2005).
- Luminância (cd/m^2): É a luminância, em uma determinada direção, de uma fonte de área emissível igual a 1 m^2 , com intensidade luminosa, na mesma direção, de uma candela.
- Quantidade de Luz (lm/s): É a quantidade de luz, durante 1 segundo, de um fluxo uniforme é igual a (lm).
- Eficiência Luminosa (lm/W): É a eficiência luminosa de uma fonte que dissipa 1 watt para cada lúmen emitido (CREDER, 2002).

2.5.5 Planejamento e otimização experimental

A técnica de planejamento de experimentos (Design of Experiments-DOE) foi desenvolvida entre 1920 a 1930 por Sir Ronald Fisher a partir de um trabalho de pesquisa desenvolvido em Londres, no Rothamsted *Agricultural Experiment Station*, que se mostrou inovadora no uso dos métodos estatísticos na análise de dados. Esta

técnica vem sendo estudada e incrementada por pesquisadores de renome na área da estatística experimental (PRVAN e STREET, 2002)

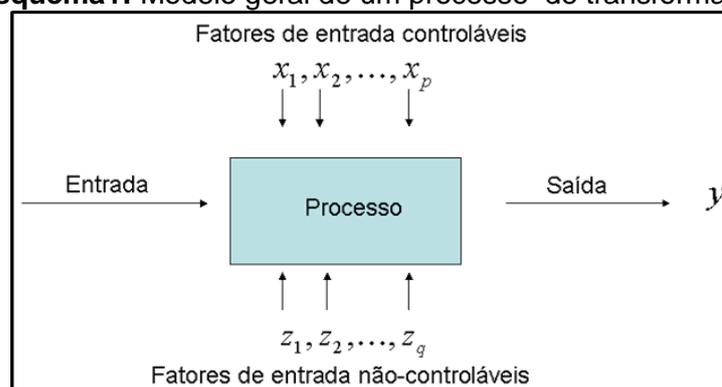
A utilização de planejamento experimental para otimização de processos produtivos é relevante para obtenção de resultados confiáveis, principalmente para serem analisados estatisticamente. Assim, o planejamento experimental proporciona a quantificação dos efeitos das variáveis do processo sob as respostas desejadas. Como vantagens tem-se a redução das repetições com conseqüente redução dos custos e do tempo da pesquisa, análise simultânea dos fatores sinérgicos e antagônicos de interesse, otimização de mais de uma resposta ao mesmo tempo, além da possibilidade de calcular o erro experimental que é responsável pelo nível de confiança estatística da estimativa de reprodutibilidade do experimento.

Em geral, para avaliar as respostas da otimização de experimentos utiliza-se uma ferramenta eficiente, a Metodologia de Superfície de Respostas (MSR). Tal metodologia avalia, por meio de cálculos matemáticos e estatísticos, a influência das variáveis nos processos, o que viabiliza a percepção dos pontos ótimos encontrados na combinação dos níveis dos fatores ou variáveis (GRIZOTTO, et al. 2005).

Segundo Colla (2008), dependendo do número inicial de variáveis independentes pode-se ter uma estratégia sequencial de planejamentos. Porém, no caso de 2 ou 3 variáveis independentes, Rodrigues e Lemma (2009) recomendam a utilização do planejamento ou Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR).

Segundo Montgomery(2001), um experimento planejado é um teste, ou série de testes, no qual são feitas mudanças propositalmente nas variáveis de entrada de um processo, de modo a podermos observar e identificar mudanças correspondentes na resposta de saída.

Esquema1: Modelo geral de um processo de transformação



Fonte: Montgomery(1991)

O processo, como mostra o Esquema 1, pode ser visualizado como uma combinação de máquinas, métodos e pessoas, que transforma um material de entrada em um produto de saída. Este produto de saída pode ter uma ou mais características da qualidade observáveis ou respostas. Algumas das variáveis do processo x_1, x_2, \dots, x_p são controláveis, enquanto outras, z_1, z_2, \dots, z_q são não-controláveis (embora possam ser controláveis para efeito de teste).

Aplicação dos Planejamentos Experimentais na Indústria são fundamentais para desenvolvimento de novos produtos e para o controle de processos. Nesta área é comum aparecer problemas em que se precisa estudar várias propriedades ao mesmo tempo e estas, por sua vez, são afetadas por um grande número de fatores experimentais. É papel de técnicas de planejamento de experimentos, auxiliar na fabricação de produtos com melhores características, na diminuição do seu tempo de desenvolvimento, aumentar a produtividade de processos e minimizar a sensibilidade a fatores externos (NETO et al., 2011).

A análise de dados para os modelos de planejamento de experimentos fica praticamente inviabilizada sem o uso de softwares específicos, tais como o *Statistica* e o *Minitab*. Em um planejamento de experimentos é realizada uma série de testes nos quais são feitas variações propositalmente nos parâmetros de controle do processo, com o objetivo de observar e identificar as variações na resposta.

Na secagem as técnicas de planejamento fatorial e metodologia de superfícies de resposta tem sido empregadas para otimização do processo, minimizando o número de experimentos, que em sua maioria são trabalhosos e dispendiosos (FARIA, 1998)

2.5.6 Planejamento fatorial dois níveis 2^k

Conforme Juran et al. (1951), um experimento fatorial com k fatores, cada um deles com dois níveis, é denominado de experimento fatorial tipo 2^k . O processo experimental dessa técnica consiste em realizar testes com cada uma das combinações da matriz experimental, para em seguida, determinar e interpretar os efeitos principais e de interação dos fatores investigados e assim poder identificar as melhores condições experimentais do produto ou processo de fabricação.

Box, Hunter e Hunter(1978) ressaltam que o planejamento fatorial 2^k é o tipo mais simples de planejamento onde cada fator está presente em apenas dois níveis. Para interpretar os resultados deste tipo de projeto fatorial, o valor de cada variável de entrada codificado (níveis) corresponde ao mínimo -1 e o máximo a +1.

Para se realizar um planejamento fatorial é necessário selecionar um número fixo de níveis para cada um dos fatores (variáveis), e então, realizar-se os experimentos com todas as possíveis combinações de níveis.

Considerando por exemplo, um planejamento com três fatores: X_1 , X_2 e X_3 , cada uma destas variáveis de entrada são testadas com dois níveis (-1, +1). Trata-se então de um planejamento fatorial 2^3 (Tabela 4) que apresenta com variável de resposta R_i . Resalta-se que a ordem de realização do teste deve ser definida de forma aleatória (BOX, HUNTER e HUNTER; 1978).

Tabela 4 Matriz de planejamento do experimento fatorial 2^3

Ensaio	Fatores			Ordem dos ensaios	Resposta R_i
	X_1	X_2	X_3		
1	-1	-1	-1	6	R_1
2	+1	+1	+1	8	R_2
3	-1	-1	-1	1	R_3
4	+1	+1	+1	2	R_4
5	-1	-1	-1	5	R_5
6	+1	+1	+1	3	R_6
7	-1	-1	-1	4	R_7
8	+1	+1	+1	7	R_8

Fonte: Denver et al.(1992); Montgomery(1991)

Através deste tipo de planejamento e por meio da repetição dos ensaios originais é possível determinar os efeitos principais (variação da resposta quando se passa de um nível inferior para um nível superior de um fator) e da interação que as variáveis independentes produzem nas respostas (DEVOR, CHANG e SUTERLAND, 1992; BIZI 2000).

2.5.7 Planejamento fatorial com pontos centrais

Segundo Galdamez e Carpinetti (2004) o planejamento fatorial 2^k com pontos centrais ou planejamento fatorial composto, consiste em adicionar um ponto de experimentação no nível intermediário aos níveis investigados das variáveis de entrada que forneça informações úteis sobre o comportamento das respostas entre os níveis inicialmente atribuídos aos fatores. Rodrigues e lemma(2005) afirmam que este tipo de delineamento é geralmente utilizado quando replicas dos pontos fatoriais são inviáveis devido a grande demanda de equipamento, altos custos e tempo dentre outros fatores.

A ilustração do procedimento desta técnica pode ser observada na Tabela 5 que consta de um planejamento fatorial 2^2 (com dois fatores e dois níveis e três ensaios no ponto central).

Tabela 5 Matriz de planejamento com adição de ensaios no ponto central

Ensaio	Variáveis de entrada		Resposta R_i
	X_1	X_2	
1	-1	-1	R_1
2	+1	+1	R_2
3	-1	-1	R_3
4	+1	+1	R_4
5	0	0	R_5
6	0	0	R_6
7	0	0	R_7

Fonte:Rodrigues e lemma (2005)

2.5.8 Metodologia da superfície de resposta (MSR)

A metodologia de superfície resposta (MSR) consiste em um grupo de técnicas matemático-estatísticas utilizadas para análise e modelagem de problemas, nos quais uma resposta particular é função de diversas variáveis e o principal objetivo é otimizar esta resposta. As superfícies representam uma boa forma de ilustrar graficamente a relação entre as diferentes variáveis experimentais e as

respostas, oferecendo valiosas informações sob o comportamento das variáveis na região estudada (MONTGOMERY, 1991).

Neste método são realizados planejamentos fatoriais para cujos resultados são ajustados modelos matemáticos. Estas etapas, conhecidas como etapas de deslocamento e modelamento, podem ser repetidas quantas vezes forem necessárias até que se atinja uma região ótima (máximo ou mínimo) da superfície estudada. A modelagem normalmente é feita ajustando-se modelos lineares ou quadráticos a resultados experimentais obtidos a partir de planejamentos experimentais. O modelamento ocorre em busca do caminho de máxima inclinação de um determinado modelo, sendo o caminho pelo qual a resposta varia de forma mais pronunciada (BARROS NETO; SCARMÍNIO e BRUNS, 2007).

A primeira etapa da MSR é encontrar uma aproximação adequada para a verdadeira relação entre a resposta (Y_z) e as variáveis independentes (MONTGOMERY; RUNGER, 2003). A aproximação adequada da relação entre as variáveis de entrada (independentes) e a resposta (dependente) dentro de um domínio experimental delimitado deve ser descrita pela função polinomial. Basicamente os modelos polinomiais podem ser:

Modelo de primeira ordem que é uma função linear das variáveis independentes, conforme a Equação 2.1. Geralmente esse modelo é mais utilizado para a investigação do sistema experimental como: estudos preliminares, teste de robustez, entre outros.

$$Y_z = b_{z0} + b_{z1}X_{z1} + b_{z2}X_{z2} + \dots + b_{zn}X_{zn} + \varepsilon \quad (2.1)$$

Modelo de segunda ordem que é uma função quadrática, na forma da Equação 2.2. Uma função quadrática descreve uma grande variedade de superfícies e permite determinar um ótimo (máximo e mínimo).

$$Y_z = b_{z0} + \sum_{i=1}^z b_{zi} X_i + \sum_{i=1}^z b_{zii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{z-1} + \sum_{j=i+1}^z b_{zij} X_i X_j + \varepsilon_i \quad (2.2)$$

Em que Y_z é a resposta (variáveis dependente), ε_i representa o erro aleatório (ou resíduo que é diferença entre o resultado previsto e o obtido experimentalmente), os parâmetros b_{z0} , b_{zi} , b_{zii} e b_{zij} representam os coeficientes de regressão constantes e X_{zi} ($i = 1, 2, \dots, zn$), são as variáveis independentes codificadas, relacionadas linearmente a k_i conforme a Equação 2.3:

$$X_{zi} = \frac{k_i - k_i^0}{d_i} \quad (2.3)$$

Em que k_i é o valor real da variável de entrada em unidades originais, k_i^0 é o valor central (média aritmética entre os valores do nível alto e do baixo da variável real) em unidades originais, e d_i representa a metade da diferença entre os valores dos níveis alto e baixo de k_i .

As formas mais frequentes das superfícies de resposta dadas por modelos polinomiais de segunda ordem estão ilustrados em Box, Hunter e Hunter (1978). A identificação do tipo de superfície e da condição ótima de operação do processo pode ser obtida através do procedimento conhecido como análise canônica, que transforma o modelo quadrático em um novo sistema de coordenadas. A metodologia utilizada na redução de modelos quadráticos para a forma canônica visando à otimização de problemas está descrita em Cochran e Cox (1957), Akhnazarova e Kafarov (1982) e em Montgomery (2001).

2.5.9 Função desejabilidade global

A técnica de otimização simultânea denominada “Função de Desejabilidade” (*Desirability Function*) proposta por Derringer e Suich (1980), é baseada na transformação de uma função desejabilidade para cada variável de resposta, com valores descritos no intervalo [0, 1], no qual 0 representa um valor completamente indesejado, e 1 o valor mais desejável (ótimo alcançável).

Conforme Barros Neto, Scarminio e Bruns (2007) uma vez que as funções de desejabilidade tenham sido especificadas para todas as respostas, devemos combiná-las numa desejabilidade global, normalmente dada pela média geométrica das “m” desejabilidades individuais, artifício pelo qual a otimização simultânea das variáveis respostas se reduz à maximização de um único valor, a desejabilidade global que é definida pela Equação 2.4:

$$D = \sqrt[m]{d_1 d_2 \dots d_m} \quad (2.4)$$

Em que: m denota o número de respostas. Se qualquer resposta d_m for completamente indesejável ($d_m = 0$), então a desejabilidade global é igual a zero. O problema reduz-se em descobrir os níveis dos fatores que maximizem o valor de D,

com a vantagem de que o uso da média geométrica faz com que a desejabilidade global se anule sempre que uma das repostas tiver um valor inaceitável, não importa quão satisfatório sejam os valores das outras variáveis (BARROS NETO; SCARMÍNIO; BRUNS, 2007).

Conforme se deseje maximizar, minimizar ou assumir um valor mediano para uma variável de respostas, diferentes tipos de funções desejabilidade podem ser utilizadas.

Os expoentes s e t determinam a importância da função para encontrar o valor desejado; sendo que para $s = t = 1$, a função desejabilidade aumenta linearmente com M ; para $s < 1$ e $t < 1$, a função é convexa; e para $s > 1$ e $t > 1$, a função é côncava.

Se a resposta deve ser maximizada, a desejabilidade individual é definida na forma da Equação 2.5:

$$d = \begin{cases} 0 & \hat{Y} < L_i \\ \left(\frac{\hat{Y} - L_i}{M - L_i} \right)^s & L_i \leq \hat{Y} \leq M \\ 1 & \hat{Y} > M \end{cases} \quad (2.5)$$

Se a resposta deve ser minimizada, a desejabilidade individual é definida na forma da Equação 2.6:

$$d = \begin{cases} 0 & M < \hat{Y} \\ \left(\frac{L_s - \hat{Y}}{L_s - M} \right)^t & M \leq \hat{Y} \leq L_s \\ 1 & \hat{Y} > L_s \end{cases} \quad (2.6)$$

Se a resposta é do tipo mediana, então sua função desejabilidade individual é bilateral, em que o valor desejado está localizado entre o limite inferior e superior, sendo definida por meio da Equação 2.7

$$d = \begin{cases} 0 & \hat{Y} < Li \\ \left(\frac{\hat{Y} - Li}{M - Li} \right)^s & Li \leq \hat{Y} \leq M \\ \left(\frac{Ls - \hat{Y}}{Ls - M} \right)^t & M \leq \hat{Y} \leq Ls \\ 1 & \hat{Y} > Ls \end{cases} \quad (2.7)$$

Através de programas computacionais específicos disponíveis no mercado, como por exemplo, o aplicativo *Statistica*® ou *Design Expert*® se obtém a otimização numérica. O programa *Statistica* 7.0, utiliza a abordagem usada por Derringer e Suich (1980).

A desejabilidade incide em três etapas:

- Conduzir os experimentos e ajustar as resposta dos modelos para todas as respostas;
- Definir as funções desejabilidade individuais para cada resposta;
- Maximizar a desejabilidade global, D, em relação aos fatores controlados.

A Tabela 6 apresenta os critérios de aceitabilidade para as respostas, propostas por Akhnazarova e Kafarov (1982), para a determinação do ponto ótimo, em função de restrições nas variáveis operacionais de entrada

Tabela 6 – Escala de valores de desejabilidade individuais ou global

Faixa (d ou D)	Descrição da resposta
0,80 a 1,00	Aceitável e excelente
0,63 a 0,80	Aceitável e bom
0,37 a 0,63	Aceitável, porém pobre
0,20 a 0,37	Faixa limite de aceitação
0,00 a 0,20	Inaceitável

Fonte: Akhnazarova e Kafarov (1982)

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 Coleta e preparo das amostras (frutos)

Os frutos foram obtidos na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária EMBRAPA, localizada na cidade de Belém-PA. Foram coletados nos meses de novembro e dezembro de 2014 em estágio de maturação verde a amarelo-esbranquiçado e conduzidas ao laboratório secagem e recobrimento de partículas da FEQ/UFPA.

Posteriormente, foram pré-selecionadas aqueles que apresentavam o ponto ótimo de maturação (Fotografia 4), ou ponto ótimo para consumo, descartaram-se todas as amostras danificadas com rachaduras, ranhuras ou que estivessem em fase de senescência avançada

Fotografia 4. Amostra de Noni, em estágio ótimo de maturação



3.2 Planejamento e otimização experimental

Para executar os experimentos de forma organizada e com um número controlado de ensaios, adotou-se o planejamento fatorial, o qual permitiu verificar os efeitos individuais e a interação das variáveis sobre as respostas analisadas, e assim indicar as variáveis mais importantes para o processo estudado. O processo

de secagem foi realizado por meio da metodologia da superfície de resposta utilizando o planejamento fatorial composto central rotacional (PCCR), com precisão uniforme.

3.2.1 Variáveis Operacionais de Entrada e Respostas

As variáveis do processo de secagem foram observadas sob a metodologia de superfície de resposta, utilizando o planejamento composto central rotacional (PCCR), com precisão uniforme, desta forma, portanto, determinar as condições de Otimização.

Na execução do processo, dotou-se variáveis de entrada (variáveis independentes) as que possivelmente teriam alguma influência na resposta. Essas variáveis foram: temperatura da área exposta a secagem (54, 60, 75, 90 e 96°C) e tamanho das amostras em rodela com espessuras de (5, 6, 8, 10 e 11 mm), sendo codificadas com X_1 e X_2 respectivamente.

As respostas de interesse (variáveis dependentes) para o processo de secagem de *Morinda citrifolia* L. são: teor de umidade final X_r (adim.), atividade antioxidante (mg de trolox/g) e fenólicos totais (mg Ag/g). As corridas experimentais foram efetuadas aleatoriamente, conforme as matrizes de planejamento citadas nas Tabelas 7 e 8, respectivamente.

3.2.2 Planejamento Fatorial Composto Central Rotacional

O PCCR consiste em um planejamento obtido através da soma referentes a um projeto fatorial completo ou fracionário, cujas variáveis são codificadas de -1 e +1, chamadas de porção fatorial do projeto, com um número determinado de corridas em seu ponto central, n_c ($n_c \geq 1$), dois pontos axiais no eixo de cada variável e uma distância α do centro do projeto, sendo chamada de porção axial do planejamento.

O número total de corridas do experimento, N_{TC} , é representado pela Equação 3.1, descrito por Khuri e Cornell (1996):

$$N_{TC} = n_f + n_\alpha + n_c \quad (3.1)$$

Onde:

$n_f = 2^k$ número de ensaios do planejamento fatorial;

$n_\alpha = 2k$ número ensaios axiais;

$n_c \geq 1$ número de repetições no ponto central.

O número total de repetições no ponto central pode ser estabelecido pela Equação 3.2, onde o parâmetro τ vale 0,7844 para $k=2$:

$$n_c \cong \tau(\sqrt{n_f} + 2)^2 - n_f - 2k \quad (3.2)$$

O valor de α para conferir característica de rotabilidade ao planejamento deve ser calculado pela Equação 3.3 (KHURI e CORNELL, 1996).

$$\alpha = \pm(n_f)^{\frac{1}{4}} \quad (3.3)$$

Assim, para $k=2$, os valores codificados dos pontos axiais são $-1,41$ e $+1,41$. A correspondência do valores codificados e reais é obtida utilizando-se a Equação 3.3. Desta forma, obtendo-se um modelo estatístico que possa prever a região ótima do processo, na faixa dos níveis estipulados das variáveis de entrada através da metodologia da superfície de resposta. Nas Tabelas 7 e 8 estão representadas as variáveis de entrada e seus respectivos níveis.

Tabela 7. Variáveis operacionais de entrada e seus respectivos níveis

Variáveis de entrada		Níveis				
Reais (unidade)	Codificadas	-1,41	-1	0	+1	+1,41
Temperatura (°C)	X_1	54	60	75	90	96
Espessura (mm)	X_2	5	6	8	10	11

A análise do projeto experimental gerou 12 experimentos que estão sumarizados na Tabela 8, com valores das variáveis de respostas. Os resultados foram analisados através das técnicas estatísticas com auxílio do programa *Statistica*® 7.

Tabela 8.Matriz de experimentos do PCCR na ordem padronizada

CORRIDAS	VARIÁVEIS REAIS		VARIÁVEIS CODIFICADAS	
	T(°C)	E (mm)	X ₁	X ₂
1	60	6	-1	-1
2	90	6	1	-1
3	60	10	-1	1
4	90	10	1	1
5	54	8	-1,41	0
6	96	8	1,41	0
7	75	5	0	-1,41
8	75	11	0	1,41
9	75	8	0	0
10	75	8	0	0
11	75	8	0	0
12	75	8	0	0

3.3 Processo de secagem por radiação com lâmpadas refletoras

3.3.1 Descrição do Secador

Para o processo de secagem utilizou-se um secador de radiação que utilizasse a iluminação incidente de lâmpadas refletoras sobre uma superfície. Sendo a luminosidade e o calor transportados e concentrados diretamente nas amostras, a este dispositivo denominou-se de secador por de Iluminação Direta ou secador por radiação com lâmpadas refletoras.

O trabalho teve também como foco a obtenção de um protótipo de baixo custo, utilizando componentes de fácil aquisição no mercado. Ele é composto por 4 lâmpadas de luz refletoras da marca Empalux com potências variadas de (40W, 60W e 100W) cada, construído em escala de bancada no Laboratório de Secagem e Recobrimento de partículas (LSRP) da UFPA.

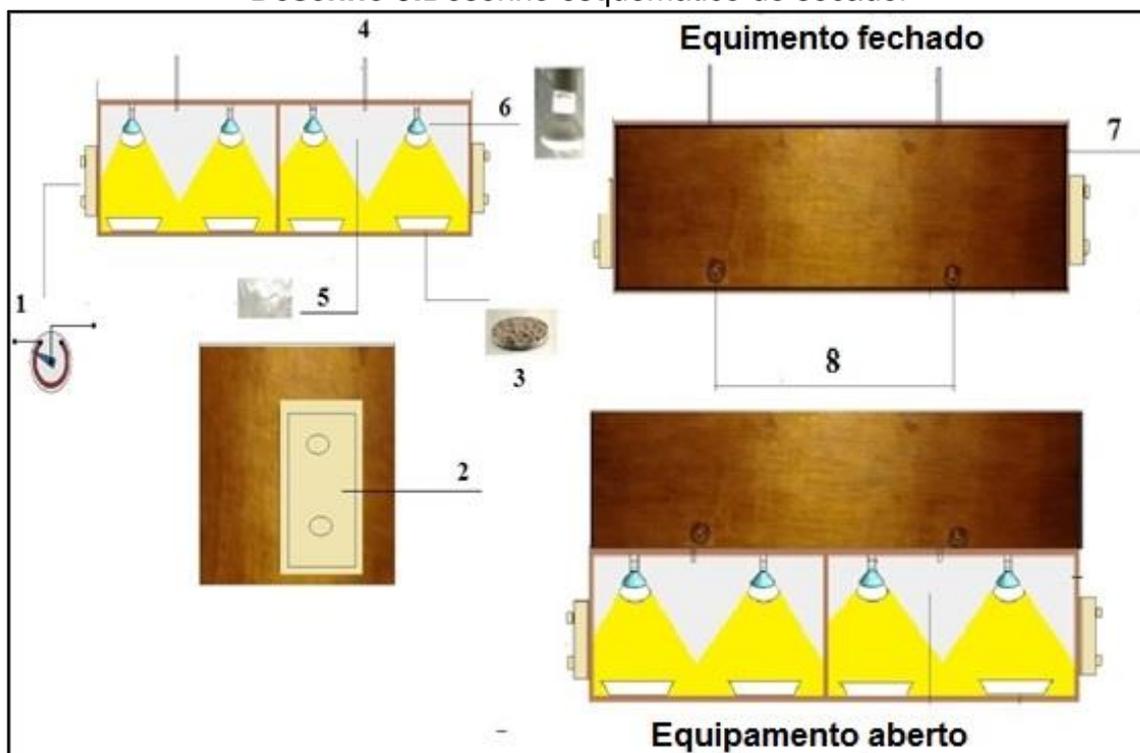
Apresenta corpo de madeira com dimensões de 100cm de comprimento, 28cm de largura e 39cm de altura, revestido por folhas de alumínio, duas resistências em cerâmica e um sensor de temperatura, termômetro da marca incoterm escala de (0°C a 160°C) e dois dímers da marca Hunter trade (127 V), para o melhor controle das temperaturas de secagem

Na Fotografia 5 e no Desenho 3 ilustram-se as principais características do secador. Na Fotografia 5 observa-se a esquerda as duas lâmpadas acesas com a energia luminosa incidindo sobre as amostras de Noni dispostas em bandejas circulares de alumínio. À direita nota-se o secador fechado com a parte superior dois termômetros no topo do secador.

Fotografia 5. Características do Secador



Desenho 3.Desenho esquemático do secador



- 1- Reostato
- 2- Dímer
- 3- Amostra para secagem
- 4- Termômetros
- 5- Superfície Refletora
- 6- Lâmpadas
- 7- Tampa de vedação
- 8- Puxadores

3.3.2 Intensidade Luminosa e quantidade de calor fornecida pelo secador

Os bons sistemas de iluminação em geral proporcionam uma luminância uniforme sobre toda a área do plano da superfície. A escolha e o posicionamento correto das luminárias têm uma importância determinante para a obtenção de uma iluminação que proporcione o máximo de luminosidade.

A energia fornecida a uma fonte de luz é convertida em calor e radiação, esta última nem sempre visível. O fluxo luminoso emitido pela lâmpada deve estar em conformidade com as dimensões, com a forma do ambiente em que elas serão instaladas e com o nível de iluminamento previsto para o local. (GHISI E.; TINKER J.,2010)

A tabela 9 , estabelece os parâmetros de luminosade calculados , para que se estabeleça o melhor desempenho do secador.Os valores de iluminancia, proporciado pelas lâmpadas,expressos em lux foram obtidos através do luxímetro digital Icel LD-500. Feita em seguida a conversão para o sistema internacional de unidade, ou seja candela (Cd).

Tabela 9 Grandezas luminosas fundamentais

Grandeza	Símbolo/unidade	Equação
Fluxo Luminoso	Φ (lm)	-
Intensidade Luminosa	IL (Cd)	$IL = I \times d^2$
iluminância	$ILux$ (lx)	$I = \frac{\phi}{A}$
Luminância	L (Cd)/m ²	$L = \frac{IL}{A \times \cos \alpha}$
Eficiência Energética	η (lm/w)	$\eta = \frac{\phi}{P}$

P= potência total das lâmpadas ;d= distância entre a fonte luminosa e as amostras;Área da superfície iluminada.

Para santos (2004) O fluxo de radiação absorvida pelo secador por unidade de área, em uma unidade de tempo é definida como o produto entre a energia luminosa incidente e a,área sendo expressa pela equação 3.4:

:

$$Q = I \times A \quad (3.4)$$

Q – Fluxo de calor fornecido pelo secador (Joule/s);

I – Intensidade Luminosa(w/m²);

A- Aréa total da superfície iluminada(m²)

3.3.3 Obtenção das Curvas de Secagem

As amostras foram cortadas manualmente e logo em seguida,levadas as corridas experimentais, após o descascamento de todo material e seleção dos melhores frutos.A secagem dos frutos,ocorreu nas temperaturas de 54 60, 75, 90 e 96°C e espessuras de 5, 6, 8, 10 e 11 mm, visando analisar a influência do tamanho das amostras sobre as respostas, conforme programado na matriz de planejamento

fatorial. Cada corrida, foi realizada por tempos de 12 h e as amostras do fruto dispostas em bandeja circular de alumínio de 150g de massa.

Se estabeleceu o controle das temperaturas de secagem conforme a potência das lâmpadas, para atingir à temperatura de 54°C, utilizou-se duas lâmpadas de 40W; para 60°C, uma lâmpada de 60 W outra de 40W; na temperatura de 75°C, foi utilizado duas lâmpadas 60W; para 90°C, uma de 60W e outra de 100W e na temperatura de 96°C, duas lâmpadas de 100W.

Para melhor exatidão das temperaturas de secagem desejadas, o fluxo luminoso das lâmpadas foi controlado com o dimer, sendo ajustadas em altas ou baixas intensidades luminosas.

A perda de massa do material se deu pela pesagem das amostras em tempos determinados no decorrer de todo o processo de secagem. O material foi pesado em média (350 g) primeiramente antes do início da corrida. Na primeira meia hora, de 10 em 10 minutos, de 20 em 20 minutos na hora seguinte e posteriormente de 30 em 30 minutos, até o tempo final estabelecido 12 h (720 min).

Após o término da secagem o material foi colocado em estufa com circulação forçada a 105° por 24h para obtenção da massa de sólido seco.

A obtenção das curvas de secagem e de fluxo de secagem foi realizada com o auxílio das Equações 3.5 e 3.6, e foram plotadas com os valores do teor de umidade adimensional (X_r), equação 3.7 em função do tempo de secagem (t).

$$X_{bs} = \left(\frac{m(t) - m_{ss}}{m_{ss}} \right) \quad (3.5)$$

$$W = - \frac{m_{ss}}{A} \frac{dx_r}{dt} \quad (3.6)$$

$$X_r = \frac{X_{bs}}{X_0} \quad (3.7)$$

Onde:

$m(t)$ - variação da massa de sólidos com o tempo, durante o processo de secagem;

m_{ss} - massa de sólidos secos, obtidos posteriormente por método direto de análise(kg);

X_{bs} - conteúdo de umidade em base seca (kg de água/kg de sólido seco);

X_0 - conteúdo de umidade inicial, no tempo $t = 0$, em base seca;

A - área superficial do produto exposta à secagem.

W . Período de taxa de secagem decrescente

A determinação das curvas de taxa de secagem (taxa de secagem em função do tempo e taxa de secagem em função da umidade, ou seja, W_r versus t e W_r versus X_r) está baseada na escolha do modelo que melhor ajusta os dados experimentais das curvas de cinética de secagem. As curvas de taxa de secagem são obtidas por meio da derivação das equações representativas das curvas de secagem (X_r versus t).

No período inicial, à taxa de secagem constante, a umidade superficial adimensional em função do tempo dada pela equação da reta (Equação 3.8):

$$X_r = a - b \cdot t \quad (3.8)$$

Os parâmetros a e b são estimados pelo método dos mínimos quadrados. Derivando-se a Equação 3.9 em relação a t e substituindo o valor encontrado na Equação 3.9, obtém-se o valor da taxa de secagem constante (W).

$$W = \frac{m_{ss}}{A} \cdot b \quad (3.9)$$

O período de taxa decrescente (W_0) foi obtido através da derivação das Equações 3.10 e 3.11 representativas dos modelos de Henderson e Pabis (1961) e de Midilli et al., respectivamente:

$$W_0 = \frac{m_{ss}}{A} \cdot [a \cdot k \cdot \exp(-k \cdot t)] \quad (3.10)$$

$$W_0 = \frac{m_{ss}}{A} \cdot [a \cdot k \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t] \quad (3.11)$$

Onde a , k , t , n e b são os parâmetros de Henderson e Pabis (1961) e Midilli et al. (2002). Com base nos cálculos mencionados obtém-se a taxa de secagem em função do tempo e o teor de umidade adimensional.

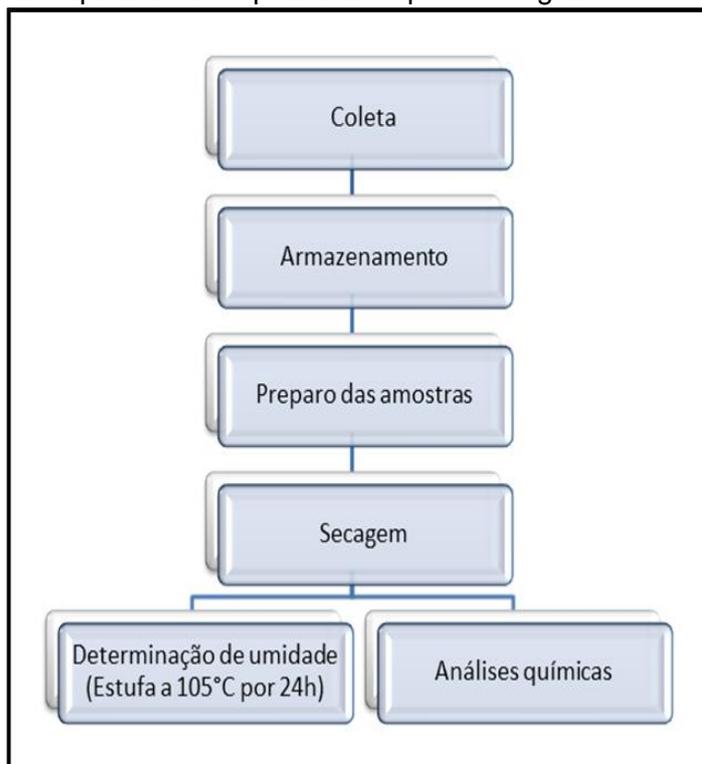
Os dados obtidos nas corridas, foram ajustados através de modelos matemáticos encontrados na literatura, conforme observado na Tabela 10. Os ajustes foram realizados, utilizando uma estimativa não linear, por meio do método dos mínimos quadrados, com auxílio do software *Statistica*® 7.0. A escolha do modelo mais adequado foi realizada com base nas estatísticas: coeficiente de determinação (R^2), desvio médio relativo (D) e pela análise dos gráficos da distribuição dos resíduos (aleatório ou tendencioso).

Emprega-se a técnica da MSR para otimização de processos de forma que haja um considerável número de variáveis de entrada capazes de influenciar nas respostas desejadas. Analisam-se os dados obtidos neste trabalho através do ajuste dos dados a modelos polinomiais de segunda ordem, a partir de planejamento fatorial composto por ponto central de dois fatores, com precisão uniforme.

Tabela 10. Modelos matemáticos utilizados para avaliar a cinética de secagem de *Morinda citrifolia* L

Modelo	Equação
Henderson e Pabis	$X_r = a \cdot \exp(-kt)$
Page Modificado	$X_r = a \cdot \exp(-kt)^n$
Midilli et al.	$X_r = a \cdot \exp(-kt^n) + b \cdot t$
Dois termos	$X_r = a \cdot \exp(-k_1t) + b \cdot \exp(-k_2t)$
Linear	$X_r = a - b \cdot t$
Page(1)	$X_r = a \cdot \exp(-kt)^n$
Wang e Singh	$X_r = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$
Logarítmico	$X_r = a \cdot \exp(-kt) + c$

Em cada corrida experimental foi realizada a sequência de atividades apresentadas no Fluxograma 1

Fluxograma 1. Sequência de experimentos para secagem de *Morinda citrifolia* L.

3.4 Determinação de compostos fenólicos totais e capacidade antioxidante

A determinação dos compostos fenólicos totais e a capacidade antioxidante das amostras secas de Noni foram realizadas pelos métodos Folin Ciocauteu e pelo método do DPPH•, respectivamente. Utilizou-se em cada método, dois tipos de extratos com dois tipos de solventes distintos para cada corrida experimental, a fim de verificar qual deles era mais eficiente nas respostas do planejamento experimental.

3.4.1 Preparação dos Extratos

Os extratos foram obtidos através da extração por solventes (ETANOL E ACETATO DE ETILA), a partir de 10 g de cada amostra (polpa, sementes e casca) do material seco, previamente trituradas, segundo metodologia de Vieira et al. (2011).

Para obtenção dos extratos etanólicos, pesou-se, aproximadamente 10g da amostra de cada corrida do planejamento experimental, em seguida, adicionou-se 100 ml do solvente etanol (C₂H₅OH), seguido de agitação em ultrassom por 20

minutos. A solução foi homogeneizada, devidamente filtrada e colocada em repouso, após obtenção do extrato, este sofreu evaporação em capela de exaustão, até a total eliminação do solvente. O extrato seco bruto obtido, foi ressuspenso com solvente (etanol), ajustando a concentração final para 20mg de extrato seco correspondente a 1 mL de solução. O mesmo procedimento foi realizado para obtenção dos extratos com o solvente acetato de etila ($C_4H_8O_2$).

3.4.2 Determinação dos compostos Fenólicos Totais (Método do Folin Ciocalteu)

A determinação dos compostos fenólicos totais ocorreu de acordo com o procedimento convencional espectrofométrico de Folin-Ciocalteu, desenvolvido por Singleton e Rossi (1965) e adaptado por Georgé et al. (2005). Este método baseia-se na redução dos ácidos fosfomolibdico e fosfotúngstico em solução alcalina. O aparecimento de coloração azulada produzida é diretamente proporcional ao teor de fenólicos presentes no material analisado e medido em comprimento de onda de 760nm. Os resultados obtidos foram calculados com base no ácido gálico como padrão.

Preparou-se a curva com solução padrão de ácido gálico e os resultados calculados e representados graficamente, utilizando a concentração em função da absorbância. Na curva padrão de ácido gálico, utilizou-se os seguintes reagentes: Folin-Ciocalteu, ácido gálico e carbonato de sódio (Na_2CO_3) e etanol (C_2H_5OH) com seis concentrações (0,0; 0,02; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; mg/ml) de ácido gálico, em triplicata. A medida de absorbância. As leituras das absorbâncias foram realizadas em espectrofotômetro (U.V Visível) da marca Biosystem, modelo T 70+ a 760nm.

Para a determinação do teor de fenólicos totais, o extrato 0,5 ml foi adicionado com 2,5 ml do reagente Folin-Ciocalteu (1:10) e 1,2 ml de Na_2CO_3 7,5% (m/v). Após 30 min de incubação no escuro fez-se as leituras em espectrofotômetro a 760 nm, juntamente com o branco contendo os mesmos reagentes menos a amostra. Os resultados do teor de compostos fenólicos totais foram expressas em mg de ácido gálico/g de amostra. (mg EAG/g de amostra)

3.4.3 Determinação da atividade antioxidante (método de captura de radicais DPPH•)

O método do DPPH• (2,2 difenil-1-picril-hidrazil) tem por base a redução do radical DPPH•, que ao fixar um H(removido do antioxidante em estudo), leva a uma diminuição da absorbância, permitindo calcular, após o estabelecimento do equilíbrio da reação, a quantidade de antioxidante gasta para reduzir 50 % do radical DPPH•.

Para a realização desse método foi adicionado a 1,5 ml de solução metanólica de DPPH• ($6 \times 10^{-5} \text{M}$), uma alíquota de 0,5 ml de cada extrato contendo diferentes concentrações de cada. Após 30 minutos de reação, fez-se a leitura em espectrofotômetro a 637nm, todas feitas em triplicata, acompanhadas de um controle (sem o antioxidante) e utilizando água destilada como branco.

Na curva de calibração se utilizou soluções metanólicas de Trolox nas seguintes concentrações: 1,0; 2,0; 3,0; 5,0 e 8,0 mg Trolox/ml. A atividade equivalente ao Trolox foi dada pela porcentagem de inibição de DPPH•.

A porcentagem de descoloração (sequestro) do radical DPPH pode ser calculada de acordo com a equação 3.12

$$AA (\%) = \left(\frac{\text{Abs controle} - \text{Abs amostra}}{\text{Abs controle}} \right) * 100 \quad (3.12)$$

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise da cinética de secagem

Através da elaboração do planejamento estatístico de experimentos, obtiveram-se dados experimentais da cinética de secagem de *Morinda citrifolia* L. o que possibilitou os ajustes da curva de secagem e taxa de secagem dos mesmos.

As curvas de secagem caracterizam-se por apresentarem períodos de secagem à taxa constante e à taxa decrescente, demonstrando que parte da umidade contida nas amostras é superficial, sendo as condições de secagem influenciadas pelas condições de operação ambientais e pela transferência de massa.

Os ajustes foram feitos através da análise dos gráficos de cinética (Apêndice 1), onde procurou-se identificar os períodos ante-crítico e pós-crítico, modelando-se a primeira fase da curva com a equação da reta (ajuste linear) e a segunda, com os modelos matemáticos contidos na Tabela 10 (não lineares). Utilizado o aplicativo *Statistica 7.0*, realizou-se uma análise de regressão, obtiveram-se os coeficientes de correlação para os modelos testados, tornando possível avaliar a qualidade de ajustes dos modelos aos dados experimentais.

Os resultados de influência das variáveis de entrada sobre as respostas, são geradas pelas saídas do software *Statistica 7.0* contendo as estatísticas que servem de ferramentas para a compreensão e interpretação dos fenômenos envolvidos e dos efeitos estimados para cada fonte de variação no processo de secagem de *Morinda citrifolia* L.

A faixa de conteúdo de umidade final variou de 0,01 a 3,50 kg de água/kg de sólido seco e 1,32% a 38,8%, em base úmida.

Conforme os valores obtidos para as estatísticas apropriadas, coeficiente de determinação e análise de resíduos, foram selecionados dois modelos: linear e os modelos (não-lineares) de Henderson e Pabis (1961) e de Midilli et al. (2002), pois apresentaram comparativamente os melhores resultados, valores de R^2 próximos de

1 (ou 100%), e obediência a todos os pressupostos estatísticos de avaliação da qualidade do ajuste de modelos matemáticos, ou seja, independência, normalidade e homocedasticidade dos resíduos.

4.1.1 Curvas de Secagem

Através dos ajustes anteriormente referidos (modelos semi-empíricos), obtivemos as curvas características de secagem e de taxa de secagem, visualizadas nos Apêndices A e B.

Os frutos de *Morinda citrifolia* L. foram submetidos a secagem por secador de radiação por lâmpadas de luz refletora. Os pontos experimentais das curvas de secagem podem ser observados nos gráficos contidos nos apêndices citados. Foram ajustados aos modelos de cinética de secagem indicados na Tabela 10 com auxílio do aplicativo *Statistica 7.0* e utilizando-se a estimativa não linear pelo método dos mínimos quadrados.

Por meio da análise das curvas de secagem e das taxas de secagem de Noni, constatou-se que a umidade diminui continuamente com o tempo de secagem e com o aumento da temperatura, concordando assim com os fundamentos teóricos da teoria de secagem (STRUMILLO e KUDRA, 1986). Pode-se verificar o efeito significativo da temperatura sobre as curvas de secagem, ou seja, com o aumento da temperatura, ocorre maior taxa de remoção de água do produto, fato observado por diversos pesquisadores para inúmeros produtos naturais (Mohapatra e Rao, 2005; Lahsas et al.; 2004; Midilli et al., 2002).

São observados períodos de umidade à taxa constante (linear) e à taxa decrescente (não-linear), sendo o primeiro mais duradouro que o segundo. O período constante é ajustado através do modelo linear empírico, enquanto que a parte correspondente ao período de taxa de secagem decrescente é representado satisfatoriamente por modelos não-lineares.

As corridas 3,4 e 5,11 e 12 apresentaram apenas umidade superficial e foi possível ser ajustada obedecendo a equação da reta, ou seja, por modelo linear. Esse comportamento ocorreu devido as condições operacionais do processo de secagem, ou seja as menores temperaturas do planejamento (54°C, 60°C e 75°C),

Já as corridas 1,2,6,7,8,9 e 10 se ajustaram aos modelos não-lineares de Henderson e Pabis (1961) e de Midilli et al. (2002), conforme os gráficos (38, 41,50,53,56,59,62 do Apêndice B.

Estas ultimas corridas,alcançaram teores de umidades de (2,32 a 0,20 kg de água/kg de sólido seco),ou seja ,obtiveram maior eficiência no processo de secagem com lâmpadas refletoras, alcançando a condição de equilíbrio apenas na corrida 6 a cerca de 600 minutos, resutado melhor que o obtido por POLA , et al (2011),que alcançou o mesmo resutado em um tempo de 900 min.

4.1.2 Curvas de Taxas de Secagem

Para obtenção das curvas de taxa de secagem, em função do tempo e do teor de umidade, derivou-se a equação representativa do modelo matemáticoque melhor ajustou os pontos experimentais da curva de secagem.

Através da observação dos gráficos (Apêndice A), podemos perceber que desde o inicio da operação ate 500 minutos de secagem os pontos apresentam comportamento linear,que indica a presença deumidade superficial; esta situação, acarreta uma taxa de secagem constante(W_0), melhor observadas nos gráficos(18,20,22,28 e 36), no Apêndice A

Após 500 min , as curvas de taxa de secagem apresentam comportamento decrescente(W_r).Assim, as curvas de taxa de secagem para os frutos de *Morinda citrifolia* L. são caracterizadas por dois períodos:o primeiro período com taxa secagem constante (umidade superficial) e outro com taxa de secagem decrescente (umidade interna), onde se alcançada a umidade de equilíbrio, a taxa de secagem se tornaria nula.

4.2 Resultado da determinação do teor de fenólicos e da capacidade antioxidante

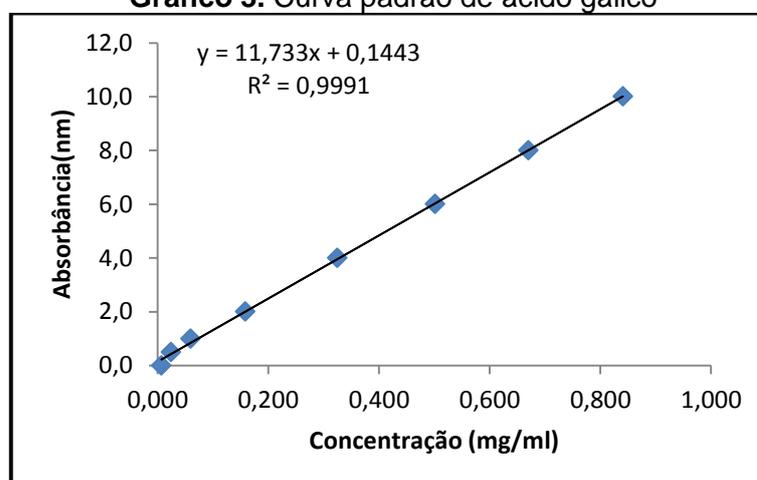
A determinação de fenólicos totais e capacidade antioxidante são respostas analisadas através de extratos distintos obtidos em concentraçõesconhecidas de 20mg/ml de *Morinda citrifolia*L.

4.2.1 Determinação de Fenólicos Totais

O extrato acetato de etilafoi o extrato mais eficiente na extração de fenólicos. Dentre os resultados obtidos, foi o que apresentou maior teor de compostos fenólicos (mgEAG/g). Os valores médios de compostos fenólicos totais variaram de 12,54 a 26,56 mgEAG/g, enquanto que, nos extratos alcoólicos, os resultados foram de 2,03 a 20,22mgEAG/g, o que torna a extração com acetato mais eficiente em relação ao álcool.

O gráfico 3 representa a curva padrão das concentrações de ácido gálico em função da absorbância.

Gráfico 3. Curva padrão de ácido gálico



A curva padrão do ácido gálico foi usada para expressar a quantidade de compostos fenólicos totais encontrados nas amostras, onde as leituras das absorbâncias são utilizadas na equação da reta para determinar a concentração em equivalentes de ácido gálico por grama de amostra.

Na Tabela 12 estão ilustrados o conteúdo de fenólicos totais para os extratos de acetato do Noni, no qual se pode constatar que nos extratos de acetato se obteve os melhores resultados para determinação de fenólicos.

O ácido gálico é um composto fenólico largamente encontrado em produtos vegetais e usualmente utilizado para expressar resultados para a análise de fenólicos totais pelo método de Folin-Ciocalteu. Chan-Blanco *et al.*, (2007) encontrou no extrato aquoso da polpa de Noni 51,1 mg/100g, nesse mesmo estudo foram ainda identificados os compostos fenólicos rutina e a escopoletina como componentes majoritários.

O valor de 26,56 mgEAG/g em extrato etanólicos encontrados neste trabalho foi próximo ao valor obtido porCorreia et al (2010), que ao estudar amostras de Noni cultivadas no ceará, apresentou conteúdo de compostos fenólicos totais (21,67mg de EAG/g) em extratos etanólicos.

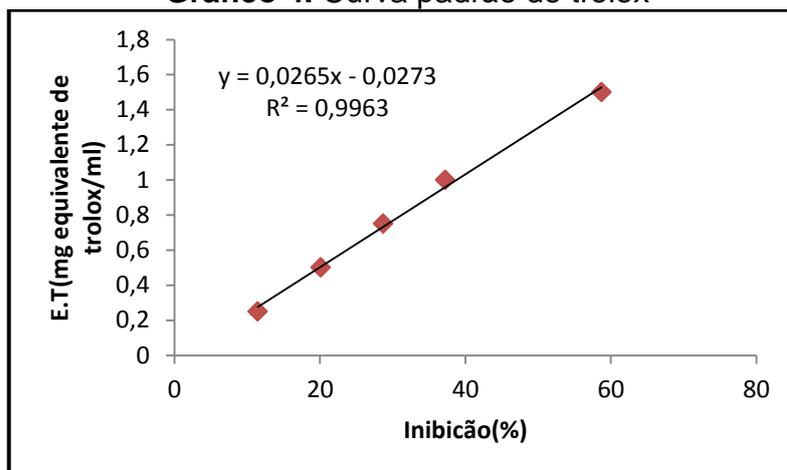
Os resultados da extração com acetato foi bem superior ao apresentado por DUDUKU KRISHNAIAH (2013) que Avaliando teor de fenólicos totais em *Morinda citrifolia*, L., encontrou no extrato metanólico de Noni 43,18 mg ácido gálico /10 g de amostra.

Pode-se inferir de acordo com esses resultados que o extrato etanólico do Noni possui teor considerável de fenólicos totais, contudo, os extratos de acetato apresentam melhores resultados

4.2.2 Determinação da Capacidade Antioxidante

A determinação da atividade antioxidante pelo método DPPH• foi expressa como valor TEAC (Atividade Antioxidante Total Equivalente ao Trolox) em comprimento de onda de 637 nm. O percentual de descoloração vai indicar o potencial antioxidante de cada extrato, a habilidade do antioxidante em seqüestrar radicais livres será inversamente proporcional ao valor do trolox, que é a quantidade de antioxidante capaz de seqüestrar metade dos radicais livres DPPH presentes em solução. Quanto menor o valor de trolox, maior a atividade do antioxidante, menor quantidade de extrato será necessária para reduzir em 50% do radical livre DPPH.

Para a determinação do equivalente de trolox, é muito importante que seja realizado uma curva em escala linear para cada extrato (Gráfico 4). Portanto, para todas as amostras foi realizada uma curva com dez pontos distintos, onde a concentração variou de acordo com o tipo de amostra e obteve-se para todas as amostras um $r^2 > 0,99$, no intuito de além de se obter o equivalente de trolox /ml e avaliara linearidade de cada um, e a partir dele (trolox) obter o valor de AA (Atividade Antioxidante). No presente estudo, avaliou-se a capacidade dos extratos (alcoólico e acetato de etila) sequestrar o radical DPPH•. Os resultados da atividade antioxidante foram expressos em mg trolox/g amostra dos extratos do fruto.

Gráfico 4. Curva padrão de trolox

E.T= Equivalente de trólox

Os valores encontrados demonstram que o extrato de acetato mostrou maior capacidade de absorção de substâncias antioxidantes (13,50 a 26,56mg trolox/g amostra), em relação ao o extrato etanólico. Mesmo assim, a atividade antioxidante do extrato etanólico, foi superior, quando comparada a outros frutos. O maior valor encontrado foi para o extrato alcoólico da polpa (20,34mg trolox/g amostra).

Os compostos fenólicos e antioxidantes do Noni em extrato alcoólico equivalente ao trolox(mgTrolox/g de amostra) apresentaram valores bem acima da média dos valores encontrados em outros frutos, tais como a amora que a média foi de 4,3, a polpa de uva com média 7,0, a polpa de açaí com média de 6, a polpa de goiaba com média de 5,9, a polpa de morango com média de 9,2 , a polpa de graviola com média de 2,88, a polpa de cupuaçu com média de 0,73

REZENDE , et al. 2010 Determinou capacidade antioxidante no suco fermentado de Noni utilizando extratos de etil-acetato e 1-butanol. O resultado obtido foi inferior encontrado neste trabalho. No trabalho de Yang *et al.* (2007), foi determinada a atividade antioxidante de compostos fenólicos contra radicais livres no suco fermentado e suco do fruto maduro. Os autores concluíram que a elevada atividade antioxidante do Noni está relacionada aos compostos fenólicos presentes no fruto.

A atividade antioxidante do Noni é de 77,86, Concluindo que o Noni possui elevada capacidade em combater radicais livres de DPPH

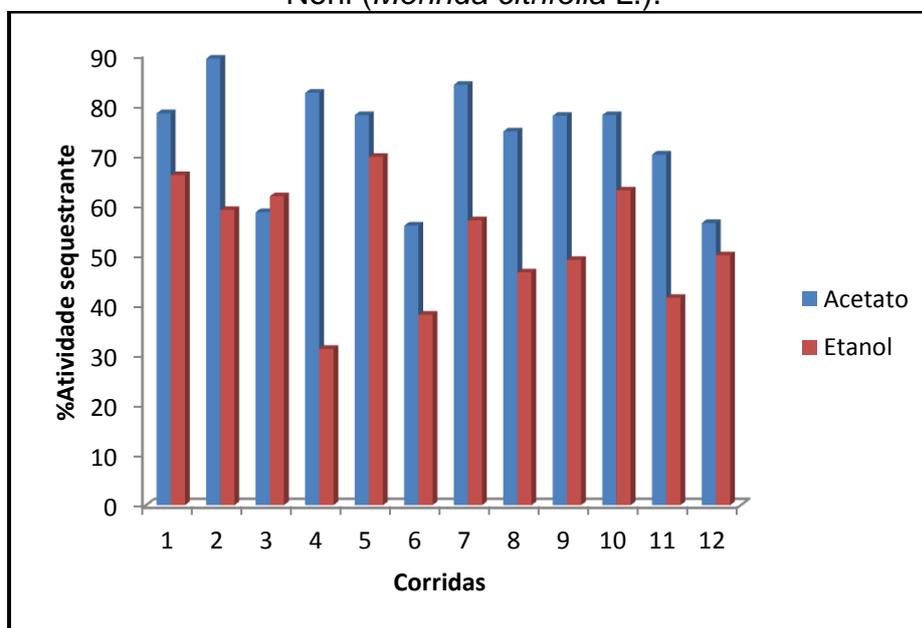
4.2.3 Sequestro do Radical Livre (%SRL)

Em relação ao SRL, os extratos são classificados com forte (acima de 70%), moderada (70 – 50%) e fraca (abaixo de 50%) capacidade de sequestro (MELO et al., 2008). Todos os extratos com acetato de etila tiveram maior capacidade em sequestrar radicais DPPH•, a maioria com a classificação forte. Já nas extrações com álcool, a classificação ficou entre moderado e baixo, o que confirma a melhor eficiência da extração em relação a capacidade antioxidante.

Análise dos resultados do % SRL (percentual de sequestro de radicais livres) da escopoletina isolada do jenipapo, nas concentrações de 50 e 100 µg/mL, mostra que esta substância apresenta baixa capacidade de sequestro de radical. Desta forma, verifica-se que a escopoletina apresentou baixa atividade.

O gráfico 5 representa a comparação da atividade sequestrante de radicais livres nos extratos alcoólicos e de acetato de etila

Gráfico 5 Representação gráfica da % SRL dos diferentes extratos do fruto do Noni (*Morinda citrifolia* L.).



Ao avaliar a %SRL de diferentes frutas, Melo et al. (2008) encontraram fraca capacidade desequestrar o DPPH• para melancia, melão orange, manga rosa, manga espada e a pinha. Já KUSKOSK et al. (2005) destacaram a polpa de acerola e pinha, que apresentaram maior e menor %SRL, respectivamente.

A capacidade de sequestro do radical livre dos extratos etanólicos foi bem inferior quando comparada com os extratos de acetato, considerada moderada a suas capacidades de sequestro, que é diretamente proporcional à atividade antioxidante das amostras

4.3 Determinação dos parâmetros fotométricos necessários para o funcionamento do secador

A tabela 11 estabelece os resultados calculados dos parâmetros de luminosidade e calor produzidos pelo secador de lâmpadas refletoras conforme as temperaturas estabelecidas no planejamento.

É de grande importância conhecer os princípios e métodos da fotometria e colocá-los em prática, a fim de analisar os parâmetros de iluminação. Na determinação do fluxo luminoso necessário para se obter um nível de iluminação médio desejado no plano de trabalho. Isto porque a lâmpada utiliza apenas 20% da energia que consome para gerar luz, o restante é dissipado em forma de calor.

Tabela 11: Parâmetros Fotométricos(grandezas luminosas) e Quantidade de Calor Produzidos pelo Secador de lâmpadas Refletoras.

Temperatura (°C)	Parâmetros Fotométricos						Quantidade de calor
	P (w)	ϕ (lúmens)	I (Lux)	IL (Cd)	η (lm/w)	L (cd/m ²)	Q (j/s)
54°C	80	1032	4340	432,62	12,9	6,50	28800
60°C	100	1380	5120	557,68	13,8	8,34	360000
75°C	120	1728	7720	840,70	14,4	12,58	432000
90°C	160	2504	8230	896,24	15,65	13,42	576000
96°C	200	3280	9830	1070	16,4	16,02	720000

P:Potência das lâmpadas; ϕ :Fluxo Luminoso;L:Intensidade luminosa; η :Eficiência luminosa; L:luminância,Q:Quantidade de calor produzida pelo secador

A relação apresentada acima serve para determinar o fluxo luminoso total que as lâmpadas a serem instaladas devem emitir no secador para que alcance um

determinada temperatura de secagem , ou seja , quanto maior o fluxo luminoso, maior a temperatura alcançada no processo de secagem maior a quantidade de calor produzida pelo secador.

Esta relação também depende das características do secador, pois quanto maior for a área exposta a secagem, maior deverá ser o número de luminárias para que um mesmo nível de iluminação seja atingido, ou seja, maior deve ser o fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas. Logo, no cálculo do fluxo luminoso deve-se considerar a área do secador.

A quantidade de calor produzida pelo secador é diretamente ligada aos parâmetros fotométricos das lâmpadas. Pode-se notar que parte do fluxo luminoso emitido é absorvido pela luminária, parte é transformada em calor. Dessa forma, ao dimensionar a quantidade de lâmpadas ideal a uma determinada temperatura de secagem de um determinado produto, deve-se levar em consideração a eficiência da lâmpada , as dimensões do secador, a intensidade luminosa produzida pelas lâmpadas e a refletância de suas paredes.

4.4 Planejamento experimental do processo de secagem

4.4.1 Planejamento experimental do processo de secagem

As corridas foram realizadas de acordo com a matriz de planejamento na Tabela 12. Ela representa a matriz de experimentos gerados por um planejamento composto central rotacional (PCCR), com quatro corridas provenientes do planejamento fatorial do experimento, 4 corridas correspondentes a parcela axial e mais 4 repetições no ponto central, totalizando 12 corridas experimentais contendo variáveis de entrada codificadas e variáveis e resposta. Realizou-se a randomização das corridas, procurando desta forma, minimizar os erros experimentais. As análises estatísticas foram efetuadas com auxílio do Software Statistica 7.0

A Matriz de planejamento, observada na Tabela 12 mostra a sequência das corridas em ordem padronizada, em que são apresentadas as variáveis de entrada (reais e codificadas com seus respectivos níveis) e das variáveis de resposta teor de umidade final, teor de fenólicos totais e da capacidade antioxidante de *Morinda citrifolia* L. Completam a Tabela 12, embora não analisadas como resposta, as

variáveis dependentes X_{bu} (teor de umidade em base úmida, %) e X_r (razão de umidade, adimensional).

Tabela 12 Matriz de planejamento do PCCR com suas respostas

Ensaio	Variáveis de Entrada Codificadas		Variáveis de Entrada Reais		Variáveis de Resposta				
	X_1	X_2	T	E	X_{bs}	X_{bu}	X_r	TF	AA
01	-1	-1	60	6	2,32	33,51	0,40	20,51	66,73
02	1	-1	90	6	0,20	2,20	0,02	26,56	76,37
03	-1	1	60	10	2,60	38,17	0,45	12,54	23,12
04	1	1	90	10	0,92	12,01	0,14	24,62	77,45
05	-1,41	0	54	8	3,50	35,87	0,40	13,50	53,21
06	1,41	0	96	8	0,01	1,32	0,01	22,98	77,86
07	0	-1,41	75	5	0,17	1,61	0,02	20,32	65,46
08	0	1,41	75	11	0,45	5,40	0,06	22,82	74,46
09	0	0	75	8	0,23	2,82	0,03	21,05	76,15
10	0	0	75	8	0,38	4,42	0,05	23,80	68,00
11	0	0	75	8	0,13	1,44	0,02	19,46	75,61
12	0	0	75	8	0,67	8,12	0,09	14,77	57,25

X_1 : Variável temperatura codificada, X_2 : Variável espessura codificada, T: Temperatura (°C), E: Espessura (mm), X_{bs} : Teor de umidade em base seca (kg água/kg ss); X_{bu} : teor de umidade em base úmida (%); X_r : razão de umidade (adim), TF: teor de fenólicos (mg AG/100g), AA: atividade antioxidante(%)

Para o planejamento experimental, análise e interpretação dos dados para todas as variáveis de resposta, foi considerado uma confiança de 95%, que equivale a um nível de significância $\alpha = 0,05$.

4.4.2 Resultados para a variável de resposta teor de umidade final - X_{bs}

a) Efeito das variáveis de entrada sobre a resposta X_{bs}

Esses efeitos, ou influências, são quantificados na Tabela 13, onde a magnitude dos efeitos de cada fonte de variação, ou seja, as variáveis operacionais de entrada são comparadas com seus respectivos erros, considerando-se o nível de significância $\alpha = 0,05$

Tabela 13. Estimativa dos efeitos para variável de resposta X_{bs}

Efeitos	Valores Estimados	Erro
Média	0,34499	$\pm 0,183809$
Efeitos principais		
X_1	-2,17865	$\pm 0,260335$
X_2	0,34561	$\pm 0,260335$
Efeitos quadráticos		
$(X_1)^2$	1,65169	$\pm 0,291844$
$(X_2)^2$	0,19893	$\pm 0,291844$
Interação binária		
X_1X_2	0,22945	$\pm 0,367621$

Analisando-se a Tabela 13, percebe-se que apenas a variável de entrada temperatura (X_1), nas formas linear e quadrática, são estatisticamente significativas para a resposta X_{bs} , pois seus efeitos comparativos ao erro são maiores, em módulo, mostrando que estes não ocorrem simplesmente devido a erros operacionais, mas sim de efeitos consideráveis na resposta devido a modificações propositais em seus níveis.

A variável X_1 proporcionou um efeito negativo na resposta teor de umidade final, isto é, aumentando-se os níveis, do mais baixo (-1) ao mais alto (+1), da variável independente X_1 promove-se um decréscimo, em média, de 2,18 kg de água/kg de sólido seco no teor de umidade final, o que é desejável.

As demais variáveis e a interação binária não foram estatisticamente significativas para a variável de resposta, pois seus efeitos são menores ou da mesma ordem de grandeza do erro.

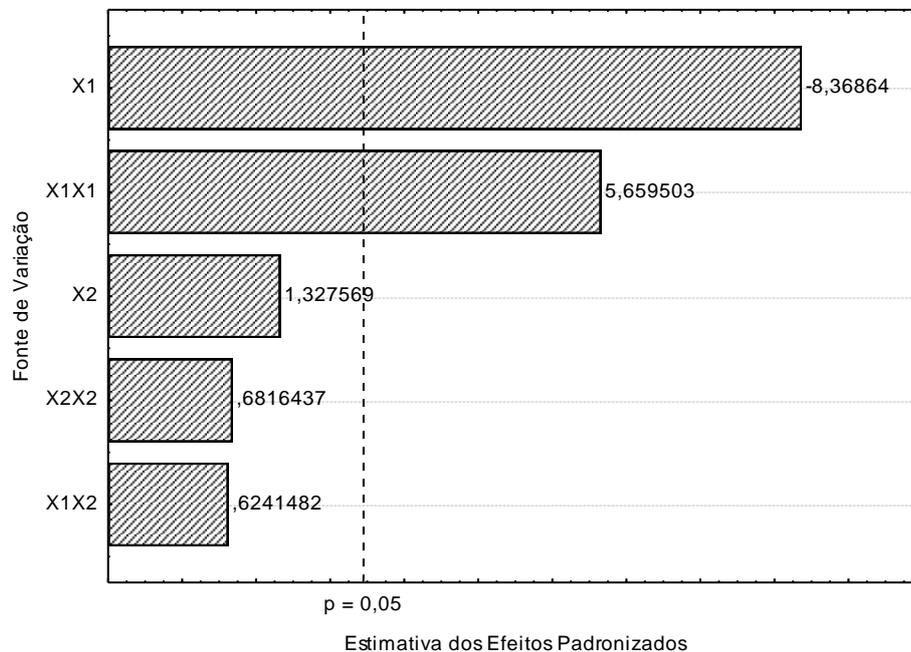
b) Gráfico de Pareto

O Gráfico 6 representa o diagrama de Pareto, ou seja, a representação gráfica dos efeitos padronizados, individuais ou combinados, na forma de um gráfico de barras. A linha vertical que corta os efeitos é indicativa do limite de rejeição da hipótese nula ($\alpha = 0,05$), devendo assim ser considerados, para a avaliação das respostas, apenas os efeitos localizados a direita desta reta.

Pode-se considerar neste diagrama, a maior influencia sofrida pela resposta X_{bs} pelos efeitos de X_1 e X_1^2 (temperatura, efeito linear e quadrático), ambos

interceptados pela reta vertical que indica que o limite de rejeição da hipótese nula para $\alpha = 0,05$.

Gráfico 6 Gráfico de barras dos efeitos individuais e combinados para X_{bs}



c) Análise de variância (ANOVA)

Na ANOVA a probabilidade de significância ou nível descritivo (valor de p) indica a probabilidade que cada variável possui de não ser considerada estatisticamente significativa para a variável de resposta, ou seja, de estar na região de aceitação de hipótese nula, situação na qual os efeitos são considerados apenas ruído ou erros aleatórios, ou seja, estatisticamente não significativos.

A análise de variância mostrada na Tabela 14 denota a uma avaliação para uma determinação mais consistente da significância dos efeitos estimados das variáveis de entrada na resposta teor de umidade final. A estatística F e o nível descritivo p , são as ferramentas utilizadas nas análises dos efeitos das variáveis operacionais sobre a resposta a ser analisada. De acordo com a Tabela 13, a variável temperatura é influente na resposta para a uma significância de 5%. Verifica-se ainda que o efeito das variáveis X_1 e X_1^2 está fora da região de hipótese nula, visto que o valor de $p < 0,05$. Isto confirma a influência estatisticamente significativa no teor de umidade final X_{bs} .

As fontes de variação dadas pelas variáveis X_2^2 e a interação binária X_1X_2 pertencem à região aceitação da hipótese nula, e conseqüentemente não têm efeito significativo para a resposta X_{bs} .

Tabela 14. Análise de variância para a variável de resposta X_{bs}

Fonte de Variação	SQ	GL	MQ	F	p
X_1	9,46478	1	9,464781	70,03415	0,000158
X_1^2	4,32870	1	4,328699	32,02998	0,001308
X_2	0,23819	1	0,238185	1,76244	0,232595
X_2^2	0,06279	1	0,062794	0,46464	0,520893
X_1X_2	0,05265	1	0,052647	0,38956	0,555503
Erro	0,81087	6	0,135145		
Total	14,92166	11			

SQ: soma quadrática; GL: graus de liberdade; MQ: média quadrática, F: estatística de Fisher-Snedecor; p: probabilidade de significância.

d) Modelo de segunda ordem para a resposta X_{bs}

Através do método dos mínimos quadrados, sub-rotina *quasi-Newton* do aplicativo *Statistica 7.0*, foram obtidos os coeficientes de regressão das variáveis de entrada e suas respectivas combinações na resposta X_{bs} (modelo completo).

Na Tabela 15 estão indicados os coeficientes e regressão do modelo proposto para o teor umidade final, em base seca, e os correspondentes erros-padrão obtidos por meio da análise de regressão múltipla.

O modelo proposto para X_{bs} consiste de um polinômio de segunda ordem completo, com as variáveis independentes codificadas, conforme a Equação 5.1:

$$X_{bs} = 0,34499 - 1,08932X_1 + 0,82585X_1^2 + 0,17281X_2 + 0,09947X_2^2 + 0,11472X_1X_2 \quad (5.1)$$

Tabela 15. Coeficientes de regressão para a resposta X_{bs}

Variáveis	Coeficientes	Erros-padrão
Média	0,34499	0,183809
X_1	-1,08932	0,130167
X_1^2	0,82585	0,145922
X_2	0,17281	0,130167
X_2^2	0,09947	0,145922
X_1X_2	0,11472	0,183811

O modelo proposto para a resposta X_{bs} apresentou um coeficiente de determinação R^2 igual a 0,9457 indicando que a equação de regressão proposta é capaz de explicar 94,57% das variabilidades experimentais.

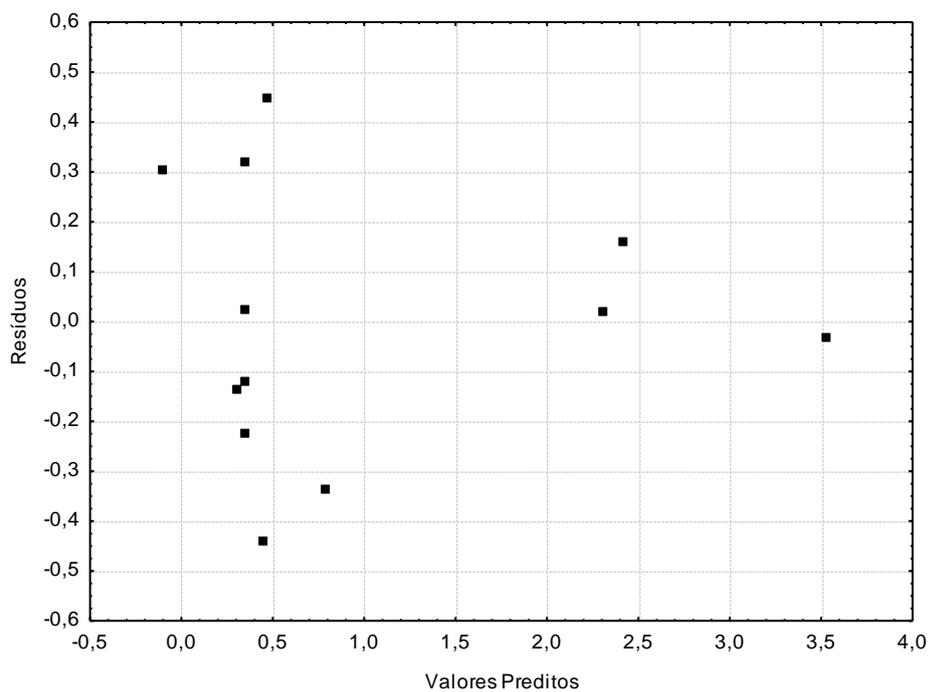
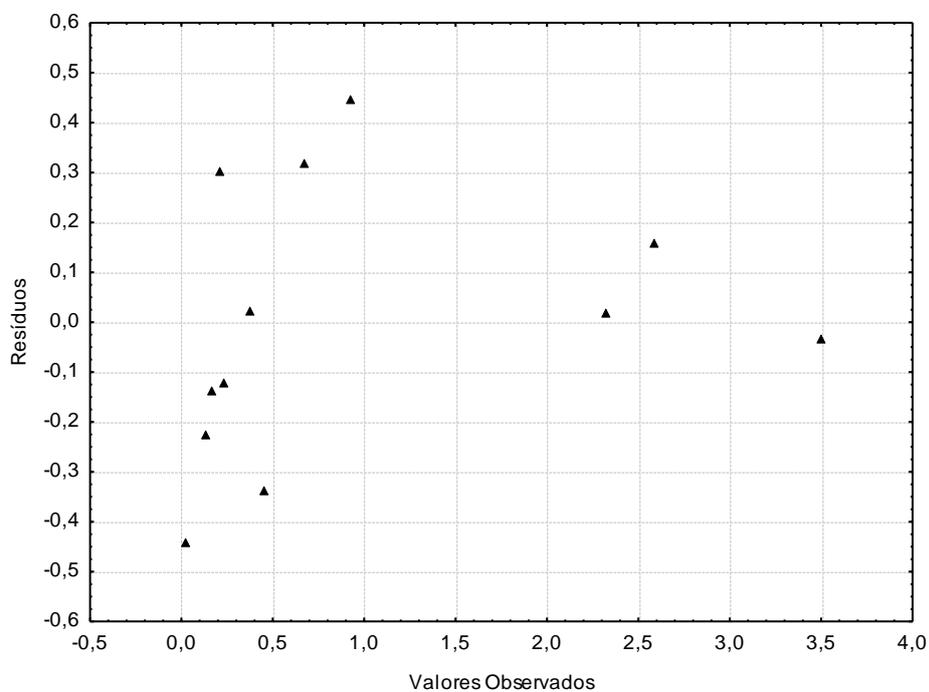
Os valores de X_1 e X_2 são correlacionados com as variáveis originais, por meio das Equações 5.2 e 5.3, respectivamente:

$$X_1 = \frac{T - 75}{21} \quad (5.2)$$

$$X_2 = \frac{E - 8}{2} \quad (5.3)$$

g) Análise dos resíduos

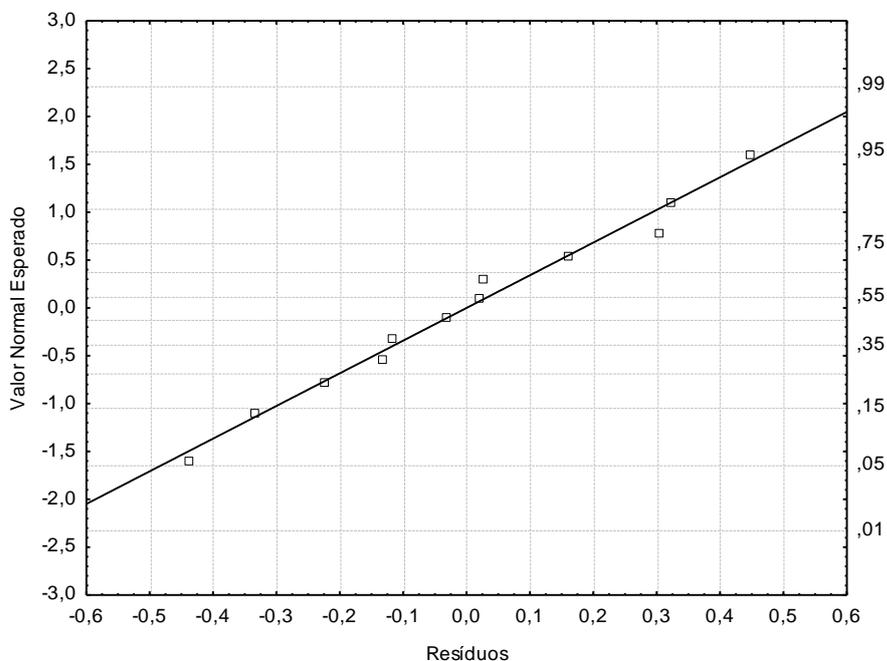
A análise de resíduos foi realizada com base nos Gráficos 7 e 8. Observa-se que os resíduos são baixos e sua distribuição em torno do zero apresenta comportamento aleatório, mostrando que os mesmos são independentes dos valores preditos e observados, respectivamente.

Gráfico 7 Distribuição de resíduos para X_{bs} .**Gráfico 8** Distribuição de resíduos para X_{bs} .

No gráfico de probabilidade normal dos resíduos (Gráfico 9) nota-se que os pontos encontram-se localizados próximos e ao longo de uma reta, o que indica que

os componentes de erro do modelo proposto seguem uma distribuição de probabilidade normal para a resposta X_{bs} .

Gráfico 9. Testede probabilidade normal dos resíduos para X_{bs}

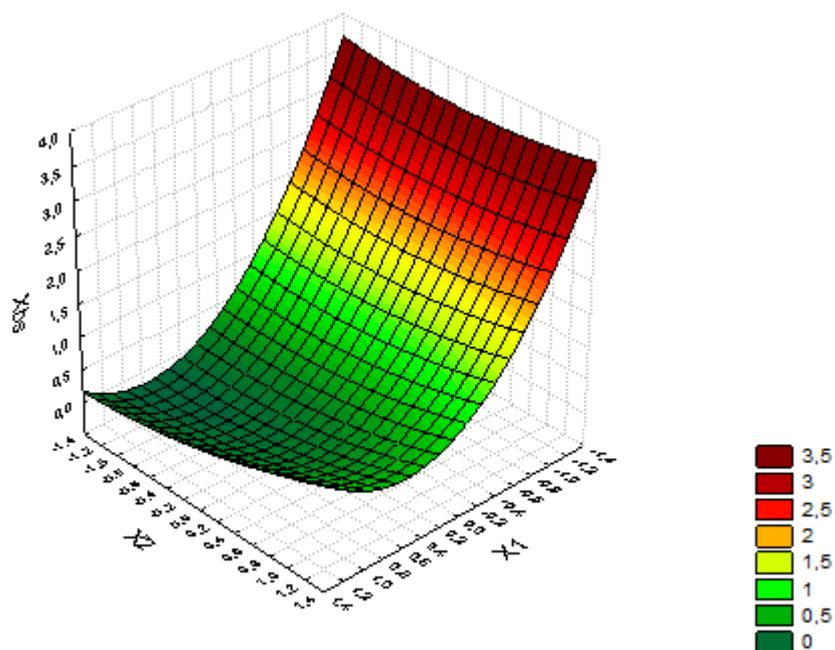


h) Análise da superfície de resposta e das curvas de nível

A superfície de resposta gerada a partir do modelo de segunda ordem ajustado aos dados experimentais para a variável de resposta teor de umidade final em base seca (X_{bs}) via *Statistica 7.0*.

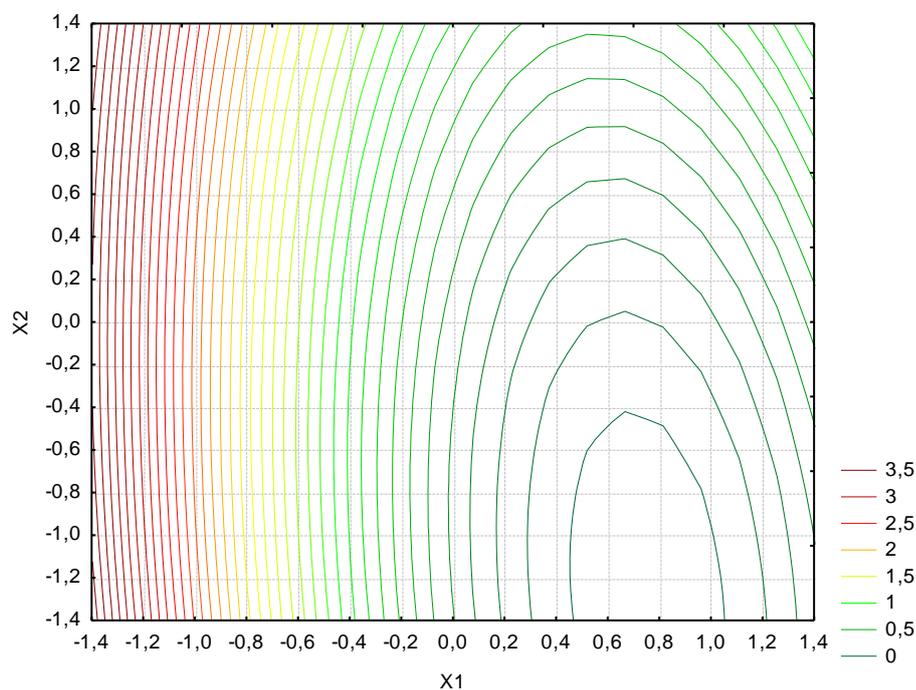
Nas representações gráficas a seguir (Gráficos 10 e 11) constam a superfície de resposta e as correspondentes curvas de nível, ou contornos, em função das variáveis de entrada codificadas X_1 e X_2 , embora os valores das variáveis nos gráficos estejam representados em unidades originais. Os Gráficos 10 e 11 representam a superfície de resposta e contornos, respectivamente. No Gráfico 11 têm-se uma melhor visualização do ponto ótimo de operação para a resposta X_{bs} .

Gráfico 10. Superfície de resposta para umidade final X_{bs} em função de X_1 e X_2



Percebe-se claramente pela análise do Gráfico 10 que o aumento do valor da variável X_1 , temperatura de secagem, propicia um decréscimo no teor de umidade final, favorecendo desta forma o processo de secagem, para praticamente toda a faixa de valores observados para X_2 , espessura do material.

Na análise do Gráfico 11, que consiste das curvas de nível, constata-se que, não para toda a faixa de valores de X_2 como genericamente dito acima, mas especificamente para espessuras iguais e abaixo de 0 ($E \leq 8$ mm) e para temperaturas no intervalo de 0,4 a 1,0 ($83^\circ\text{C} \leq T \leq 90^\circ\text{C}$), constitui as condições operacionais que podem promover produtos finais com os menores teores de umidade, o que é desejável.

Gráfico 11. Curvas de nível para X_{bs} em função de X_1 e X_2 

4.4.2 Resultados para a variável de resposta capacidade antioxidante - AA

a) Análise de variância (ANOVA)

A resposta capacidade antioxidante não se mostrou estatisticamente significativa em função das variáveis de entrada para o domínio experimental praticado neste trabalho.

A Tabela 16 representa a análise de variância para a resposta AA onde se verifica que nenhum valor de p é menor do que 0,05 a não ser o valor correspondente a X_1 , que é significativo apenas ao nível de significância $\alpha = 0,10$; ou seja, para uma confiança de 90%

Tabela 16. Análise de variância para a resposta atividade antioxidante - AA

Efeitos	SQ	GL	MQ	F	p
X_1	669,425	1	669,4251	3,920641	0,095016*
X_1^2	331,310	1	331,3100	1,940393	0,213048
X_2	111,662	1	111,6620	0,653974	0,449564
X_2^2	1,1489	1	1,1489	0,006729	0,937290
X_1X_2	499,314	1	499,3136	2,924344	0,138106
Erro	1024,463	6	170,7438		
Total	2642,759	11			

*efeitosignificativo ao nível de 10% ($\alpha = 0,10$)

4.4.3 Resultados para a variável de resposta teor de fenólicos - TF

Para a resposta teor de fenólicos, a única variável que se mostrou estatisticamente significativa ao nível de 5% ($\alpha = 0,05$) foi X_1 (temperatura de secagem). Verifica-se o efeito significativo para TF pelo valor de p menor do que 0,05. Verifica-se também na Tabela 17 que o valor calculado da estatística de Fisher-Snedecor, $F_{\text{calc}} = 10,52$ quando comparado com o valor crítico (tabelado) igual a $F_{0,05;1, 6} = 5,99$ indica que o efeito é significativo pela rejeição da hipótese de que os efeitos são iguais a zero (hipótese nula), ou seja, $F_{\text{calc}} > F_{\text{crítico}}$ implica em efeito significativo (BOX, HUNTER e HUNTER, 1978).

a) Análise de variância (ANOVA)

Tabela 17. ANOVA para a resposta teor de fenólicos - TF

Efeitos	SQ	GL	MQ	F	p
X_1	124,4871	1	124,4871	10,52466	0,017594
X_1^2	1,4476	1	1,4476	0,12239	0,738409
X_2	5,1006	1	5,1006	0,43123	0,535747
X_2^2	9,0958	1	9,0958	0,76900	0,414256
X_1X_2	9,0812	1	9,0812	0,76776	0,414609
Erro	70,9688	6	11,8281		
Total	222,0956	11			

4.5 Estimativa da condição ótima do processo de secagem

A estimativa da condição ótima para a secagem de *Morinda citrifolia* L. foi realizada com o auxílio da técnica de otimização simultânea denominada “Função de Desejabilidade” proposta por Derringer e Suich (1980) e descrita em Barros Neto, Scarminio e Bruns (2007).

A desejabilidade global foi analisada utilizando uma grade de 60 pontos para cada uma das três variáveis independentes, ou seja, os valores das respostas e respectivas desejabilidades foram calculados em 603 combinações de níveis para os fatores.

A técnica de otimização simultânea é baseada na transformação de uma função desejabilidade para cada variável de resposta, com valores descritos entre 0 e 1, onde 0 representa um valor completamente indesejado e a resposta transformada em 1 o valor mais desejável.

A Tabela 18 apresenta os limites estabelecidos para os parâmetros avaliados, via software *Statística 7.0*, necessários à otimização do processo de secagem do material, onde são especificados os valores numéricos para os valores mínimo, médio e máximo que determinam a importância da função para encontrar o valor ótimo para as respostas X_{bs} , AA e TF.

Tabela 18. Parâmetros para a otimização das respostas do processo de secagem

Condições para as Respostas	Valores atribuídos na otimização	
	Mínimo	Máximo
Teor de umidade (X_{bs})	0,01311	3,4913
Teor de fenólicos (mgEag/g)	12,541	26,564
Capacidade antioxidante (mg Trolóx/g)	23,124	77,856

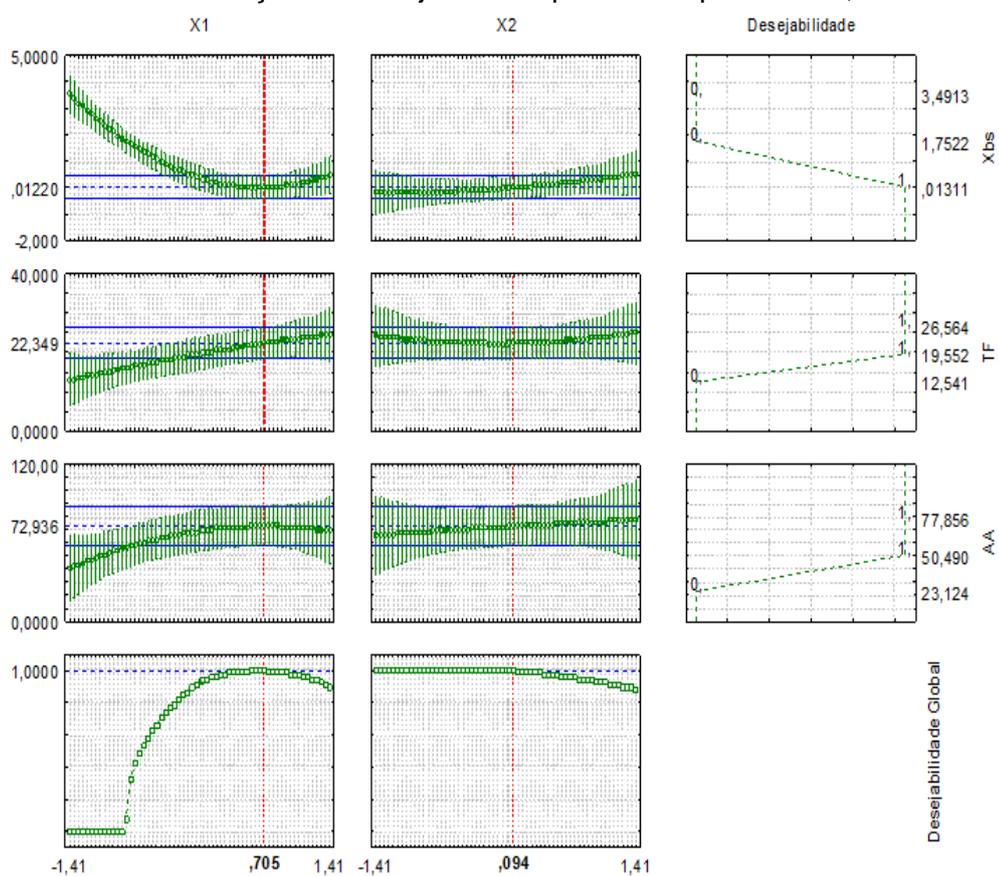
O Gráfico 12 representa o digrama da Função de Desejabilidade para a descrição das condições otimizadas na secagem de Noni por radiação com lâmpadas refletoras, dentro das faixas e valores estabelecidos nos ensaios experimentais. A análise do Gráfico 15 indica que a Função de Desejabilidade Global possui um valor otimizado em 1,00 que de acordo com a classificação ilustrada na Tabela 7, de Akhanazarova e Kafarov (1982), o valor de D igual a 1,00 é considerado aceitável e excelente.

As condições ótimas são apresentadas de forma codificada de acordo com o planejamento (Gráfico 11), sendo alcançadas quando a temperatura do material indicadas pelas as linhas tracejadas verticais em vermelho que mostram as condições de máxima Desejabilidade Global. Para a obtenção do Gráfico 11, via software *Statística*, usou-se $s = t = 1$ e fator de grade igual a 60.

Verifica-se no Gráfico 12 que para se obter teor de umidade de 0,0122 kg de água /kg de sólido seco; 22,349 mgEag/g de fenólicos e 72,936% de capacidade antioxidante, é necessário que as variáveis operacionais de entrada sejam mantidas nos valores codificados $X_1 = 0,705$ e $X_2 = 0,094$. Em valores reais, de acordo com as equações de conversão (Equações 5.2 e 5.3) equivalem à temperatura de secagem

igual a 89,81°C (~90°C) e 8,19 mm (~8 mm), que se encontram na faixa das condições operacionais que podem promover produtos finais com os menores teores de umidade, conforme discutido na análise das curvas de nível para a resposta X_{bs} (Gráfico 11).

Gráfico 12. Função de Desejabilidade para as respostas X_{bs} , TF e AA



CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

As conclusões a respeito do processo de secagem de *Morinda citrifolia* L. em secador de radiação com lâmpadas refletoras, nas condições operacionais, são sumarizadas a seguir:

Durante a execução dos experimentos foi realizado o estudo da cinética de secagem nos frutos em rodela de diferentes espessuras mostrou que o mesmo possui umidade superficial;

Para a determinação da perda de massa durante a secagem foram avaliados modelos lineares e não-lineares de dois e três parâmetros, os quais mostraram-se eficientes para descrever a cinética de secagem, gerando valores de conteúdo de umidade confiáveis, de acordo com testes estatísticos de qualidade dos modelos de regressão;

Um modelo polinomial de segunda ordem foi utilizado para descrever os efeitos das variáveis operacionais significativas: temperatura e espessura da amostra nas respostas teor de umidade final;

A faixa de conteúdo de umidade final variou de 0,01 a 3,50 kg de água/kg de sólido seco e 1,32% a 38,8%, em base úmida. Os valores médios de compostos fenólicos totais variaram de 12,54 a 26,56 mgEAG/g amostra e para capacidade Antioxidante o valor foi de 23,12 a 77,86 mg de Trólox/g de amostra, dentro do domínio experimental.

Com amostras de espessuras em torno de 8 mm e para temperaturas no intervalo de 80 a 90°C, foi possível obter-se produtos finais com os menores teores de umidade e melhores teores de fenólicos e Antioxidante, o que pode ser confirmado com as corridas obtidas nessas condições.

Essas corridas (ponto ótimo) tiveram os valores de umidade médios de 0,39 kg de água/kg de sólido seco e 13,45%, em base úmida; 22,45 mg de EAG/g de fenólicos Totais e 73,22 mg EAG/g de capacidade Antioxidante;

As curvas de secagem podem ser representadas com propriedade pelos modelos cinéticos de Henderson (1969), Midilli et al. (2002) e pelo modelo linear.

As variáveis de resposta teor de umidade final e atividade antioxidante são influenciadas significativamente pelos fatores temperatura de secagem e podem ser expressas por um modelo polinomial de segunda ordem.

A quantidade de calor fornecida pelo secador em sua maior temperatura foi de 720000 J/s em sua maior temperatura.

5.2 Sugestões

Para dar continuidades as pesquisas, sugere-se:

- Utilizar outros tipos de secadores, em especial os de leito fixo. Com isso obter uma quantidade maior de opções para estudar a secagem de Noni.
- Obter testes com outros tipos de lâmpadas, tais como, as lâmpadas do tipo infravermelho ou Halógenas e comparar os parâmetros de secagem neste tipo de secagem;
- Realizar o planejamento estatístico adotado neste trabalho para o leito fixo, e comparar os resultados da análise estatística com a secagem em secador com lâmpadas refletoras.

REFERÊNCIAS

AKHNAZAROVA, S.; KAFAROV, V. **Experiment optimization in chemistry and chemical engineering**. Moscow: Mir, 1982.

ANDRADE, E. L. **Otimização experimental da destilação do óleo essencial de *Piper Aduncum L.* por arraste com vapor**. Dissertação de mestrado em Engenharia Química. Belém: UFPA, 2009.

ANVISA - Secretaria de Vigilância Sanitária. **Portaria nº6** de 31 de janeiro de 1995. Disponível em: http://www.anvisa.gov.br/legis/portarias/6_95.htm. Acesso em 05/09/12.

ARAÚJO, J. M. A. **Química de alimentos: teoria e prática**. 5. ed. Viçosa, MG: UFV, 2011.

BAKER. C. G. J. **Industrial Drying of Foods**. Chapman & Hall, *Blackie Academic and Professional*, 309 p., 1997

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; VEGA-MERCADO, H. De hydration of Foods, Chapman & Hall, **Blackie Academic and Professional**, 330 p., 1997.

BARROS, S. P. N.; MAIA, G. A. BRITO, E. S.; SOUZA NETO, M. A. SOUSA, J. A. Caracterização Físico-Química da Polpa de Noni (*Morinda citrifolia*). **XX Congresso de Fusicultura**. Vitória, ES, 2008;

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E.; **Como fazer experimentos**. 3 ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2007.

BOREK, C. Antioxidants and cancer. **Science and Medicine**. p. 52-62, 1997.

BORROR, C. M.; MONTGOMERY, D. C. Evaluation of Statistical Design for Experiments Involving Nois Variables Variables. **Journal of Quality Technology**, v. 34, n. 1, 2000.

BOX, G. E. P.; BEHNKEN, D. W. Some new Three level Design for the Study of quantitative Variable. **Tecnometrics**, v. 1, p. 445-476, 1960.

BOX, G. E. P., HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for experimenters: An introduction to designs, data analysis and model building**. Wiley. New York, 1978.

CHAN-BLANCO, Y.; VAILLAN, F.; PEREZ, A. M.; REYNES, M.; BRILLOUET, J.; BRAT, P. The noni fruit (*Morinda citrifolia L.*): A review of agricultural research, nutritional and therapeutic properties. **Journal of Food Composition and Analysis**, London, v.19, n.6-7, p.645-654, 2006

CHUNHIENG, M.T. **Developpement de nouveaux aliments santé tropicale: application à la noix du Brésil *Bertholettia excelsa* et au fruit de Cambodge *Morinda citrifolia L.*** PhD thesis, INPL, France, 2003.

COCHRAN, W. G. & COX, G. M. **Experimental designs**. 2. ed. London, John Wiley, 1957. p 611

CORREIA, A. A da S.; GONZAGA, M. L. da C.; AQUINO, A. D. de.; SOUZA, P. H. M de; FIGUEIREDO, R. W de; MAIA, G. A. Caracterização Química e Físico-química de polpa de noni (*Morinda citrifolia* L.) cultivado no estado do Ceará. **Alim. Nutr.**, v. 22, n.04, p. 606- 615, Araraquara, 2011.

COSTA, C. M; FARIA. L. J. G. Otimização do processo de extração química de óleos vegetais utilizando metodologia de superfície de resposta. In: **Tópicos Especiais em Tecnologia de Produtos Naturais**. UFPA, NUMA, POEMA, p. 220. 1998.

COSTA, G. J. C. **Iluminação econômica: cálculo e avaliação**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 1998.

DEGÁSPARI, C.H.; WASZCZYNSKYJ, N. Propriedades Antioxidantes de compostos fenólicos. **Visão Acadêmica**, Curitiba, v. 5, p. 33-40, 2004

DENG, S.; Palu, A.K.; West, B.J.; Sun, C.X.; Zhou, B.-N.; Jensen, J.C. **Lipoxygenase inhibitory constituents of the fruits of Noni (*Morinda citrifolia*) collected in Tahiti**. J. Nat. Prod., 70, 859-862, 2007

DENG, S.; WEST, B.J.; JENSEN, C.J.; BASAR, S.; WESTENDORF, J. Development and validation of an RP-HPLC method for the analysis of anthraquinones in noni fruits and leaves. **Food chemistry**, ARTICLE IN PRESS, p. 1-4, 2010.

DERRINGER, G., AND SUICH, R. Simultaneous Optimization of Several Response Variables," **Journal of Quality Technology**, 12, 4, 214-219. 1980.

DIXON, A.R.; McMILLEN, H.; ETKIN, N.L. Ferment this: the transformation of Noni, a traditional Polynesian medicine (*Morinda citrifolia*, Rubiaceae). **Ecological Botany**, v.53, p. 51-68, 1999.

DUSSOSSOY, E. et al. Characterization, anti-oxidative and anti-inflammatory effects of Costa Rican noni juice (*Morinda citrifolia* L.), **Journal of Ethnopharmacology**, v.133, p.108-115, 2011

FARIA, L. J. G. **Análise experimental do processo de secagem de urucum (*bixa orellana* L.) em leito fixo**. Tese de doutorado em Engenharia Química. Campinas: UNICAMP, 1998.

FELLOWS, 1994; EARLE, 1988 FELLOWS, P.J. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e práticas**. 2ed. Porto Alegre: Artmed. 2006. 602p.

FERREIRA, M. M. P. Desenvolvimento, **Caracterização e Secagem de Sementes com Cobertura Artificial**. Tese de Doutorado, DEQ/UFSCar, São Carlos, 235 p., 2003.

FOUST, A. S., WENZEL, L. A., CLUMP, C. W. ANDERSEN, L. B., **Princípios das operações unitárias**, Ed. LTC, Ed., Rio de Janeiro-RJ, 1982.

FRIEDMAN, M. J. Chemical basis for biological effects of acrylamide: a review. **Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, p. 4504, 2003.

GALDAMEZ, Edwin V. Cardoso; CARPINETTI, Luiz C. Ribeiro. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos no processo de injeção plástica**. Revista Gestão e Produção, v. 11, n. 1, p. 121 a 134, jan-abr. 2004.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport process and unit operations**, 3. ed., New Jersey: Prentice Hall, 1993.

GELY, M. C.; GINER, S. A. (2007). **Diffusion Coefficient Relationships during Drying of Soya Bean Cultivars**. Biosystems Engineering, 96 (2) ,p 213-222.

GREENSMITH, M. **Practical Dehydration**, 2nd edn. Woodhead Publishing, Cambridge, 1998

GOMES, A., FERNANDES, E., LIMA, J. L. F. C., MIRA, L., CORVO, M. L. Molecular mechanism of anti-inflammatory activity mediated by flavonoids. **Current Medicinal Chemistry**, v. 15, p. 1586–1605, 2008

GOMES, F. P. **A Estatística Moderna na Pesquisa Agropecuária**. 3. ed. Piracicaba: Nobel, 1987.

HALLIWELL, B.; GUTTERIDGE, J. M. C.; **Free Radicals in Biology and Medicine**, 3th ed., New York: Clarendon Press; Oxford: Oxford University Press (Oxford Science Publications), p. 285, 293, 625, 2007.

HUANG, L.; SHI, A.; HE, F.; LI, X. Synthesis, biological evaluation, and molecular modeling of berberine derivatives as potent acetylcholinesterase inhibitors. **Bioorganic & Medicinal Chemistry**, v. 18, p. 1244–1251, 2010

IKEDA, R.; WADA, M.; NISHIGATI, T.; NAKASIMA, K. Quantification of coumarin derivatives in Noni (*Morinda citrifolia*) and Their contribution of quenching effect on reactive oxygen species. **Food Chem.** V.113, n.4.1169-1172, 2009

INSTITUTO Adolfo Lutz. **Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz: métodos químicos e físicos para análise de alimentos**. 3. ed. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, v. 1, 1985

KAMIYA, K.; HAMABE, W.; TOKUYAMA, S.; HIRANO, K.; SATAKE, T. KUMAMOTO-Y, Y. YOSHIDA, H.; MIZUSHINA, Y. Inhibitory effect of anthraquinones isolated from the Noni (*Morinda citrifolia*) root on animal A-, B- and Y-families of DNA polymerases and human cancer cell proliferation. **Food Chemistry**. 118 (2010) 725–730

KANG, S.Y.; LEE, K.Y.; SUNG, S.H.; PARK, M.J.; KIM, Y.C. Coumarins isolated from *Angelica gigas* inhibit Acetylcholinesterase: structure–activity relationships. **Journal of Natural Products**, v. 64, p. 683–685, 2001.

KHURI, A. I.; CORNELL, J. A. **Response surfaces: designs and analyses**. New York: Marcel Dekker, 1996.

- KIM, E. H. –J.; CHEN, X. D.; PEARCE, D. Surface composition of industrial spray-dried milkpowders. 2. Effects of spray drying conditions on the surface composition. **Journal of Food Engineering**, v. 94, n. 2, p. 169-181, 2009.
- KRISHNAIAH, D.;SARBATLY, R.;NITHYANANDAM, R.R. A review of the antioxidant potential of medicinal plant species. **Bioprod.Process**. v.89,n.3, pp.217–233,2011.
- KRISHNAIAHD., Awang Bono;ROSALAM SARBATLY, S.M. Anisuzzaman Antioxidant activity and total phenolic contentof an isolated *Morinda citrifolia* L. methanolicextract from Poly-ethersulphone (PES) membraneseparator. **Journal of King Saud University – Engineering Sciences**, 2013.
- KUSKOSKI E. M, ASUERO A. G, MORALES MT, FETT R. **Frutos tropicais silvestres e polpas de frutas congeladas: atividade antioxidante, polifenóis e antocianinas**. *Ciência Rural* 36: 1283-1287.2006
- LIU, G.; BODE, A.; MA, W.; SANG, S.; HO, C.; DONG, Z. Two Novel Glycosides fromthe Fruits of *Morinda Citrifolia* (Noni) Inhibit AP-1 Transactivation and Cell Transformation in the Mouse Epidermal JB6 Cell Line. **Cancer Research**, v. 61, p.5749–5756, 2001.
- McCLATHEY, W. From Polynesian Healers to Health Food Stores: ChangingPerspectives of *Morinda citrifolia* (Rubiaceae). **Integrative Cancer Therapies**, v. 1, p.110 – 120, 2002.
- MIHOUBI, D; TIMOUMI, S; ZAGROUBA, F. Modelling of convective drying of carrot slices with IR heat source. **Chemical Engineering and Processing:Process Intensification**. 48 (2009)
- MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 5 ed. John Wiley &Sons, New York, 2001.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- MOURE, A.; CRUZ, J.; FRANCO, D.; DOMINGUEZ, J.; SINEIRO, J.; DOMINGUEZ, H.;NÚÑEZ, M.; PARAJÓ, J. Natural antioxidants from residual sources. **Food Chemistry**,v.72, p. 145, 2011
- MUJUMDAR, A. S. **Drying of granular materials, lecture notes**. Montreal: Departament of Chemical Engineering, McGill University, 1981.
- MÜLLER, J.C.; BOARETO, A.C. BÚFALO, A.C.; BOTELHO, G.; GOLIN, M.; DALSENTER, P.R.O. **Uso de Noni (*Morinda citrifolia*) durante a gestação é seguro?** 2007, Búzios. *Revista Brasileira de Toxicologia*. Sociedade Brasileira de Toxicologia, São Paulo, 2007. v. 20. p. 66-6
- MÜLLER, J. C. **Toxicidade reprodutiva da *Morinda citrifolia***. Curitiba, PR: UFPR, 2007, 88 p.n. 2, p. 110 – 120, 2002.

NELSON, S. Noni seeds handling and seedling production. **Fruits and nuts. Cooperative extension service/CTAHR, University of Hawaii at Mānoa**. 2006 Disponível em: <http://www.ctahr.hawaii.edu/noni/downloads/FN10.pdf>.>. Acessado em: 02/02/2014.

NEVES, M. C. M. Plantas medicinais: diagnóstico e gestão. **Brasília: IBAMA**, v.35, p.52, 2012.

OLIVEIRA, P. L. de. **Contribuição ao estudo de espécies da família Rubiaceae: fitoquímica da espécie *Amaioua guianensis* Aubl.**Dissertação. Universidade Federal de Goiás, Instituto de Química. Goiânia, 2010.

PALU, A.K.; JIM, A.H.; WEST, B.J.; DENG, S.; JENSEN, J.; WHITE, L. The effects of *Morinda citrifolia* L. (noni) on the immune system: Its molecular mechanisms of action.**Journal of Ethnopharmacology**, v. 115, p. 502-506, 2008.

PARK, D.; LIM,S.; YUN,Y.; PARK, J.M. **Reliable evidences that the removalmechanism of hexavalente chromium by natural biomaterials is adsorption-coupledreduction**. Chemosphere, v. 70, p. 298–305, 2007

PAWLUS, A.D.; Su, B-N; Keller, W.J.; Kinghorn, A.D. **An anthraquinone with potent quinine reductase-inducing activity and other constituents of the fruits of *Morinda citrifolia* (Noni)**. J. Nat. Prod, 68, 1720-1722, 2005

PEREIRA, Zélia Valdivina; STROZI, Renata Maria e AZEVEDO, Aristéa Alves. **Morfoanatomia foliar de *Palicourea longepedunculata* Gardiner (Rubiaceae)**. Viçosa, MG: UFV, 2002.

POLA, C.C. ; JUNQUEIRA, M.S.; CARVALHO, R.S.; TEIXEIRA, L.J.Q.; SARAIVA, S.H.Efeito do processamento na capacidade antioxidante do noni (*Morinda citrifolia*). **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, p. 12, 2011.

POTTERAT, O.; HAMBURGER, M. *Morinda citrifolia* (Noni) Fruit. Phytochemistry, Pharmacology, Safety. **Plant Medicine**, v. 73, p. 191-199, 2007.

PRADO, A. C. P. do; ARAGÃO A. M; FETT, R. Compostos fenólicos e a atividade antioxidante de extratos da casca de noz-peçã [*Carya illinoensis* (Wangenh.)C. Koch].**Brazilian Journal of food technology**. v. 12, n 4, 323-332p, 2009.

RAHMAN, I.; BISWAS, S.; KODE, A. Oxidant and antioxidant balance in the airways and airway deseases. **Europe Journal of Pharmacology**, v. 533, p. 222, 2006

RENAUD, S.C., GUEGUEN, R., SHENKER, J., D'HOUTAUD, A. Alcohol and mortalityin middle-aged men from eastern France. **Epidemiology**, v. 9, p. 184-188, 1998

RIOS, J. B.; SAMPAIO, C. de G.;SOUZA,F. T. C. de.; BRITO, E.; TREVISAN, M. T. S.Contribuição para a composição química e estabilidade térmica do óleo da semente de (noni)*Morinda citrifolia* L. **Sociedade Brasileira de Química**. Fortaleza, CE. 2009

RODRIGUEZ, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos.** 2 ed. Campinas, SP, 2009.

SALAGNAC, P.; GLOUANNEC, P.; LECHARPENTIER, D. Numerical modeling of heat and mass transfer in porous medium during combined hot air, infrared and microwave heating. **International Journal of heat and mass transfer**, v.47, p.4479-4489, 2004.

SALUDES, J.P. GARSON, M.J.; FRANZBLAU, S.G.; AGUINALDO, A.M. Antitubercular constituents from the hexane fraction of *Morinda citrifolia* Linn. (Rubiaceae). **Phytotherapy Research**, v. 16, p. 683-685, 2002.

SANG, S.; WANG, M.; HE, K.; LIU, G.; DONG, Z.; BADMAEV, V.; ZHENG, Q.Y.; GHAI, G.; ROSEN, R.T.; HO, C.T. Chemical components in noni fruits and leaves (*Morinda citrifolia*). In: HO, C.T.; ZHENG, Q.Y. (edt) Quality Management of Nutraceuticals. Ho C-T and Zheng QY (Eds.). ACS Symposium Series 803, **American Chemical Society**, p. 135-150, 2002.

SANTOS, L., A. **Construção e avaliação de um coletor armazenador de energia solar, não convencional, para aquecimento de ar na secagem de produtos agrícolas.** 135p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos – Universidade Estadual de Campinas, 1980.

SHAMI, N.J.I.E.; MOREIRA, E.A.M. Licopeno como agente antioxidante. **Revista de Nutrição**, Campinas. v.17, p. 227-236, 2004.

SILVA, J. J. M. **Adução orgânica e mineral de noni: desempenho agrônomo, nutrição da planta, qualidade de fruto e de suco.** Areia: 2010. 104f. Tese (Doutorado-Solos e nutrição de plantas) - Departamento de Ciências Ambientais, Universidade Federal da Paraíba, Areia.

SOUSA, M. S. B.; VIEIRA, L, M; SILVA, A. O; MANCINI-FILHO, J; LIMA, A. Caracterização nutricional e compostos antioxidantes em resíduos de polpas de frutas tropicais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.35, p.554-559, 2011.

SU, B.; PAWLUS, A. D.; JUNG, H.; KELLER, J. K.; MCLAUGHLIN, J. L.; KINGHORN, D. **Chemical Constituents of the Fruits of *Morinda citrifolia* (Noni) and Their Antioxidant Activity.** **Journal Natural Products**, v.68, p.592-595, 2005

STRUMILLO e KUDRA (1986), STRUMILLO, C., KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design.** Switzerland: Gordon and Breach Science Publishers. 1986.

SUBRAMANIAM, V.; ADENAN, M.I.; AHMAD, A.R.; SAHDAN, R. Natural antioxidants: *Piper sarmentosum* (Kadok) and *Morinda elliptica* (Mengkudu). **Malaysian Journal of Nutrition**, v. 9, p. 41 -51, 2003.

TAHITIAN NONI. “**The one good thing**”: Independent Consultant. TopNoni® Team. Disponível em: <<http://www.topnoni.com/melhores-produtos/composicao-atividades>.php#composicao. 2006. Acesso em: 05/06/ 2014.

VOLONTE, D.; ZHANG, K.; LISANTI, M.P.; GALBIATI, F. Expression of caveolin- 1 induces premature cellular senescence in primary cultures of murine fibroblasts. **Molecular Biology of the Cell**, v. 13, p. 2502-2517, 2002.

VASCONCELOS, N.M.S.; LIBERATO, M.C.T.; MORAIS, S.M. Água e alimentos: Química e biotecnologia, **Fortaleza: edições Demócrito Rocha**, 120 p., 2007.

VIEIRA, L. M.; SOUSA, M. S. B.; MANCINI-FILHO, J.; LIMA, A. de. Fenólicos totais e capacidade antioxidante. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 33, n. 3, p. 888-897, 2011.

WANG, M. Y. et al. *Morinda citrifolia* (Noni): a literature review and recent advances in Noni research. **Acta Pharmacologica Sinica**, v.23, p. 1127-1141, 2002.

WEST, B. J.; Jensen, C. J.; Westendorf, J. and White, L. D. **A Safety Review of Noni Fruit Juice**. Journal of Food Science, Vol. 71, 2008

YANG, J. et al. Total phenolics, ascorbic acid, and antioxidant capacity of noni (*Morinda citrifolia* L.) juice and power as affected by illumination during storage. **Food Chemistry**, 2010.

YOUNGSON, R. Como Combater os Radicais Livres: O Programa de Saúde dos Antioxidantes. **Rio de Janeiro: Campus**, 168 p., 1995. ZIN, et al. Antioxidative activities of chromatographic fractions obtained from root, fruit and leaf of Mengkudu (*Morinda citrifolia* L.). **Food Chemistry**, v.94, p.169-178, 2006.

APÊNDICES

APÊNDICE A

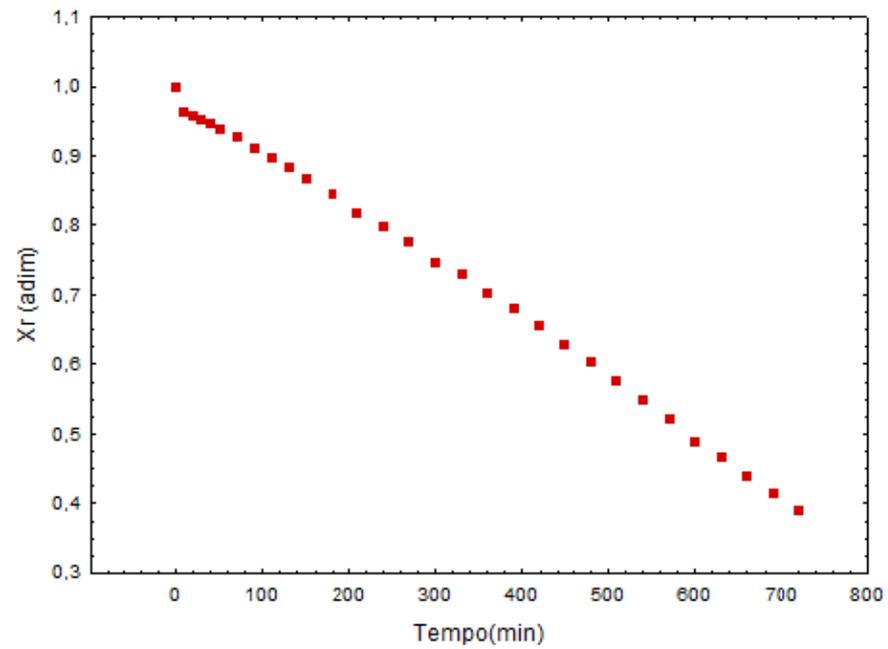
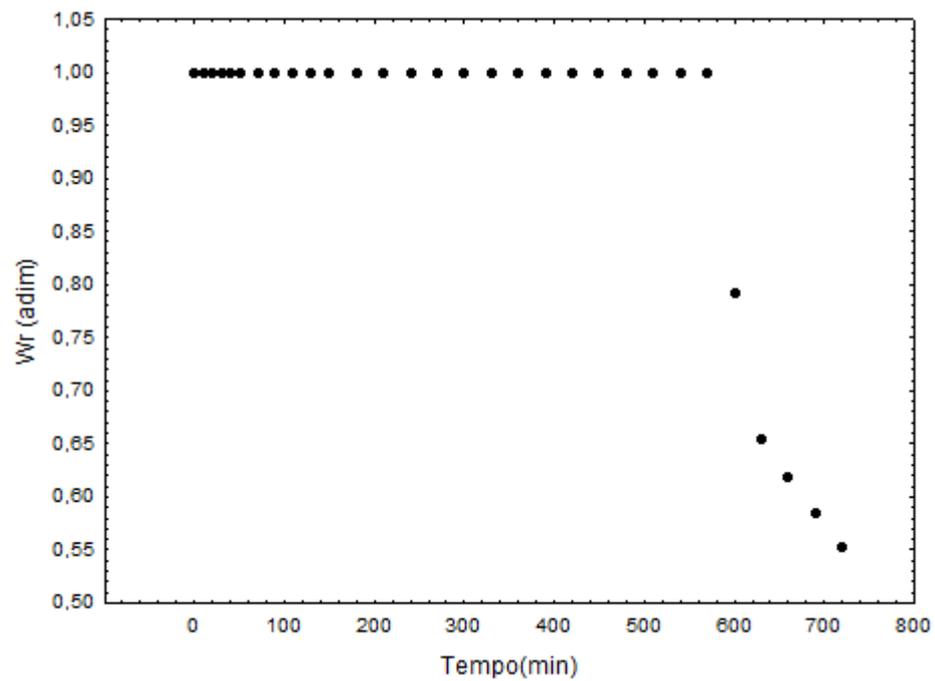
CINÉTICA DE SECAGEM DAS CORRIDAS EXPERIMENTAIS

Dados das Corridas Experimentais:

- Corrida 1
- Temperatura: 60°
- Espessura: 6mm
- Tempo: 720
- Massa: 489,77
- Área: 283,38 (cm²)
- Mss: 70,75

Tabela 19: Dados da cinética de secagem de *Morinda citrifolia L* (corrida 1)

t (min)	m (g)	Xbs Kg água/kg ss	Xbu (%)	Xr (adim)	W (mg/cm ² /min)	Wr (adim.)
0	489,77	5,92	85,55	1,00	0,20	1
10	473,78	5,70	82,29	0,96	0,20	1
20	471,73	5,67	81,87	0,96	0,20	1
30	469,78	5,64	81,47	0,95	0,20	1
40	466,85	5,60	80,87	0,95	0,20	1
50	464,17	5,56	80,33	0,94	0,20	1
70	459,06	5,49	79,28	0,93	0,20	1
90	452,69	5,40	77,98	0,91	0,20	1
110	446,8	5,32	76,78	0,90	0,20	1
130	440,54	5,23	75,50	0,88	0,20	1
150	434,35	5,14	74,24	0,87	0,20	1
180	425,42	5,01	72,42	0,85	0,20	1
210	413,72	4,85	70,03	0,82	0,20	1
240	405,95	4,74	68,44	0,80	0,20	1
270	396,48	4,60	66,51	0,78	0,20	1
300	384	4,43	63,96	0,75	0,20	1
330	376,8	4,33	62,49	0,73	0,20	1
360	365,23	4,16	60,13	0,70	0,20	1
390	356,2	4,03	58,28	0,68	0,20	1
410	345,42	3,88	56,08	0,66	0,20	1
440	334,7	3,73	53,89	0,63	0,20	1
470	323,51	3,57	51,61	0,60	0,20	1
500	312,65	3,42	49,39	0,58	0,20	1
530	300,9	3,25	46,99	0,55	0,20	1
560	289,12	3,09	44,59	0,52	0,20	1
590	275,73	2,90	41,85	0,49	0,14	0,69
620	266,74	2,77	40,02	0,47	0,13	0,65
650	254,9	2,60	37,60	0,44	0,12	0,62
680	244,48	2,46	35,47	0,41	0,12	0,58
720	234,92	2,32	33,52	0,39	0,11	0,55

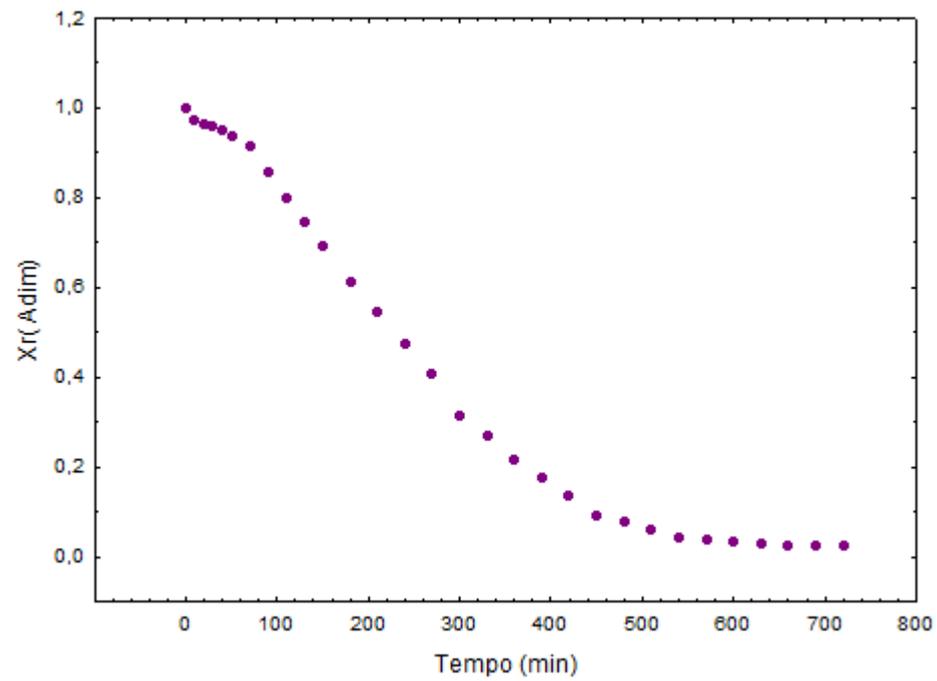
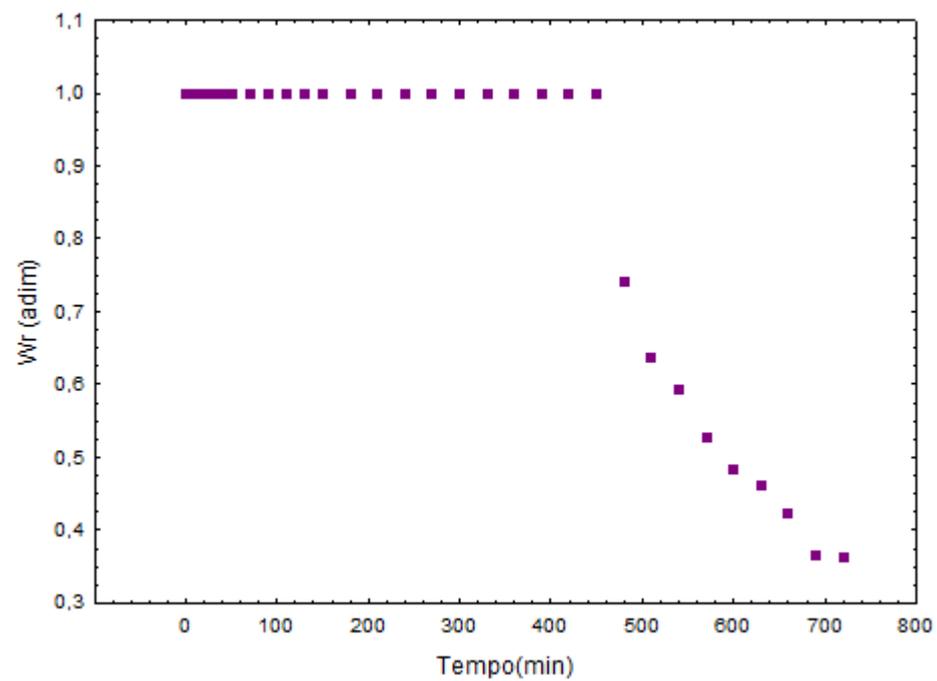
Gráfico 13: Curva de Secagem em função do tempo(corrída 1)**Gráfico 14:** Curva de Fluxo de Secagem-Wxt (corrída 1)

Dados das Corridas Experimentais:

- Corrida 2
- Temperatura:90°C
- Espessura:6mm
- Tempo:720
- Massa: 313,59
- Área: 283,38 (cm²)
- Mss: 34,46

Tabela 20:Dados da cinética de secagem de *Morinda citrifolia* L.(corrida2)

t (min)	M (g)	Xbs Kgágua/kgss	Xbu (%)	Xr (adim)	W (mg/cm ² /min.)	Wr (adim.)
0	313,59	8,10	89,01	1,00	0,28	1
10	306,36	7,89	86,71	0,97	0,28	1
20	304,01	7,82	85,96	0,97	0,28	1
30	302,28	7,77	85,40	0,96	0,28	1
40	299,32	7,69	84,46	0,95	0,28	1
50	295,83	7,58	83,34	0,94	0,28	1
70	290,05	7,42	81,50	0,92	0,28	1
90	273,56	6,94	76,25	0,86	0,28	1
110	257,34	6,47	71,07	0,80	0,28	1
130	243,06	6,05	66,52	0,75	0,28	1
150	227,25	5,59	61,48	0,69	0,28	1
180	205,53	4,96	54,54	0,61	0,28	1
210	186,15	4,40	48,37	0,54	0,28	1
240	167,10	3,85	42,30	0,48	0,28	1
270	148,60	3,31	36,40	0,41	0,28	1
300	121,65	2,53	27,80	0,31	0,28	1
330	109,92	2,19	24,06	0,27	0,28	1
360	95,23	1,76	19,37	0,22	0,28	1
390	83,46	1,42	15,63	0,18	0,28	1
410	72,13	1,09	12,01	0,13	0,28	1
440	59,65	0,73	8,03	0,09	0,28	1
470	56,26	0,63	6,95	0,08	0,21	0,74
500	50,73	0,47	5,19	0,06	0,18	0,64
530	46,54	0,35	3,85	0,04	0,17	0,59
560	44,47	0,29	3,19	0,04	0,15	0,53
590	43,28	0,26	2,81	0,03	0,14	0,48
620	42,14	0,22	2,44	0,03	0,13	0,46
650	41,55	0,21	2,26	0,03	0,12	0,42
680	41,52	0,20	2,25	0,03	0,10	0,37
720	41,31	0,20	2,18	0,02	0,10	0,36

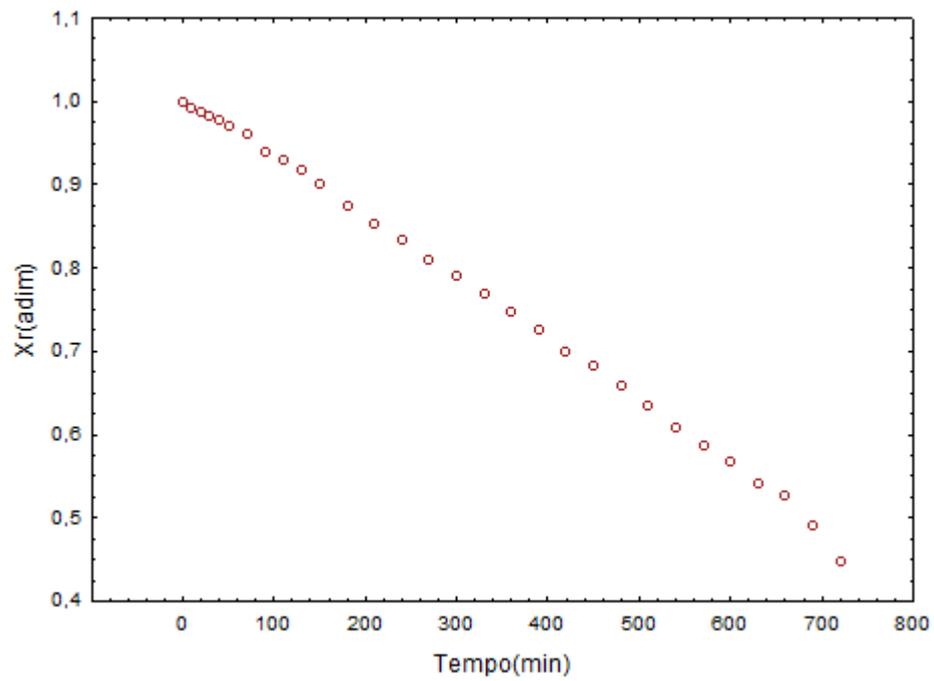
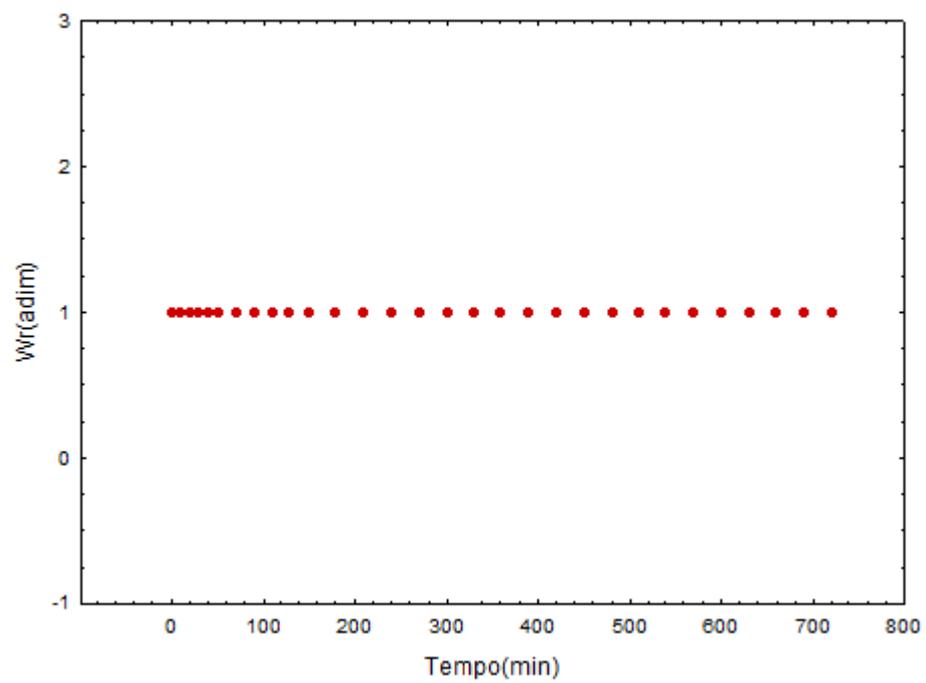
Gráfico 15: Curva de secagem em função do tempo (corrida 2)**Gráfico 16:** Curva de Fluxo secagem em função do tempo (corrida 2)

Dados das Corridas Experimentais:

- Corrida 3
- Temperatura:60°C
- Espessura:10mm
- Tempo:720 min
- Massa: 509,14
- Área: 283,38 (cm²)
- Mss: 75,34

Tabela 21:Dados da cinética de secagem de *Morinda citrifolia L.*(corrida 3)

t (min)	m (g)	Xbs Kgágua/kgss	Xbu (%)	Xr (adim)	W (mg/cm ² /min)	Wr (adim.)
0	509,14	5,92	85,55	1,00	0,20	1
10	505,24	5,70	82,29	0,99	0,20	1
20	503,97	5,67	81,87	0,99	0,20	1
30	502,08	5,64	81,47	0,98	0,20	1
40	499,92	5,60	80,87	0,98	0,20	1
50	496,87	5,56	80,33	0,97	0,20	1
70	492	5,49	79,28	0,96	0,20	1
90	482,78	5,40	77,98	0,94	0,20	1
110	478,75	5,32	76,78	0,93	0,20	1
130	473,39	5,23	75,50	0,92	0,20	1
150	465,97	5,14	74,24	0,90	0,20	1
180	454,76	5,01	72,42	0,87	0,20	1
210	445,59	4,85	70,03	0,85	0,20	1
240	436,66	4,74	68,44	0,83	0,20	1
270	426,8	4,60	66,51	0,81	0,20	1
300	418,1	4,43	63,96	0,79	0,20	1
330	408,98	4,33	62,49	0,77	0,20	1
360	399,38	4,16	60,13	0,75	0,20	1
390	390,18	4,03	58,28	0,73	0,20	1
410	378,67	3,88	56,08	0,70	0,20	1
440	371,39	3,73	53,89	0,68	0,20	1
470	361,39	3,57	51,61	0,66	0,20	1
500	351,28	3,42	49,39	0,64	0,20	1
530	339,6	3,25	46,99	0,61	0,20	1
560	330,47	3,09	44,59	0,59	0,20	1
590	321,75	2,90	41,85	0,57	0,20	1
620	310,51	2,77	40,02	0,54	0,20	1
650	304,48	2,60	37,60	0,53	0,20	1
680	288,42	2,46	35,47	0,49	0,20	1
720	269,63	2,32	33,52	0,45	0,20	1

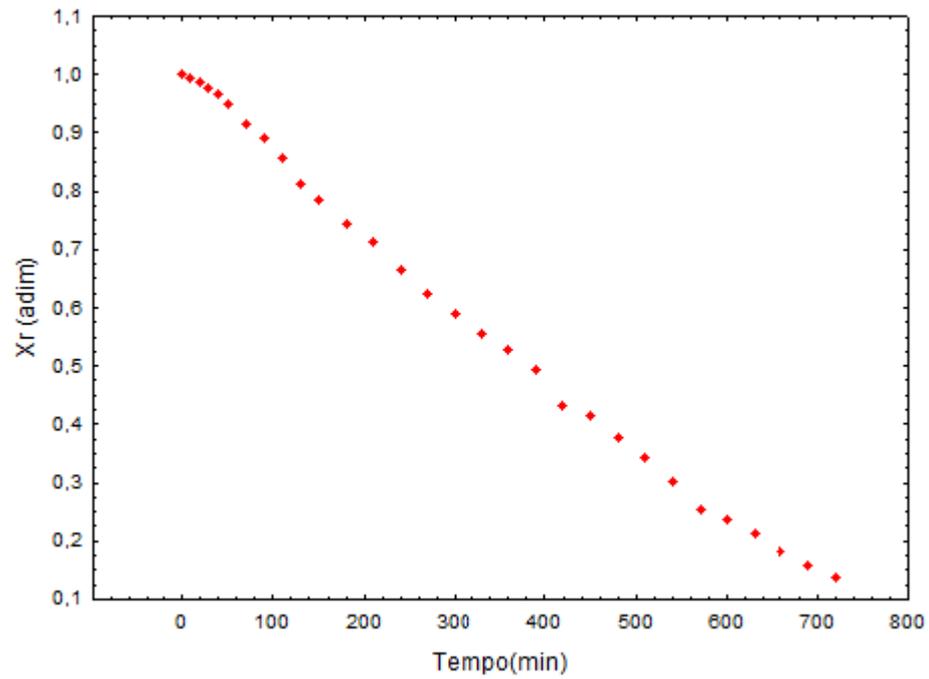
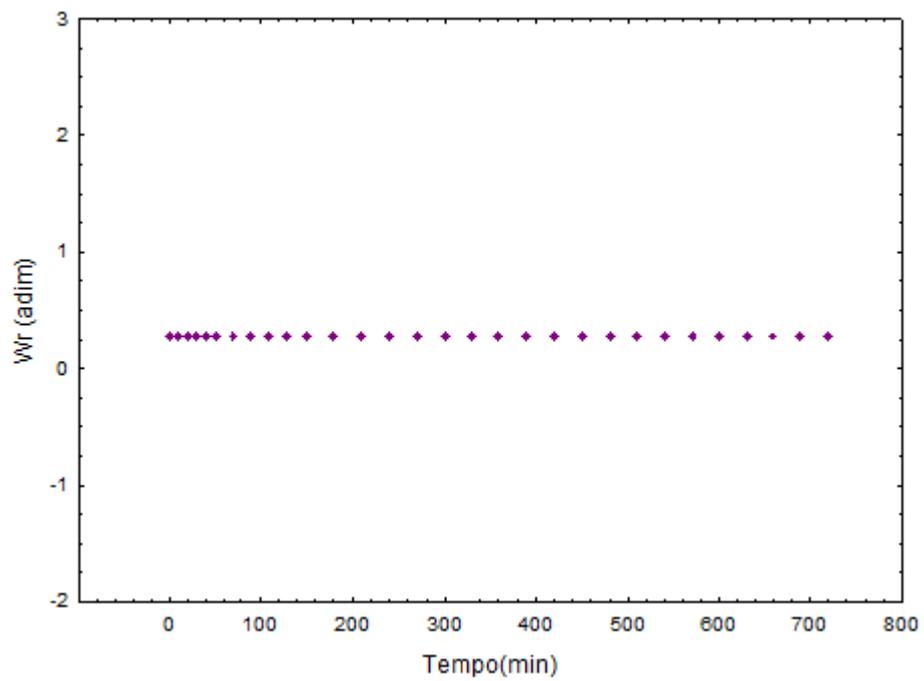
Gráfico 17: Curva de secagem em função do tempo (corrida 3)**Gráfico 18:** Curva de Fluxo secagem em função do tempo (Corrida 3)

Dados das Corridas Experimentais:

- Corrida 4
- Temperatura: 90°
- Espessura: 10mm
- Tempo: 720
- Massa: 482,48
- Área: 283,38 (cm²)
- Mss: 63,29

Tabela 22: Dados da cinética de secagem de *Morinda citrifolia* L.(corrida 4)

t (min)	M (g)	Xbs Kgágua/kgss	Xbu (%)	Xr (adim)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)
0	482,48	6,62	86,88	1,00	0,28	1
10	480,16	6,59	86,40	0,99	0,28	1
20	477,3	6,54	85,81	0,98	0,28	1
30	473,2	6,48	84,96	0,97	0,28	1
40	468,21	6,40	83,92	0,95	0,28	1
50	461,01	6,28	82,43	0,94	0,28	1
70	447,46	6,07	79,62	0,91	0,28	1
90	437,4	5,91	77,54	0,87	0,28	1
110	421,89	5,67	74,32	0,83	0,28	1
130	404,41	5,39	70,70	0,78	0,28	1
150	392,14	5,20	68,16	0,75	0,28	1
180	375,55	4,93	64,72	0,70	0,28	1
210	362,77	4,73	62,07	0,65	0,28	1
240	342,26	4,41	57,82	0,60	0,28	1
270	324,79	4,13	54,20	0,55	0,28	1
300	310,44	3,91	51,22	0,50	0,28	1
330	296,65	3,69	48,37	0,47	0,28	1
360	284,12	3,49	45,77	0,41	0,28	1
390	270,2	3,27	42,88	0,38	0,28	1
410	244,77	2,87	37,61	0,33	0,28	1
440	237,43	2,75	36,09	0,30	0,28	1
470	221,48	2,50	32,79	0,25	0,28	1
500	206,5	2,26	29,68	0,21	0,28	1
530	190,39	2,01	26,34	0,18	0,28	1
560	169,75	1,68	22,07	0,14	0,28	1
590	162,46	1,57	20,55	0,10	0,28	1
620	152,22	1,41	18,43	0,08	0,28	1
650	139,75	1,21	15,85	0,06	0,28	1
680	129,57	1,05	13,74	0,05	0,28	1
720	121,27	0,92	12,02	0,03	0,28	1

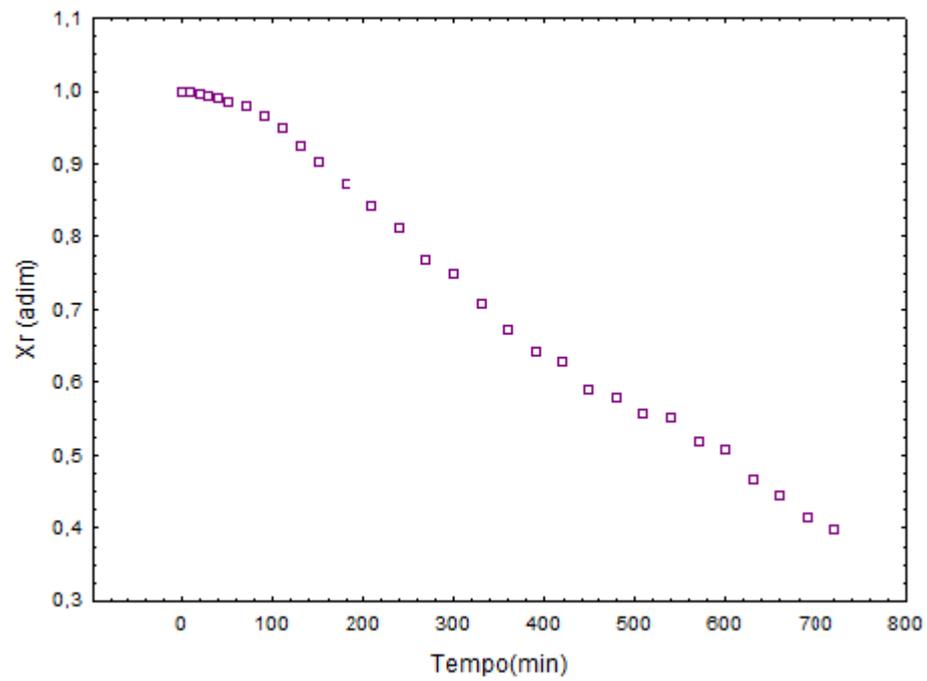
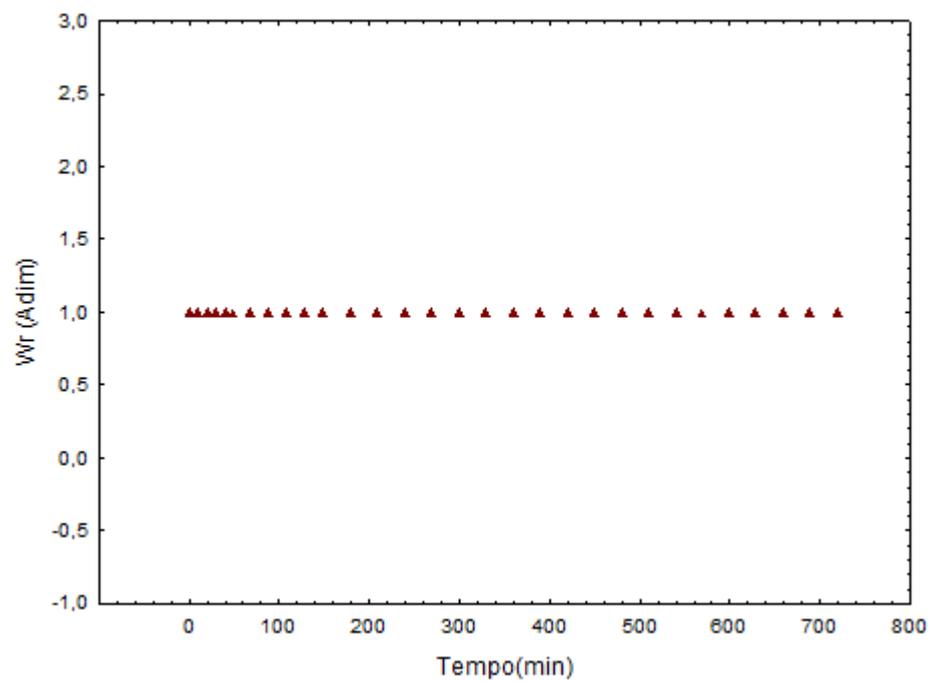
Gráfico 19: Curva de secagem em função do tempo (corrida 4)**Gráfico 20:** Curva de Fluxo secagem em função do tempo (Corrida 4)

Dados das Corridas Experimentais:

- Corrida 5
- Temperatura: 54°C
- Espessura: 8 mm
- Tempo: 720
- Massa: 297,6
- Área: 283,38 (cm²)
- Mss : 30,57

Tabela 23: Dados da cinética de secagem de *Morinda citrifolia L* (corrida 5)

t (min)	m (g)	Xbs Kg água/kg ss	Xbu (%)	Xr (adim)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)
0	297,6	8,74	89,73	1,00	0,10	1
10	297,24	8,72	89,61	1,00	0,10	1
20	296,54	8,70	89,37	1,00	0,10	1
30	295,88	8,68	89,15	0,99	0,10	1
40	294,9	8,65	88,82	0,99	0,10	1
50	293,74	8,61	88,43	0,99	0,10	1
70	292,25	8,56	87,93	0,98	0,10	1
90	288,79	8,45	86,77	0,97	0,10	1
110	283,76	8,28	85,08	0,95	0,10	1
130	277,84	8,09	83,09	0,93	0,10	1
150	271,76	7,89	81,05	0,90	0,10	1
180	263,84	7,63	78,38	0,87	0,10	1
210	255,7	7,36	75,65	0,84	0,10	1
240	247,62	7,10	72,93	0,81	0,10	1
270	236,16	6,73	69,08	0,77	0,10	1
300	230,49	6,54	67,18	0,75	0,10	1
330	219,65	6,19	63,53	0,71	0,10	1
360	210,07	5,87	60,32	0,67	0,10	1
390	202,36	5,62	57,73	0,64	0,10	1
410	198,38	5,49	56,39	0,63	0,10	1
440	187,89	5,15	52,86	0,59	0,10	1
470	185,67	5,07	52,12	0,58	0,10	1
500	179,55	4,87	50,06	0,56	0,10	1
530	177,65	4,81	49,42	0,55	0,10	1
560	169,49	4,54	46,68	0,52	0,10	1
590	166,37	4,44	45,63	0,51	0,10	1
620	155,62	4,09	42,02	0,47	0,10	1
650	149,18	3,88	39,86	0,44	0,10	1
680	141,54	3,63	37,29	0,42	0,10	1
720	137,3	3,49	35,86	0,40	0,10	1

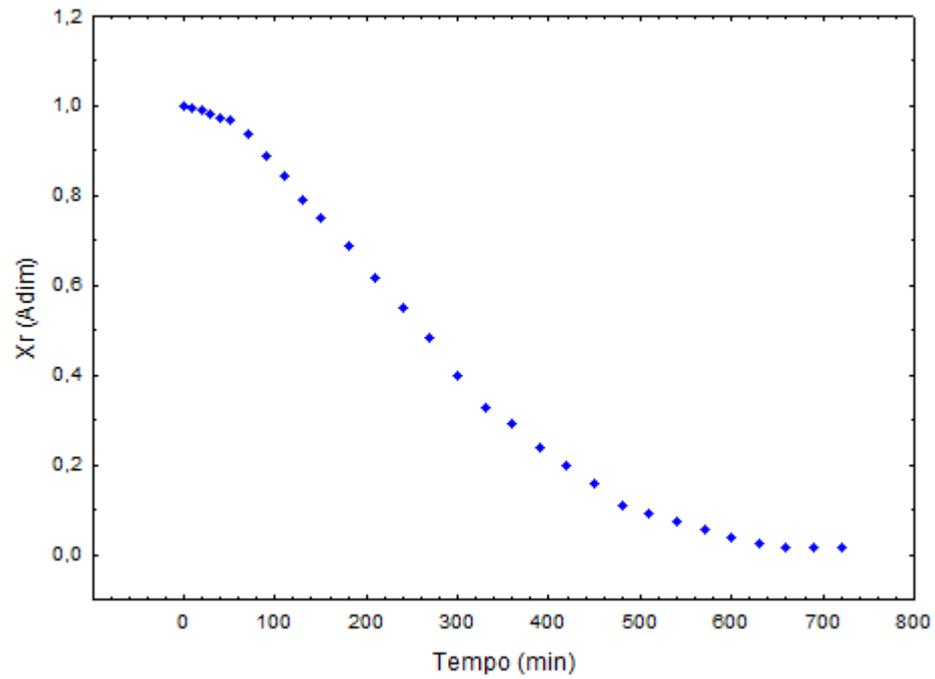
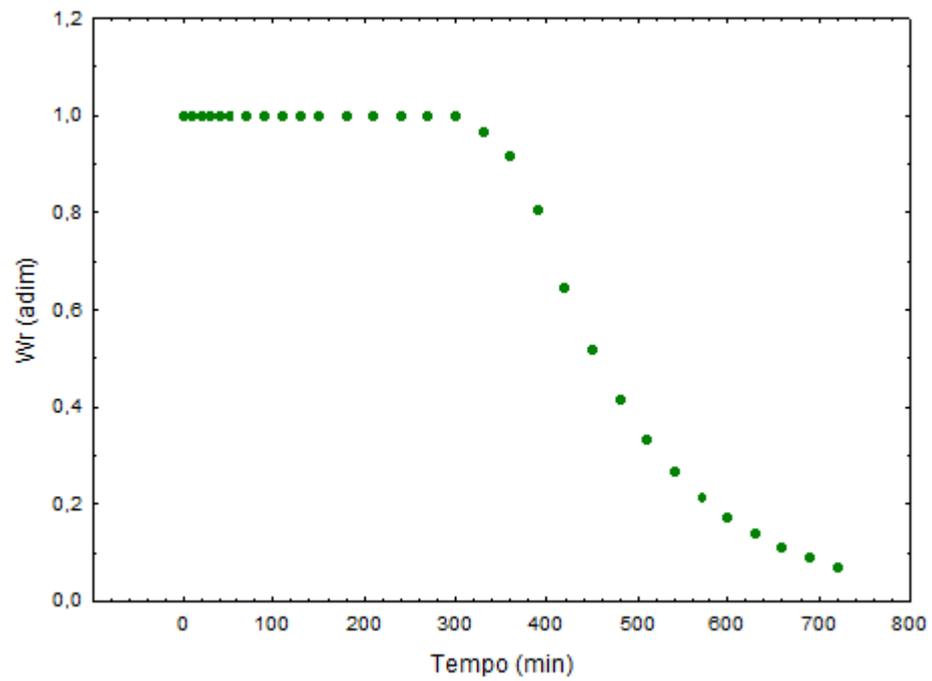
Gráfico 21: Curva de secagem em função do tempo (corrida 5)**Gráfico 22:** Curva de Fluxo secagem em função do tempo (Corrida 5)

Dados das Corridas Experimentais:

- Corrida 6
- Temperatura: 96°C
- Espessura : 8 mm
- Tempo: 720
- Massa: 344,94
- Área: 283,38 (cm²)
- Mss : 30,39

Tabela 24: Dados da cinética de secagem de *Morinda citrifolia* L (corrida 6)

t (min)	m (g)	Xbs Kgágua/kgss	Xbu (%)	Xr (adim)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)
0	282,98	0,89	87,818	1	0,22	1
10	281,94	0,89	87,485	1	0,22	1
20	280,24	0,88	87,001	0,99	0,22	1
30	278,25	0,88	86,264	0,98	0,22	1
40	276,66	0,87	85,850	0,97	0,22	1
50	274,82	0,86	85,250	0,97	0,22	1
70	267,29	0,84	84,887	0,94	0,22	1
90	254,82	0,79	81,971	0,89	0,22	1
110	243,47	0,75	79,011	0,84	0,22	1
130	230,47	0,71	75,752	0,79	0,22	1
150	219,83	0,67	72,534	0,75	0,22	1
180	204,05	0,61	67,696	0,69	0,22	1
210	186,65	0,55	62,686	0,62	0,22	1
240	169,54	0,49	59,045	0,55	0,22	1
270	152,22	0,43	55,511	0,48	0,22	1
300	130,68	0,35	52,050	0,40	0,22	1
330	113,13	0,29	48,290	0,33	0,21	0,97
360	104,65	0,26	44,002	0,29	0,20	0,92
390	90,7	0,21	39,934	0,24	0,18	0,81
410	80,57	0,18	35,861	0,20	0,14	0,65
440	70,22	0,14	31,214	0,16	0,11	0,52
470	58,23	0,10	28,706	0,11	0,09	0,42
500	52,97	0,08	25,390	0,09	0,07	0,33
530	49,05	0,07	22,639	0,07	0,06	0,27
560	44,68	0,05	19,403	0,06	0,05	0,21
590	40,29	0,03	14,701	0,04	0,04	0,17
620	36,65	0,02	13,713	0,02	0,03	0,14
650	34,77	0,02	11,614	0,02	0,02	0,11
680	34,47	0,01	9,738	0,02	0,02	0,09
720	34,1	0,01	8,120	0,01	0,02	0,07

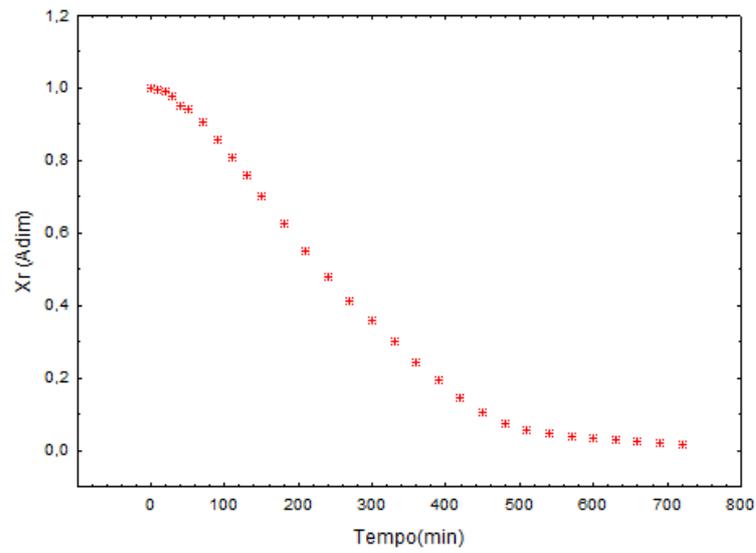
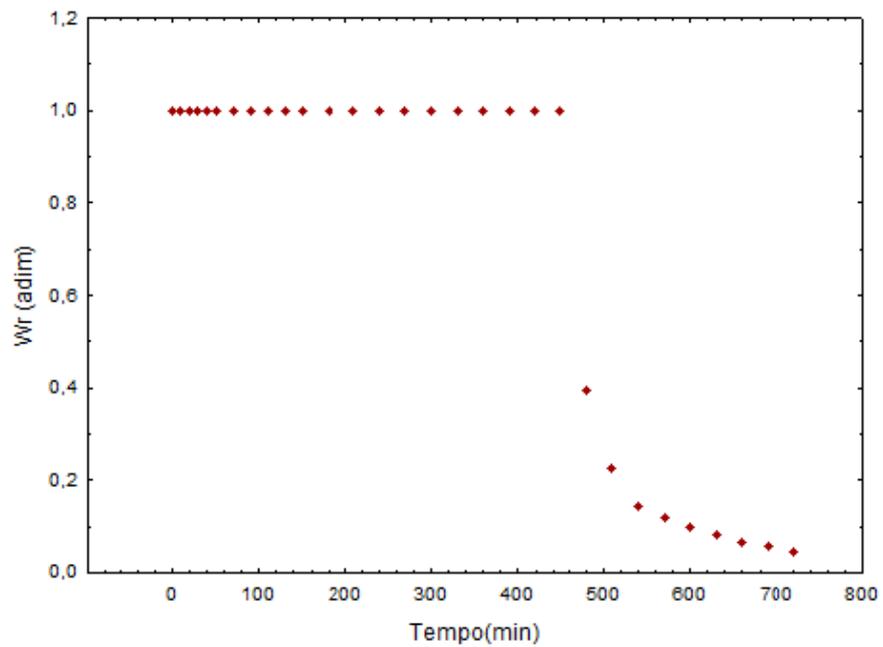
Gráfico 23: Curva de secagem em função do tempo (corrida 6)**Gráfico 24:** Curva de Fluxo secagem em função do tempo (Corrida 6)

Dados das Corridas Experimentais:

- Corrida 7
- Temperatura: 75°C
- Espessura: 5 mm
- Tempo: 720
- Massa: 257,91
- Área: 283,38 (cm²)
- Mss 25,16g

Tabela 25: Dados da cinética de secagem de *Morinda citrifolia L* (corrida 7)

t (min)	m (g)	X _{bs} Kgágua/kgss	X _{bu} (%)	X _r (adim)	W (mg/cm ² .min)	W _r (adim.)
0	257,91	9,25	88,17	1,00	0,19	1
10	257,21	9,22	87,85	1,00	0,19	1
20	255,94	9,17	86,57	0,99	0,19	1
30	252,51	9,04	85,21	0,98	0,19	1
40	246,78	8,81	83,61	0,95	0,19	1
50	244,6	8,72	81,50	0,94	0,19	1
70	236,1	8,38	77,64	0,91	0,19	1
90	224,51	7,92	74,77	0,86	0,19	1
110	213,26	7,48	71,75	0,81	0,19	1
130	201,38	7,00	69,13	0,76	0,19	1
150	188,42	6,49	62,59	0,70	0,19	1
180	170,89	5,79	58,93	0,63	0,19	1
210	153,64	5,11	54,50	0,55	0,19	1
240	136,14	4,41	49,68	0,48	0,19	1
270	121,36	3,82	44,02	0,41	0,19	1
300	108,39	3,31	40,57	0,36	0,19	1
330	95,03	2,78	36,61	0,30	0,19	1
360	82,04	2,26	32,99	0,24	0,19	1
390	70,13	1,79	29,44	0,19	0,19	1
410	59,33	1,36	26,08	0,15	0,19	1
440	49,78	0,98	22,13	0,11	0,19	1
470	42,75	0,70	18,63	0,08	0,04	0,21
500	38,57	0,53	15,18	0,06	0,03	0,17
530	35,6	0,41	12,02	0,04	0,03	0,14
560	33,86	0,35	9,43	0,04	0,02	0,12
590	32,95	0,31	7,03	0,03	0,02	0,10
620	32,4	0,29	6,08	0,03	0,02	0,08
650	31,38	0,25	3,63	0,03	0,01	0,07
680	30,36	0,21	2,22	0,02	0,01	0,06
720	29,32	0,17	1,44	0,02	0,01	0,05

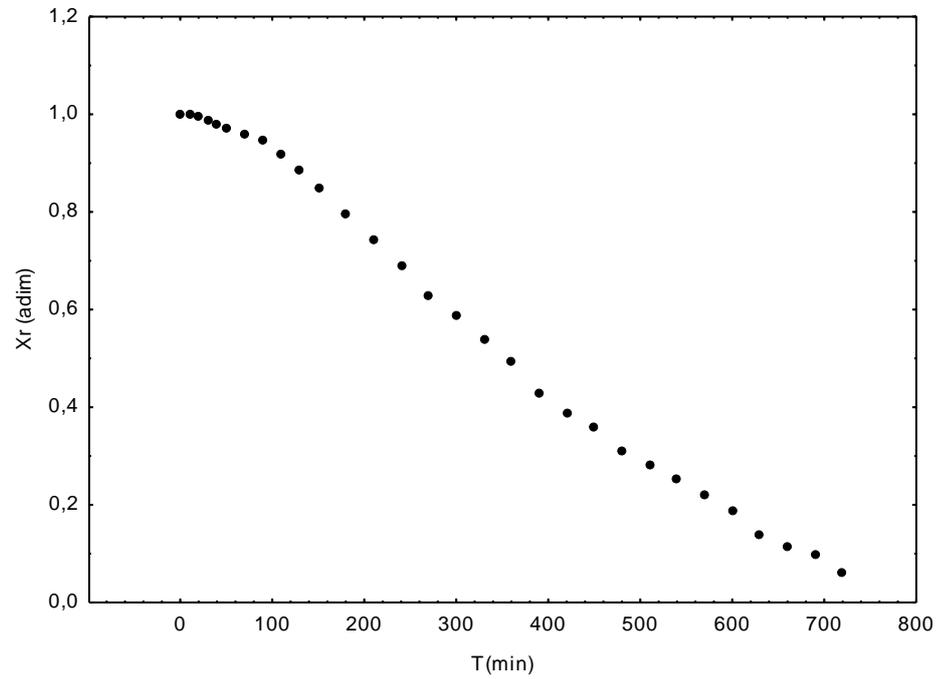
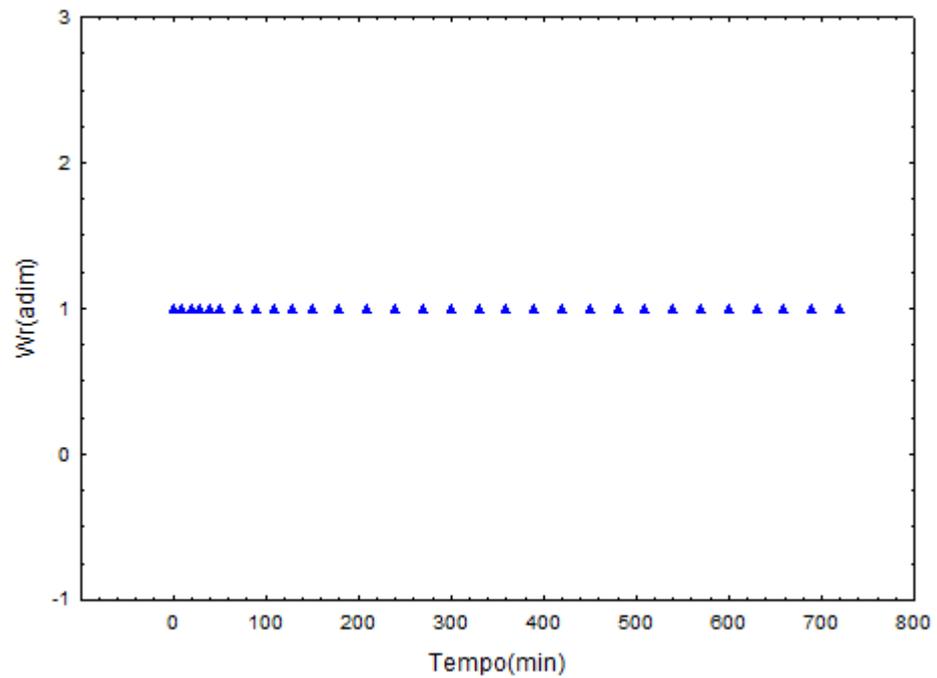
Gráfico 25: Curva de secagem em função do tempo (corrida 7)**Gráfico 26:** Curva de Fluxo secagem em função do tempo (Corrida 7)

Dados das Corridas Experimentais:

- Corrida 8
- Temperatura: 75°C
- Espessura: 11mm
- Tempo: 720
- Massa: 386,74
- Área: 283,38 (cm²)
- Mss : 46,11

Tabela 26: Dados da cinética de secagem de *Morinda citrifolia* L (corrida 8)

T (min)	m (g)	Xbs Kg água/kg ss	Xbu (%)	Xr (adim)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)
0	386,74	7,39	88,08	1	0,39	1
10	386,15	7,37	87,92	0,998	0,39	1
20	385,05	7,35	87,64	0,995	0,39	1
30	382,76	7,30	87,05	0,988	0,39	1
40	380,1	7,24	86,36	0,981	0,39	1
50	377,77	7,19	85,76	0,974	0,39	1
70	372,77	7,08	84,47	0,959	0,39	1
90	369,08	7,00	83,51	0,948	0,39	1
110	358,88	6,78	80,87	0,918	0,39	1
130	347,17	6,53	77,85	0,884	0,39	1
150	334,74	6,26	74,63	0,847	0,39	1
180	317,6	5,89	70,20	0,797	0,39	1
210	299,08	5,49	65,41	0,743	0,39	1
240	281,77	5,11	60,93	0,692	0,39	1
270	260,18	4,64	55,35	0,628	0,39	1
300	246,87	4,35	51,91	0,589	0,39	1
330	229,65	3,98	47,46	0,539	0,39	1
360	214,55	3,65	43,55	0,494	0,39	1
390	191,79	3,16	37,67	0,428	0,39	1
410	178,05	2,86	34,12	0,387	0,39	1
440	168,41	2,65	31,62	0,359	0,39	1
470	152,05	2,30	27,39	0,311	0,39	1
500	142,28	2,09	24,87	0,282	0,39	1
530	132,06	1,86	22,22	0,252	0,39	1
560	120,65	1,62	19,27	0,219	0,28	0,72
590	110,24	1,39	16,58	0,188	0,22	0,57
620	93,05	1,02	12,14	0,138	0,18	0,45
650	84,97	0,84	10,05	0,114	0,14	0,36
680	79,02	0,71	8,51	0,097	0,11	0,29
720	66,9	0,45	5,38	1,000	0,09	0,23

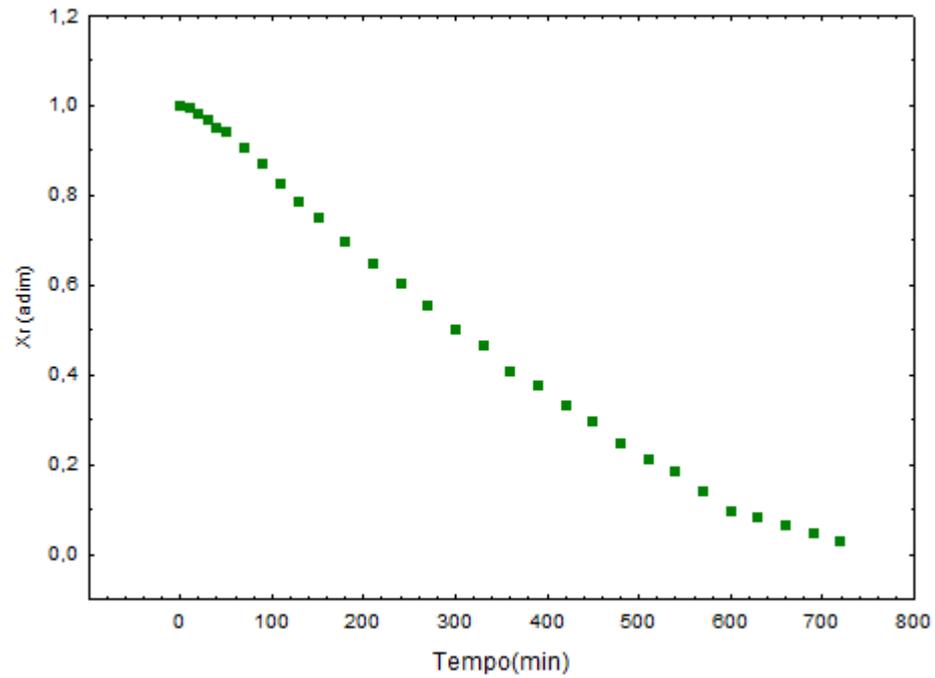
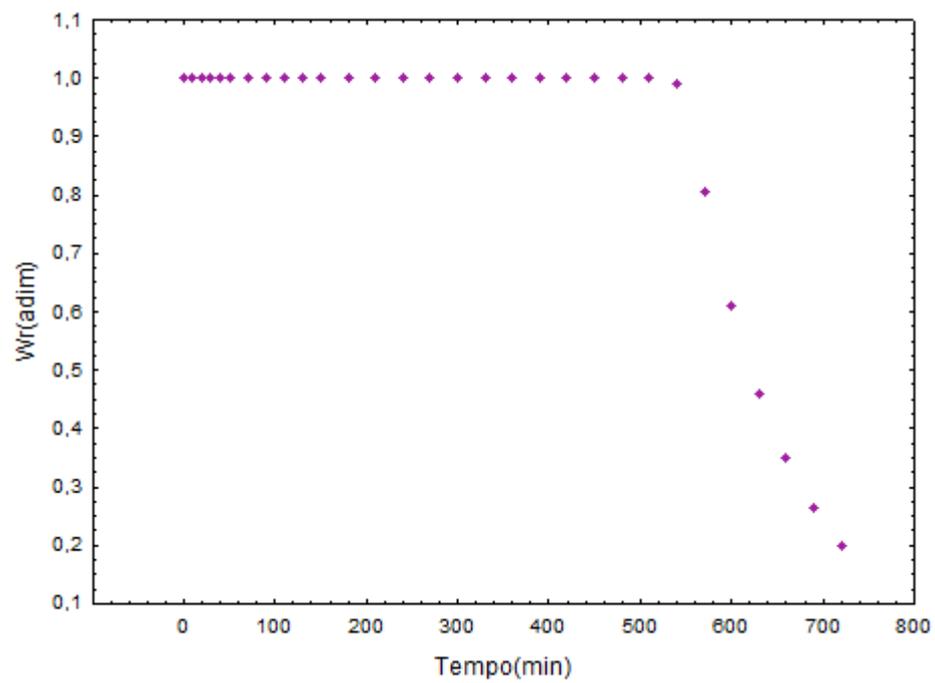
Gráfico 27: Curva de secagem em função do tempo (corrida 8)**Gráfico 28:** Curva de Fluxo secagem em função do tempo (Corrida 8)

Dados das Corridas Experimentais:

- Corrida 9
- Temperatura: 75°C
- Espessura: 8mm
- Tempo: 720
- Massa: 386,74
- Área: 283,38 (cm²)
- Mss : 47,62

Tabela 27: Dados da cinética de secagem de *Morinda citrifolia* L (corrida 9)

t (min)	m (g)	Xbs Kg água/kg ss	Xbu (%)	Xr (adim)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)
0	392,69	7,25	87,87	1,00	0,27	1
10	390,7	7,20	87,37	0,99	0,27	1
20	387,14	7,13	86,46	0,98	0,27	1
30	381,2	7,01	84,95	0,97	0,27	1
40	376,46	6,91	83,74	0,95	0,27	1
50	373,28	6,84	82,93	0,94	0,27	1
70	360,74	6,58	79,74	0,91	0,27	1
90	347,4	6,30	76,34	0,87	0,27	1
110	332,35	5,98	72,51	0,83	0,27	1
130	318,26	5,68	68,92	0,78	0,27	1
150	306,34	5,43	65,88	0,75	0,27	1
180	288,57	5,06	61,36	0,70	0,27	1
210	270,79	4,69	56,83	0,65	0,27	1
240	255,73	4,37	53,00	0,60	0,27	1
270	238,97	4,02	48,73	0,55	0,27	1
300	221,02	3,64	44,16	0,50	0,27	1
330	208,26	3,37	40,91	0,47	0,27	1
360	187,89	2,95	35,72	0,41	0,27	1
390	178,21	2,74	33,26	0,38	0,27	1
410	161,78	2,40	29,07	0,33	0,27	1
440	149,64	2,14	25,98	0,30	0,27	1
470	132,52	1,78	21,62	0,25	0,27	1
500	120,59	1,53	18,58	0,21	0,27	1
530	111,41	1,34	16,24	0,18	0,29	1
560	96,35	1,02	12,41	0,14	0,22	0,81
590	81,52	0,71	8,63	0,10	0,16	0,61
620	75,66	0,59	7,14	0,08	0,12	0,46
650	69,88	0,47	5,67	0,06	0,09	0,35
680	64,04	0,34	4,18	0,05	0,07	0,26
720	58,41	0,23	2,75	0,03	0,05	0,20

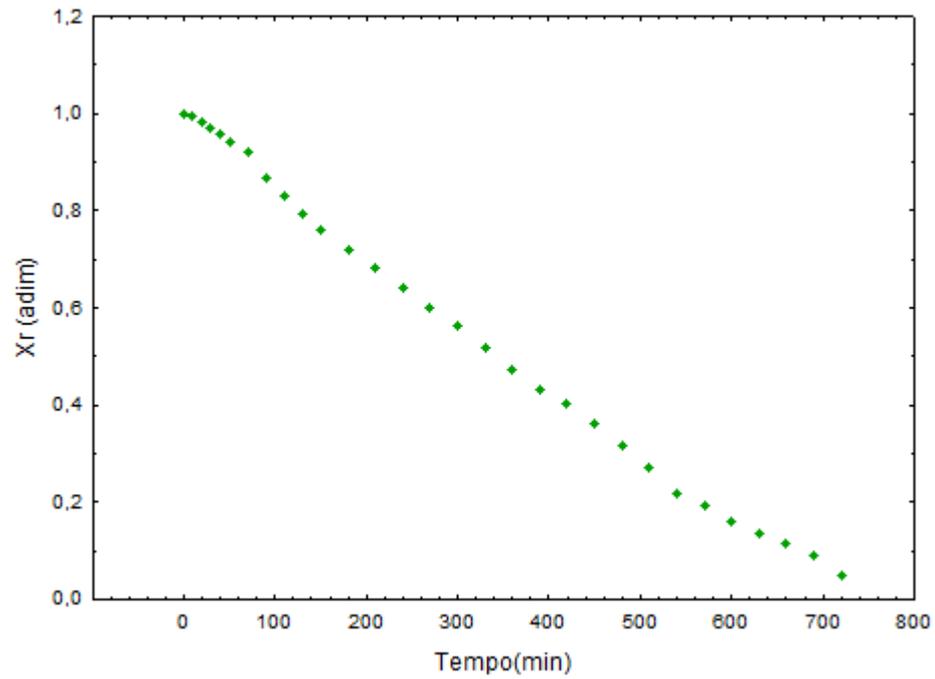
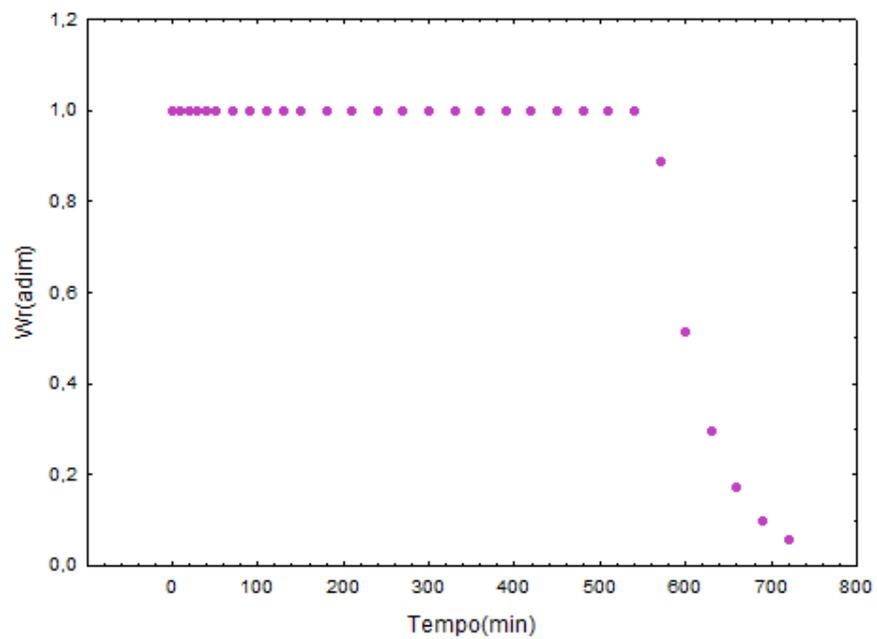
Gráfico 29: Curva de secagem em função do tempo (corrida 9)**Gráfico 30:** Curva de fluxo de secagem em função do tempo (corrida 9)

Dados das Corridas Experimentais:

- Corrida 10
- Temperatura: 75C°
- Espessura: 8mm
- Tempo: 720
- Massa: 386,74
- Área: 283,38 (cm²)
- Mss 43,51

Tabela 28: Dados da cinética de secagem de *Morinda citrifolia* L (corrida 10)

t (min)	m (g)	Xbs kg água/kg ss	Xbu (%)	Xr (adim)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)
0	364,48	7,38	88,06	1	0,22	1
10	362,59	7,33	87,54	0,99	0,22	1
20	359,15	7,25	86,60	0,98	0,22	1
30	355,1	7,16	85,49	0,97	0,22	1
40	350,94	7,07	84,35	0,96	0,22	1
50	345,84	6,95	82,95	0,94	0,22	1
70	338,6	6,78	80,96	0,92	0,22	1
90	322,13	6,40	76,44	0,87	0,22	1
110	310,07	6,13	73,13	0,83	0,22	1
130	298,21	5,85	69,88	0,79	0,22	1
150	287,25	5,60	66,87	0,76	0,22	1
180	274,4	5,31	63,35	0,72	0,22	1
210	261,85	5,02	59,90	0,68	0,22	1
240	249,24	4,73	56,44	0,64	0,22	1
270	235,95	4,42	52,80	0,60	0,22	1
300	223,91	4,15	49,50	0,56	0,22	1
330	209,65	3,82	45,58	0,52	0,22	1
360	195,3	3,49	41,65	0,47	0,22	1
390	181,55	3,17	37,87	0,43	0,22	1
410	173,22	2,98	35,59	0,40	0,22	1
440	159,74	2,67	31,89	0,36	0,22	1
470	145,5	2,34	27,98	0,32	0,22	1
500	130,87	2,01	23,97	0,27	0,22	1
530	113,24	1,60	19,13	0,22	0,22	1
560	106,14	1,44	17,18	0,20	0,20	0,89
590	94,65	1,18	14,03	0,16	0,11	0,51
620	86,55	0,99	11,81	0,13	0,07	0,30
650	80,09	0,84	10,04	0,11	0,04	0,17
680	72,76	0,67	8,03	0,09	0,02	0,10
720	59,63	0,37	4,42	0,05	0,01	0,06

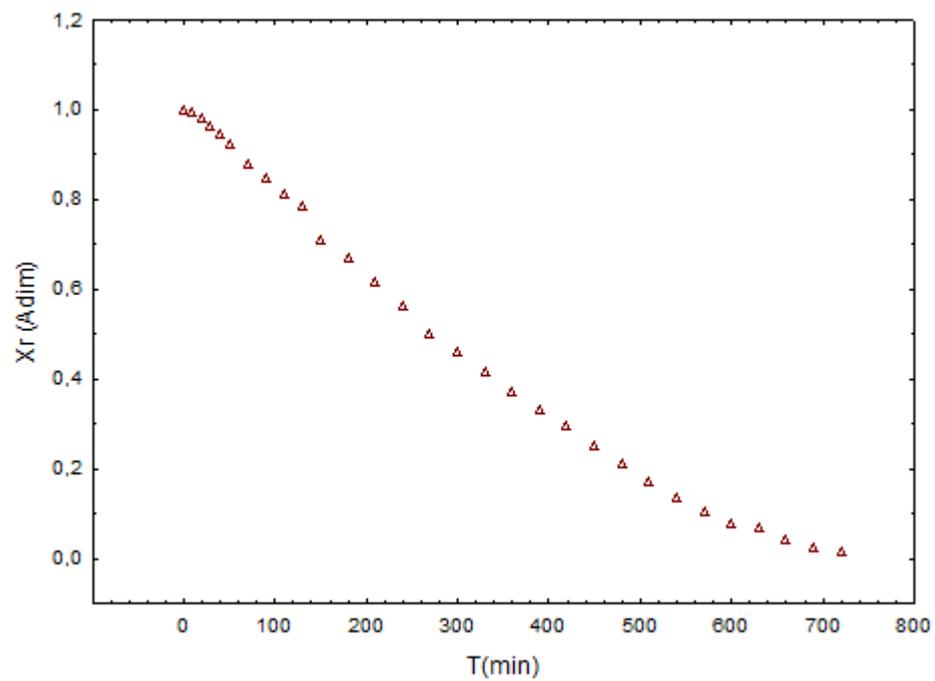
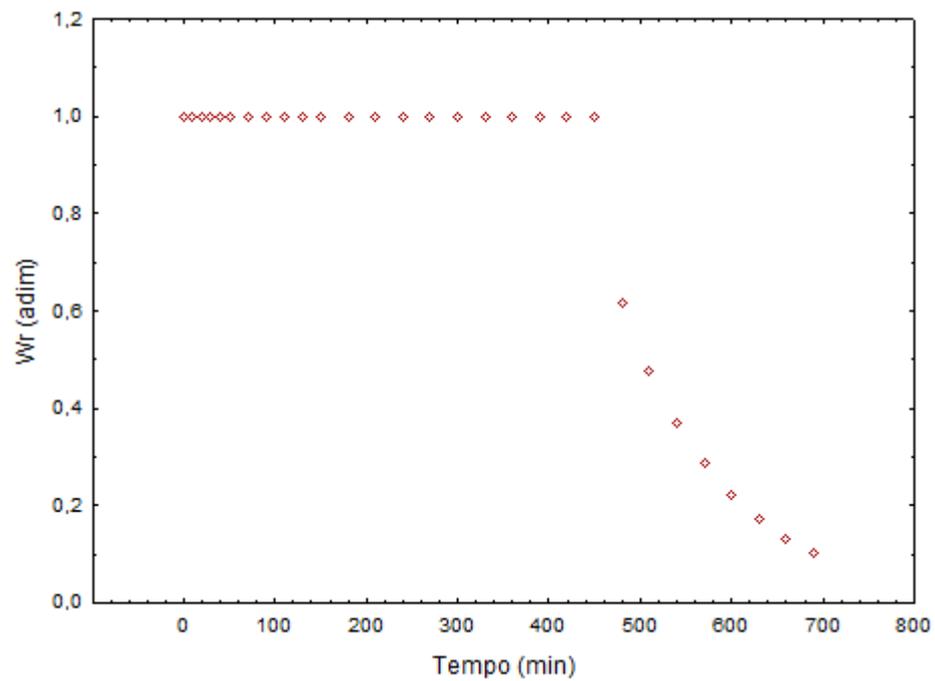
Gráfico 31: Curva de secagem em função do tempo (corrida 10)**Gráfico 32:** Curva de fluxo de secagem (corrida 10)

Dados das Corridas Experimentais:

- Corrida 11
- Temperatura: 90°C
- Espessura: 10mm
- Tempo: 720
- Massa: 482,48
- Área: 283,38 (cm²)
- Mss : 63,29

Tabela 29: Dados da cinética de secagem de *Morinda citrifolia* L (corrida 11)

t (min)	m (g)	Xbs kg água/kg ss	Xbu (%)	Xr (adim)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)
0	482,48	6,62	86,88	1	0,28	1
10	480,16	6,59	86,40	0,994	0,28	1
20	477,3	6,54	85,81	0,988	0,28	1
30	473,2	6,48	84,96	0,978	0,28	1
40	468,21	6,40	83,92	0,966	0,28	1
50	461,01	6,28	82,43	0,949	0,28	1
70	447,46	6,07	79,62	0,916	0,28	1
90	437,4	5,91	77,54	0,892	0,28	1
110	421,89	5,67	74,32	0,855	0,28	1
130	404,41	5,39	70,70	0,814	0,28	1
150	392,14	5,20	68,16	0,784	0,28	1
180	375,55	4,93	64,72	0,745	0,28	1
210	362,77	4,73	62,07	0,714	0,28	1
240	342,26	4,41	57,82	0,665	0,28	1
270	324,79	4,13	54,20	0,624	0,28	1
300	310,44	3,91	51,22	0,590	0,28	1
330	296,65	3,69	48,37	0,557	0,28	1
360	284,12	3,49	45,77	0,527	0,28	1
390	270,2	3,27	42,88	0,494	0,28	1
410	244,77	2,87	37,61	0,433	0,28	1
440	237,43	2,75	36,09	0,415	0,28	1
470	221,48	2,50	32,79	0,377	0,28	1
500	206,5	2,26	29,68	0,342	0,28	1
530	190,39	2,01	26,34	0,303	0,28	1
560	169,75	1,68	22,07	0,254	0,28	1
590	162,46	1,57	20,55	0,237	0,28	1
620	152,22	1,41	18,43	0,212	0,28	1
650	139,75	1,21	15,85	0,182	0,28	1
680	129,57	1,05	13,74	0,158	0,28	1
720	121,27	0,92	12,02	0,138	0,28	1

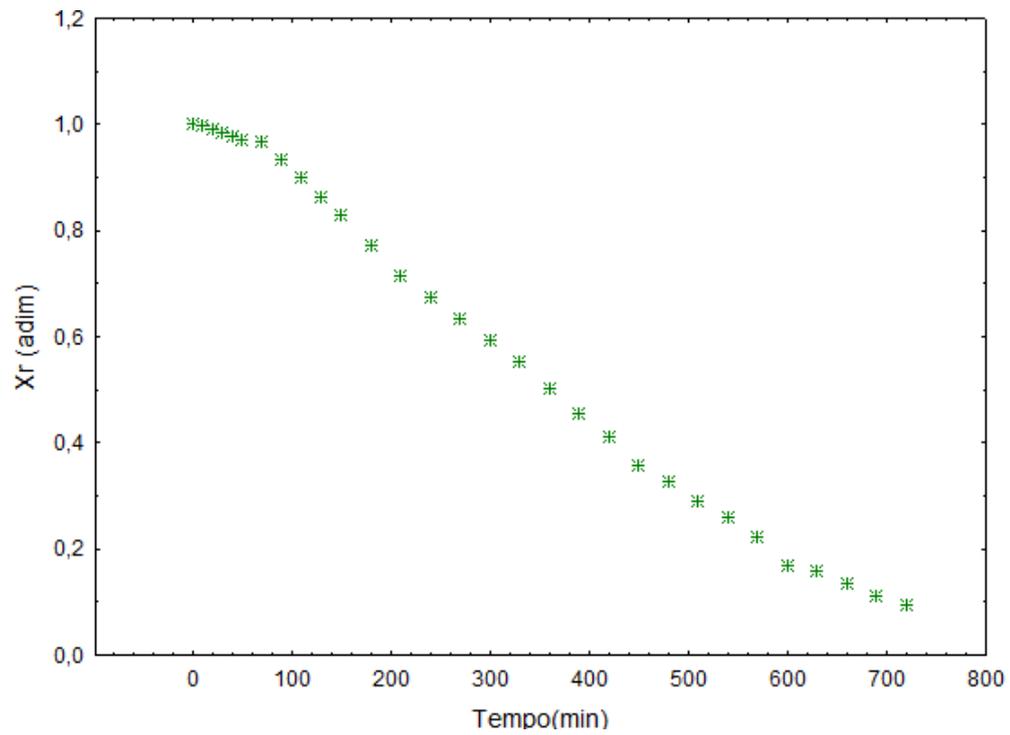
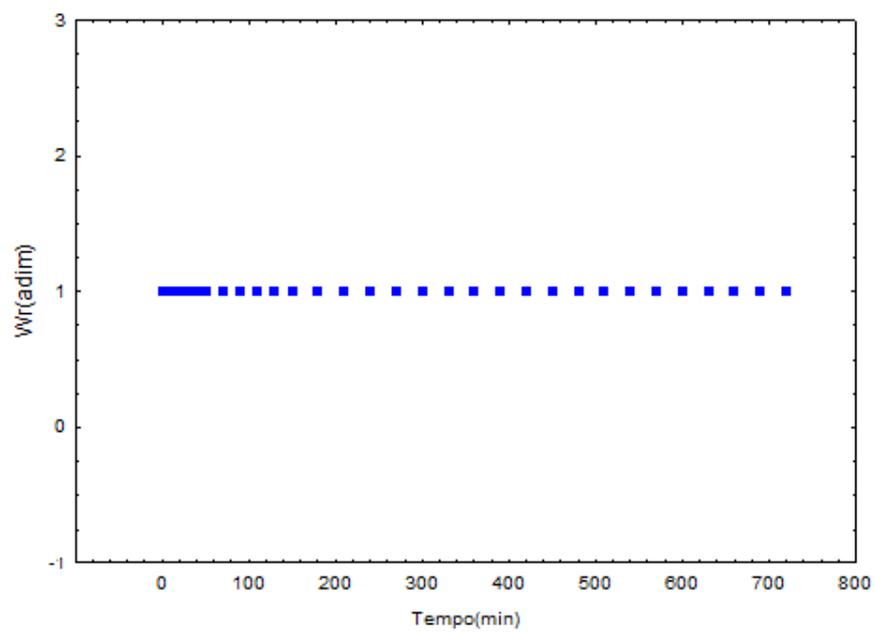
Gráfico 33: Curva de secagem em função do tempo (corrida 11)**Gráfico 34:** Curva de fluxo de secagem em função do tempo (corrida 11)

Dados das Corridas Experimentais:

- Corrida 12
- Temperatura: 75°C
- Espessura: 8mm
- Tempo: 720
- Massa: 344,94
- Área: 283,38 (cm²)
- Mss : 42,02

Tabela 30: Dados da cinética de secagem de *Morinda citrifolia* L (corrida 12)

t (min)	m (g)	Xbs kg água/kg ss	Xbu (%)	Xr (adim)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)
0	344,94	7,21	87,82	1,000	0,10	1
10	343,79	7,18	87,48	1,00	0,10	1
20	342,12	7,14	87,00	0,99	0,10	1
30	339,58	7,08	86,26	0,98	0,10	1
40	338,15	7,05	85,85	0,98	0,10	1
50	336,08	7,00	85,25	0,97	0,10	1
70	334,83	6,97	84,89	0,97	0,10	1
90	324,77	6,73	81,97	0,93	0,10	1
110	314,56	6,49	79,01	0,90	0,10	1
130	303,32	6,22	75,75	0,86	0,10	1
150	292,22	5,95	72,53	0,83	0,10	1
180	275,53	5,56	67,70	0,77	0,10	1
210	258,25	5,15	62,69	0,71	0,10	1
240	245,69	4,85	59,05	0,67	0,10	1
270	233,5	4,56	55,51	0,63	0,10	1
300	221,56	4,27	52,05	0,59	0,10	1
330	208,59	3,96	48,29	0,55	0,10	1
360	193,8	3,61	44,00	0,50	0,10	1
390	179,77	3,28	39,93	0,45	0,10	1
410	165,72	2,94	35,86	0,41	0,10	1
440	149,69	2,56	31,21	0,36	0,10	1
470	141,04	2,36	28,71	0,33	0,10	1
500	129,6	2,08	25,39	0,29	0,10	1
530	120,11	1,86	22,64	0,26	0,10	1
560	108,95	1,59	19,40	0,22	0,10	1
590	92,73	1,21	14,70	0,17	0,10	1
620	89,32	1,13	13,71	0,16	0,10	1
650	82,08	0,95	11,61	0,13	0,10	1
680	75,61	0,80	9,74	0,11	0,10	1
720	70,03	0,67	8,12	0,09	0,10	1

Gráfico 35: Curva de secagem em função do tempo (Corrida 12)**Gráfico 36:** Curva de fluxo de secagem em função do tempo (Corrida 12)

APÊNDICE B: QUALIDADE DOS MODELOS CINÉTICOS

Tabela 31:Qualidade dos modelos cinéticos para a corrida 1

Modelo(ano)	Parâmetros	R ² (%)	Faixa de Resíduos	Distribuição de resíduos	Qualidade do modelo
Page(1949)	K=-0,3411 n=0,0000 a=0,6063	88,15	(-0,06-0,4)	Tendenciosa	Ruim
Henderson e Pabis(1961)	a=8,9615 k=0,0018	99,98	(-0,015-0,02)	Aleatória	Boa
Linear	a=0,9869 b=0,0008	99,98	(-0,020-0,015)	Tendenciosa	Ruim
Wang Sing(1978)	a=0,0006 b=-0,0000	99,91	(-0,20-0,20)	Tendenciosa	Ruim
Midilli et al (2002)	a= 0,7589 k=- 0,1108 n= 0,0000 b -0,0001	41,17	(0,0250-0,015)	Tendenciosa	Ruim
logaritmo	K=0,0005 a= 1,9976 b= -0,9992	99,96	(-0,03-0,02)	Tendenciosa	Ruim

Gráfico 37:Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para (corrida 1)

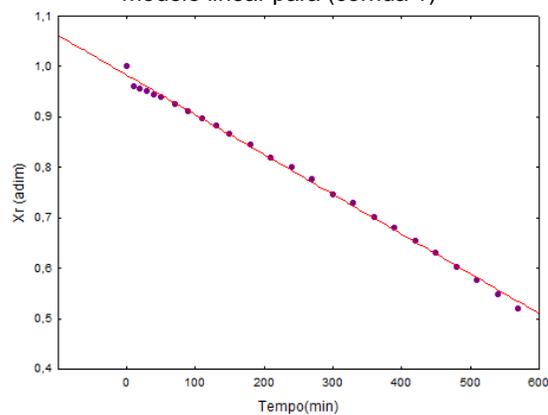


Gráfico 38:Ajuste dos dados de secagem ao modelo (Não-linear) para corrida 1 ao modelo de Henderson e Pabis(1961)

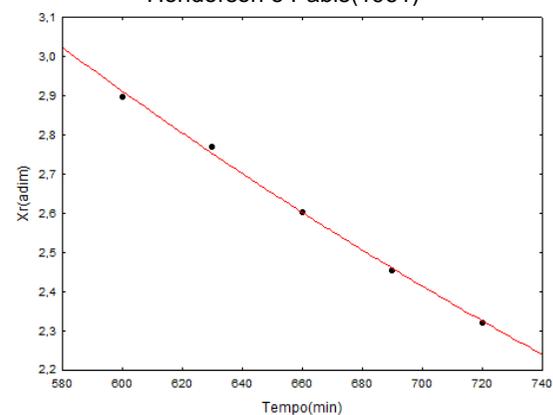


Gráfico 39:Gráfico de valores preditos versus residuais para corrida 1

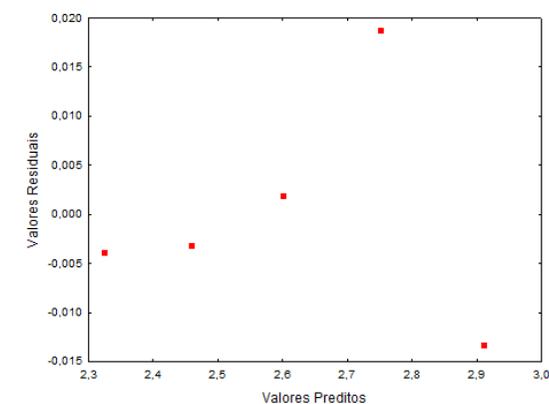


Tabela 32:Qualidade dos modelos cinéticos para a corrida 2

Modelo(ano)	Parâmetros	R ² (%)	Faixa de Resíduos	Distribuição de resíduos	Qualidade do modelo
Page(1949)	K= 0,000383 n= 1,395217	99,96	(-0,0;1,0)	Tendenciosa	Ruim
Henderson e Pabis(1961)	a= 1,300840 k= 0,006049	99,74	(0,06;0,08)	Tendenciosa	Ruim
Linear	a= 0,930480 b= 0,001571	99,25	(-0,01;0,12)	Tendenciosa	Ruim
Wang Sing(1978)	a= -0,00270 b=- 0,0002	98,82	(0,0;0,1)	Tendenciosa	Ruim
Midilli et al (2002)	a = 125,9699 k = 0,016100 n= 0,151579 b= 0,151579	99,98	(-0,08;0,09)	Aleatória	Boa
Logarítimo	K=0,000476 a=1,028991 c=-0,000055	92,23	(-0,05-0,03)	Tendenciosa	Ruim

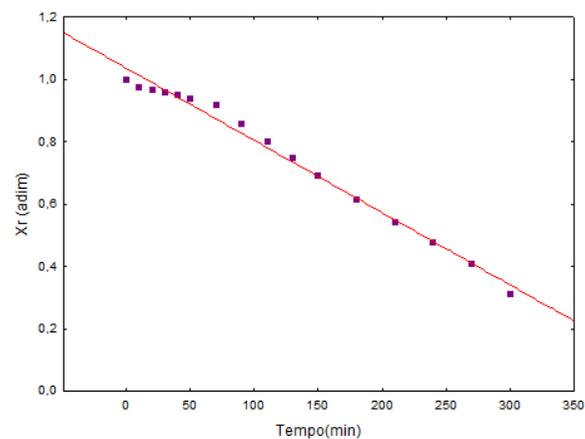
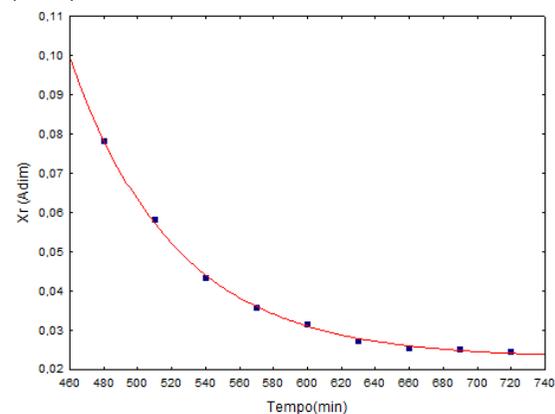
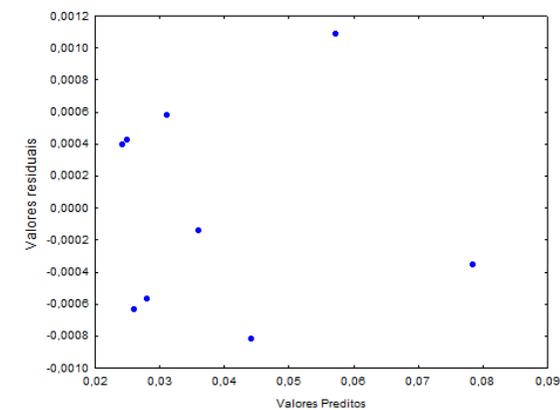
Gráfico 40:Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para (corrida 2)**Gráfico41:**Ajuste dos dos dados de secagem (Não-linear) para corrida 2 ao modelo deMidilli et al (2002)**Gráfico 42:**Gráfico de valores preditos versus resíduos para corrida 2

Tabela 33:Qualidade dos modelos cinéticos para a corrida 3

Modelo(ano)	Parâmetros	R ² (%)	Faixa de Resíduos	Distribuição de resíduos	Qualidade do modelo
Page(1949)	K= 0,003487 n= 1,651688	99,91	(-0,02;0,02)	Tendenciosa	Ruim
Henderson e Pabis(1961)	a=8,9615 k= 0,0018	99,74	(-0,019;0,014)	Tendenciosa	Ruim
Linear	a= 1,041448 b= 0,002290	99,20	(-0,03;0,09)	Aleatória	Boa
Wang Sing(1978)	a= -0,035 b=- 0,0029	-	(-0,8;0,40)	Tendenciosa	Ruim
Midilli et al (2002)	K= -0,001381 a= 0,413758 b= -0,001525 n=0,55674	99,88	(-0,02;0,0,20)	Tendenciosa	Boa
Logaritmico	K=0,024974 a=0,346467 c=0,021983	98,23	(-0,015-0,015)	Tendenciosa	Ruim

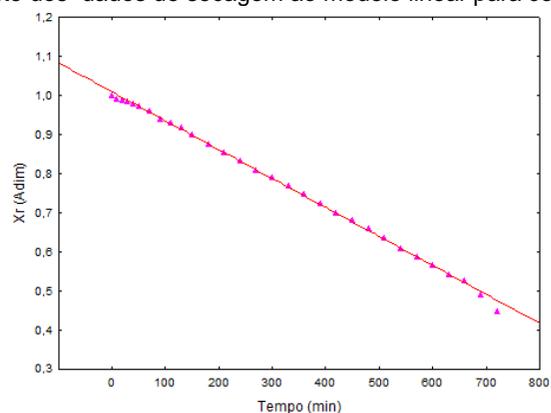
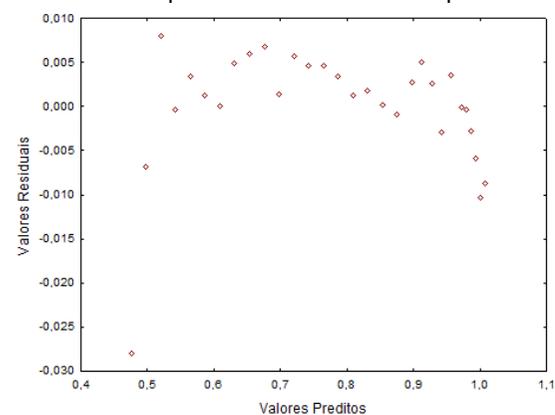
Gráfico43:Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 3**Gráfico 44:**Gráfico de valores preditos versus residuais para corrida 3

Tabela 34:Qualidade dos modelos cinéticos para a corrida 4

Modelo(ano)	Parâmetros	R ² (%)	Faixa de Resíduos	Distribuição de resíduos	Qualidade do modelo
Page(1949)	K= 0,0004 n= 1,3029	99,15	(-0,08;0,04)	Tendenciosa	Ruim
Henderson e Pabis(1961)	a= 1,062649 k= 0,002203	98,13	(-0,007;0,005)	Tendenciosa	Ruim
Linear	a= 0,990829 b= 0,001256	99,83	(-0,03;0,05)	Aleatória	Boa
Wang Sing(1978)	a= -0,00145 b=0,000000	99,49	(-0,02;0,28)	Aleatória	Boa
Midilli et al (2002)	a= 0,8633 k =- 0,1028 n= - 0,000 b =-0,0010	95,70	(-0,10;0,0,14)	Tendenciosa	Ruim
logaritimo	K=0,734 a=0,001 c=-0,002	96,32	(-0,12,016)	tendenciosa	Ruim

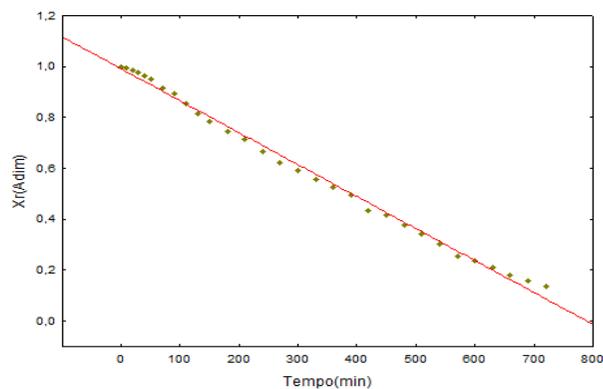
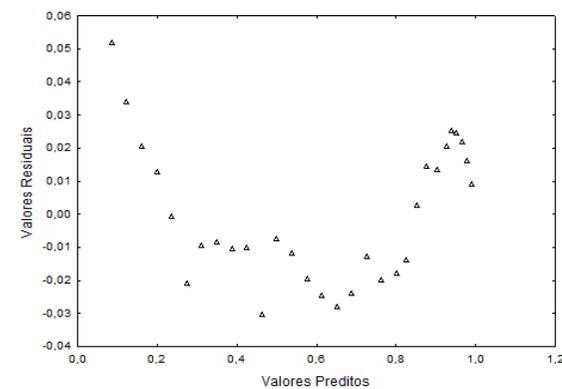
Gráfico45:Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 4**Gráfico 46:**Gráfico de valores preditos versus residuais para corrida 4

Tabela 35:Qualidade dos modelos cinéticos para a corrida 5

Modelo(ano)	Parâmetros	R ² (%)	Faixa de Resíduos	Distribuição de resíduos	Qualidade do modelo
Page(1949)	K= 0,0061 n= 0,7898	92,20,	(-0,020;0,025)	Tendenciosa	Ruim
Henderson e Pabis(1961)	a= 1,052517 k= 0,001234	98,70	(-0,05;0,03)	Tendenciosa	Ruim
Linear	a=1,004879 b=0,001611	99,79	(-0,19;0,24)	Aleatória	Boa
Wang Sing(1978)	a= -0,000809 b= 0,000	98,93	(-0,3;0,04)	Tendenciosa	Ruim
Midilli et al (2002)	a= 1,003304 k = -0,020490 n= 0,000308 b= - 0,000896	99,36	(-0,29;0,029)	Tendenciosa	Ruim
Logaritimico	K= 0,002335 a=-0,0034 c=0,002	98,24	(-0,30;0,20)	Tendenciosa	Ruim

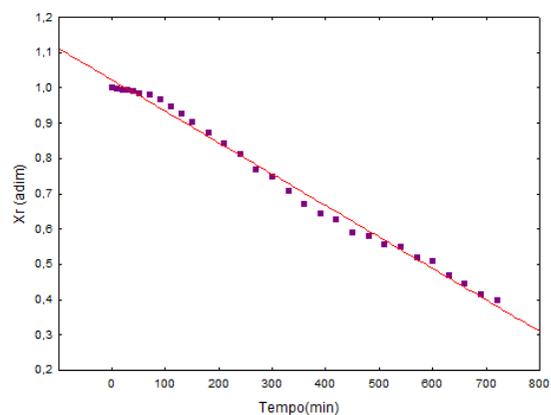
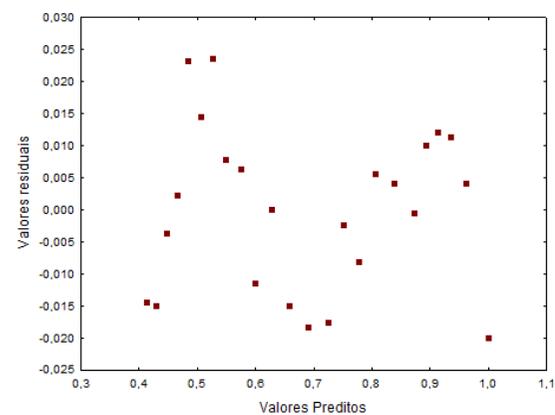
Gráfico47:Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 5**Gráfico 48:** Gráfico de valores preditos versus residuais para corrida 5

Tabela 36: Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 6

Modelo(ano)	Parâmetros	R ² (%)	Faixa de Resíduos	Distribuição de resíduos	Qualidade do modelo
Page(1949)	K= 0,000359 n= 1,366151	98,63	(0,0;1,0)	Tendenciosa	Ruim
Henderson e Pabis(1961)	a= 0,964465 k= 0,006759	99,76	(-0,025;0,019)	Aleatória	Boa
Linear	a=1,048152 b=0,002059	98,66	(-0,26;0,38)	Aleatória	Boa
Wang Sing(1978)	a= -0,002266 b= 0,000001	96,54	(-0,06;0,10)	Tendenciosa	Ruim
Midilli et al (2002)	a= 0,9110 k =- 0,1615 n= 0,00001 b= - 0,0013	95,45	(-0,12;0,10)	Tendenciosa	Ruim
Logaritimico	K= 0,002335 a=-0,0034 c=0,002	93,54	(-0,30;0,20)	Tendenciosa	Ruim

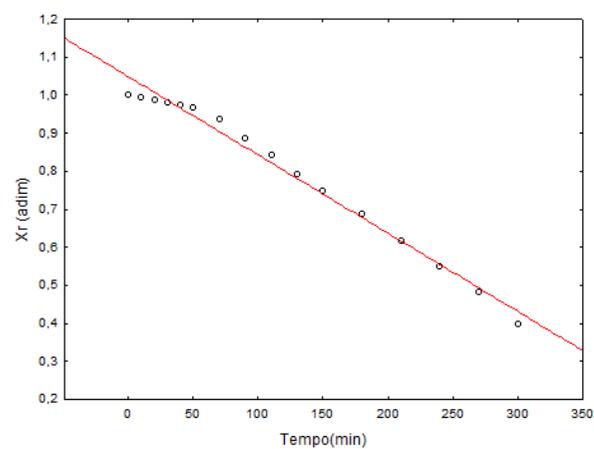
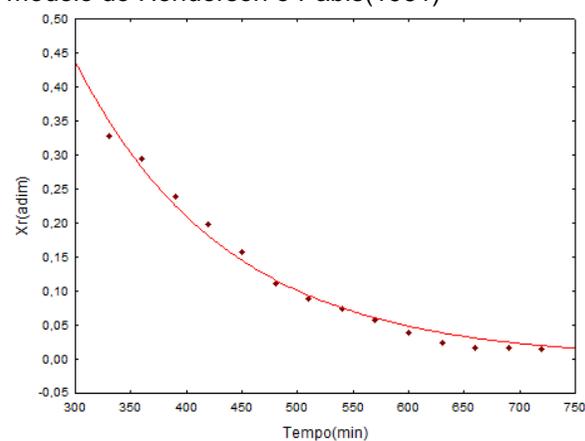
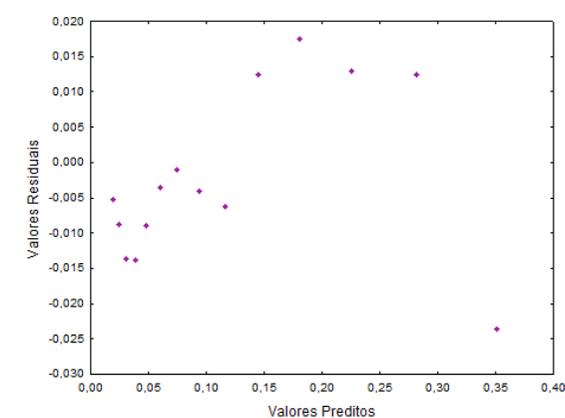
Gráfico49: Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 6**Gráfico 50:** Ajuste dos dados de secagem ao modelo (Não-linear) para corrida 6 ao modelo de Henderson e Pabis(1961)**Gráfico 51:** Gráfico de valores preditos versus resíduos para corrida 6

Tabela 37:Ajuste dos dados de secagem para corrida 7

Modelo(ano)	Parâmetros	R ² (%)	Faixa de Resíduos	Distribuição de resíduos	Qualidade do modelo
Page(1949)	K= 7,832 n= 0,345	95,24	(-0,01;0,07)	tendenciosa	Ruim
Henderson e Pabis(1961)	a= 99,53 k= 0,008	98,64	(-0,09;0,06)	Aleatória	Boa
Linear	a= 1,002 b= 0,001	99,50	(-0,03;0,04)	Aleatória	Boa
Wang Sing(1978)	a -0,0079 b=-0,00007	73,85	(-0,1;0,6)	tendenciosa	Ruim
Midilli et al (2002)	a= 4,8093 k =0,0813 n= 0,000006 b= -0,0061	94,23	(-0,1;0,6)	aleatoria	Ruim
Lewis(1921)	K= 0,00065	13,24	(-0,06-1,0)	tendenciosa	Ruim

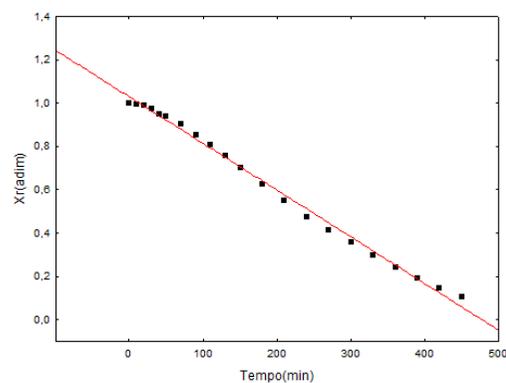
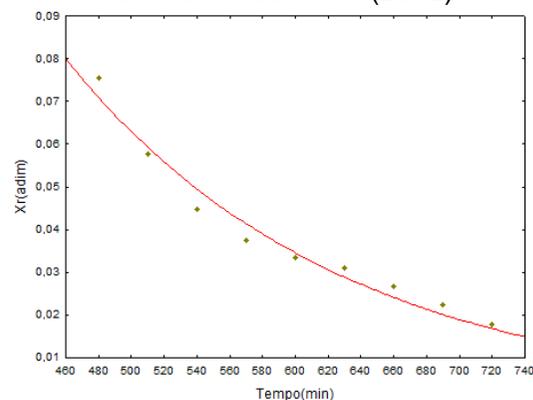
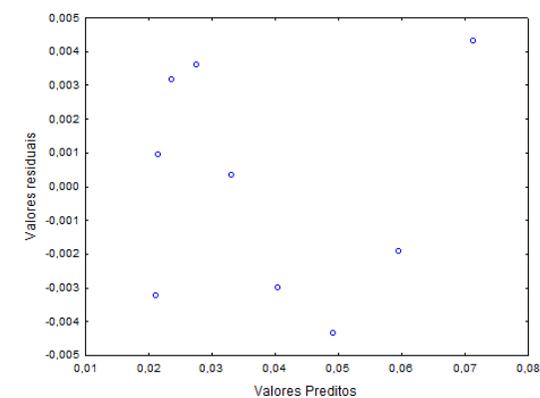
Gráfico52:Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 7**Gráfico53:**Ajuste dos dados de secagem modelo (Não-linear) para corrida 7 ao modelo de Midilli et al. (2002)**Gráfico 54:**Gráfico de valores preditos versus residuais para corrida 7

Tabela 38: Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 8

Modelo(ano)	Parâmetros	R ² (%)	Faixa de Resíduos	Distribuição de resíduos	Qualidade do modelo
Page(1949)	K=0,0124 n=0,8521	88,30	(-0,059;0,06)	Tendenciosa	Ruim
Henderson e Pabis(1961)	a=17,61271 k=0,007654	98,26	(-0,01;0,011)	Aleatória	Boa
Linear	a=1,0431 b=0,0014	99,30	(-0,04;0,04)	Aleatória	Boa
Wang Sing(1978)	a= -0,0456 b= 0,327	89,54	(-0,6;0,50)	Tendenciosa	Ruim
Midilli et al (2002)	a= 2,503800 k =0,000724 n=0,2534 b=0,0943	96,24	(-0,21;0,0,40)	Tendenciosa	Ruim
Logarítmo	a= 2,503800 k =0,000724 c= -1,43548	99,34	(-0,08-0,04)	Tendenciosa	Ruim

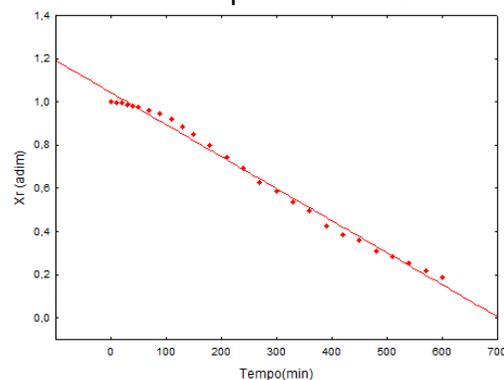
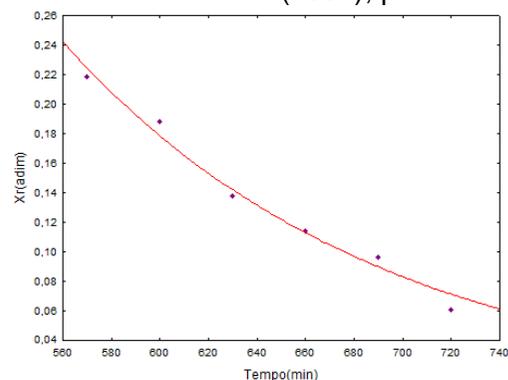
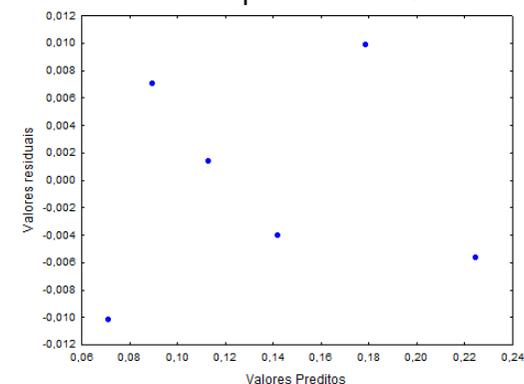
Gráfico55: Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 8**Gráfico56:** Ajuste dos dados modelo não linear de Midilli et al. (2002), para corrida 8**Gráfico 57:** Gráfico de valores preditos versus residuais para corrida 8

Tabela 39: Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 9

Modelo(ano)	Parâmetros	R ² (%)	Faixa de Resíduos	Distribuição de resíduos	Qualidade do modelo
Page(1949)	K= 0,000437 n= 1,302903	99,15	(-0,07;0,04)	Tendenciosa	Ruim
Henderson e Pabis(1961)	a= 28,25844 k= 0,009320	99,49	(-0,08;0,042)	Aleatória	Boa
Linear	a= 1,004879 b= 0,001611	99,62	(-0,02;0,03)	Aleatória	Boa
Wang Sing(1978)	a= - 0,00633 b= 0,00002	95,12	(-0,02;0,01)	Tendenciosa	Ruim
Midilli et al (2002)	a= 1,0234 k=-0,0345 n= 0,987 b= 0,639	98,34	(-0,45;0,35)	Tendenciosa	Ruim
Logarítmo	a= 0,1234 k=-0,0067 c= 0,5437	97,50	(-0,01-0,04)	Tendenciosa	Ruim

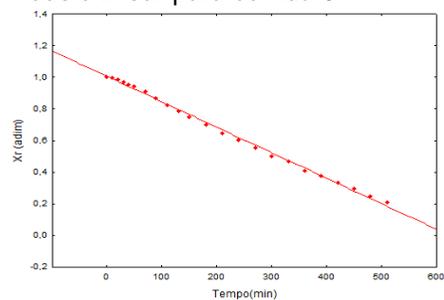
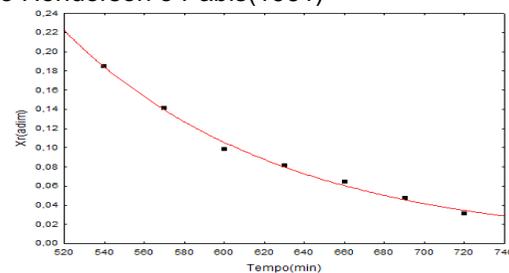
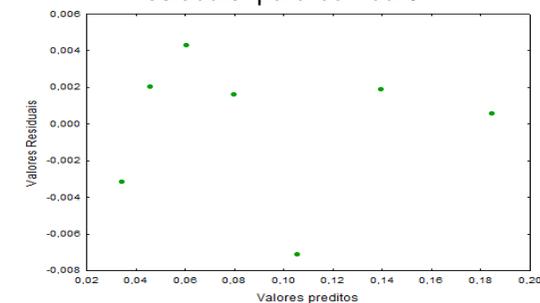
Gráfico58: Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 9**Gráfico59:** Ajuste dos dados de secagem modelo (Não-linear) para corrida 9 ao modelo de Henderson e Pabis(1961)**Gráfico 60:** Gráfico de valores preditos versus residuais para corrida 9.

Tabela 40: Ajuste dos dados de secagem para corrida 10

Modelo(ano)	Parâmetros	R ² (%)	Faixa de Resíduos	Distribuição de resíduos	Qualidade do modelo
Page(1949)	K= 5,828 n= 4572	98,30	(-0,02;0,023)	Aleatória	Boa
Henderson e Pabis(1961)	a= 3,9766 k= 0,0073	98,68	(-0,025;0,019)	Aleatória	Boa
Linear	a= 1,0014 b= 0,0006	99,40	(-0,015;0,012)	Aleatória	Boa
Wang Sing(1978)	a= -0,0022 b= 0,0000	97,20	(-0,06;0,99)	Tendenciosa	Ruim
Midilli et al (2002)	a= 1,0312 k =-0,3454 n= -0,2094 b= -0,2178	99,34	(-0,26;0,0,25)	Tendenciosa	Ruim
Lewis(1921)	K= 0,00320	93,65	(-0,02-0,01)	Tendenciosa	Ruim

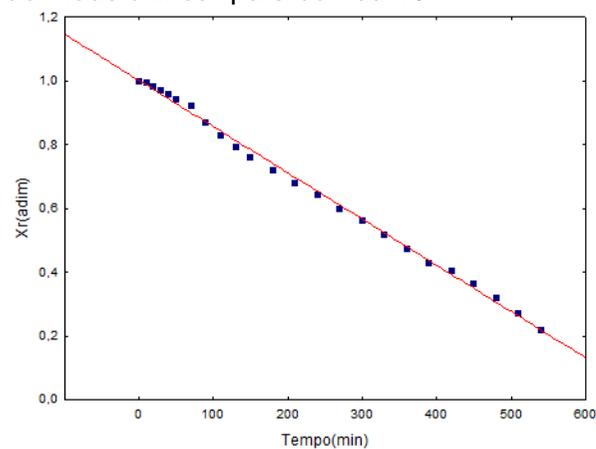
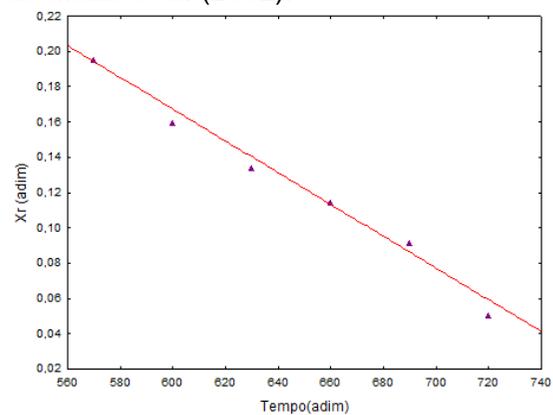
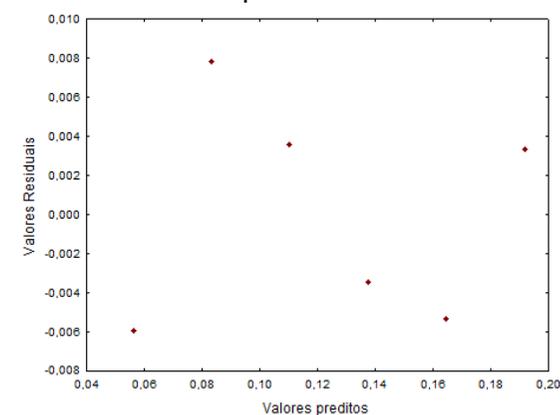
Gráfico 61: Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 10**Gráfico 62:** Ajuste dos dados de secagem ao modelo (Não-linear) modelo de Midilli et al. (2002).**Gráfico 63:** Gráfico de valores preditos versus residuais para corrida 10

Tabela 41: Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 11

Modelo(ano)	Parâmetros	R ² (%)	Faixa de Resíduos	Distribuição de resíduos	Qualidade do modelo
Page(1949)	K= 1,308 n= 2,957	97,43	(-0,02;0,02)	Tendenciosa	Ruim
Henderson e Pabis(1961)	a= 1,062 k= 0,002	98,13	(-0,018;0,009)	Aleatória	Ruim
Linear	a= 0,9908 b= 0,0012	99,49	(-0,025;0,025)	Aleatória	Boa
Wang Sing(1978)	a= -0,0014 b= 0,0001	99,83	(-0,4;0,30)	Tendenciosa	Ruim
Midilli et al (2002)	a= 1,031212 k =-0,046558 n= -0,034021 b= -0,000460	99,34	(-0,31;0,0,39)	tendenciosa	Ruim
Lewis(1921)	K= 0,002021	97,33	(-0,01-0,06)	tendenciosa	Ruim

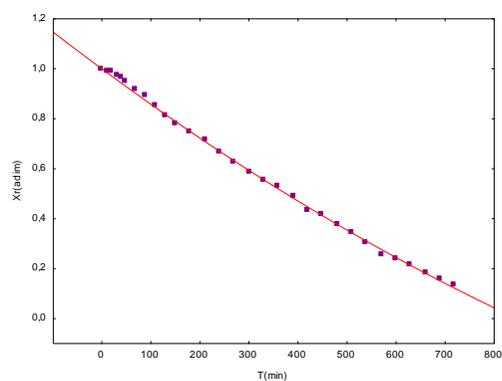
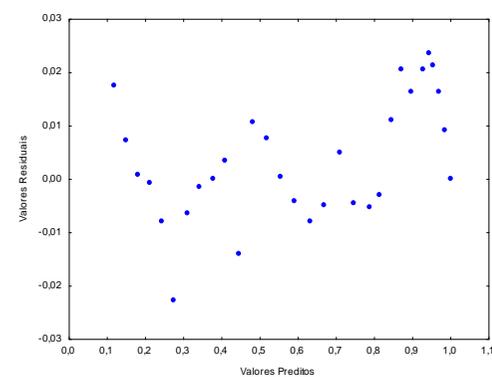
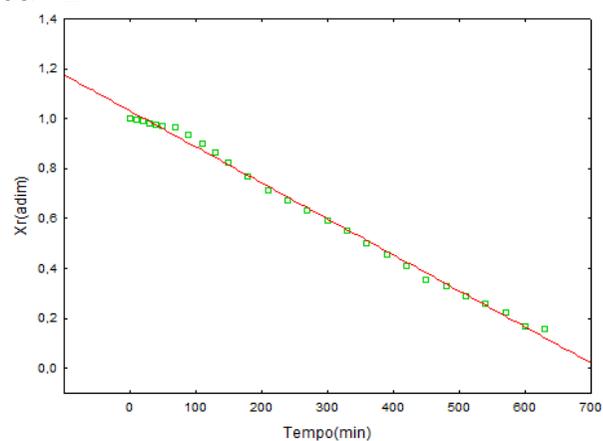
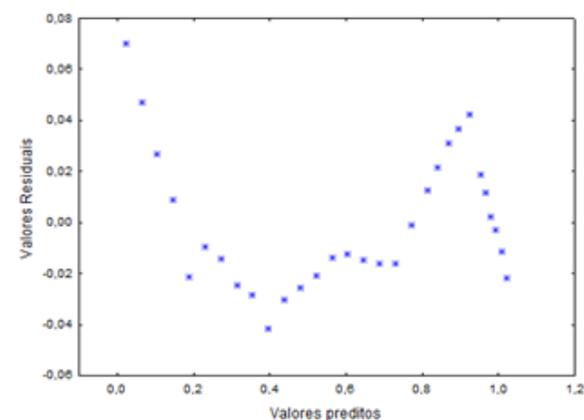
Gráfico 64: Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 11**Gráfico 65:** Gráfico de valores preditos versus residuais para corrida 11

Tabela 42:Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 12

Modelo(ano)	Parâmetros	R ² (%)	Gráfico 2D	Faixa de Resíduos	Distribuição de resíduos	Qualidade do modelo
Page(1949)	K= -0,0341 n= 0,00001	65,24	NPM	(-0,35;0,3)	Tendenciosa	Ruim
Henderson e Pabis(1961)	a= 1,052517 k= 0,001234	98,70	PMP	(-0,055;0,03)	Tendenciosa	Ruim
Linear	a= 1,022274 b= 0,000891	99,32	PMP	(-0,033;0,03)	Aleatória	Boa
Wang Sing(1978)	a= - 0,0008 b= 0,0001	98,23	PMP	(-0,35;0,04)	Aleatória	Boa
Midilli et al (2002)	a= 1,0024 k =-0,0215 n= -0,0000 b = 0,0008	99,36	PMP	(-0,31;0,0,39)	Tendenciosa	Ruim
Lewis(1921)	K= 0,004624	94,20	NPM	(-0,04-0,02)	tendenciosa	Ruim

Gráfico66:Ajuste dos dados de secagem ao modelo linear para corrida 12**Gráfico 67:**Gráfico de valores preditos versus residuais para corrida 12

APÊNDICE C

MEMÓRIA DE CALCULO DAS VARIÂNCIAS EXPLICADA E REAL

A variância pode ser expressa como:

$$SQ_T = SQ_R + SQ_E$$

Onde SQT: representa a soma quadrática total;

SQ_R: soma quadrática dos resíduos;

SQ_E: soma quadrática dos erros;

Sendo que a SQ dos resíduos divide-se em soma quadrática devido ao erro puro (SQ_{ep}) e soma quadrática devida a falta de ajuste do modelo(SQ_{faj}), então:

$$SQT = SQ_{ep} + SQ_{faj} + SQ_E$$

Os coeficientes de determinação múltipla, R^2 representam a percentagem de variância de acordo com a equação de regressão:

$$R^2 = \frac{SQ_R}{SQ_T} = 1 - \frac{SQ_E}{SQ_T}$$

A variância explicável pode ser determinada a partir das parcelas relativas à regressão e à falta de ajuste:

$$R^2 = \frac{SQ_T - SQ_{EP}}{SQ_T} = 1 - \frac{SQ_{EP}}{SQ_T}$$

A partir da Tabela 40: Análise de variância (ANOVA), pode se calcular as variâncias real e explicada .para a variável de resposta umidade final Xr

Tabela 40: Análise de variância (ANOVA)

Efeitos	SQ	GL	MQ	F	p
X ₁	0,186645	1	0,186645	171,6097	0,000961
X ₁ ²	0,079635	1	0,079635	73,2196	0,003354
X ₂	0,006474	1	0,006474	5,9529	0,092513
X ₂ ²	0,003355	1	0,003355	3,0852	0,177265
X ₁ X ₂	0,000832	1	0,000832	0,7650	0,446144
Falta de ajuste	0,036369	3	0,012123	11,1465	0,039097
Erro puro	0,003263	3	0,001088	—	—
Total	0,313243	11	—	—	—

Sendo:

$$SQ_T = 0,313243$$

$$SQ_R = SQ_T - (SQ_{faj} + SQ_{EP}) = 0,313243 - (0,036369 + 0,003263) = 0,280137$$

$$R^2 = (0,280137 / 0,313243) \cdot 100 = 89,43\% \text{ (variância explicada)}$$

$$R^2 = [(0,313243 - 0,003263) / 0,313243] \cdot 100 = 98,95\% \text{ (variância real).}$$