



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

**ROSILENE GOMES COSTA**

**ESTUDO DA OBTENÇÃO DO ÓLEO ESSENCIAL E DA SECAGEM  
DA PATAQUEIRA (*Conoclea scoparioides* Cham. & Schlttdl.), DE  
ORIGEM NATURAL E DE CULTIVO HIDROPÔNICO.**

**BELÉM**

**2010**

**ROSILENE GOMES COSTA**

**ESTUDO DA OBTENÇÃO DO ÓLEO ESSENCIAL E DA SECAGEM  
DA PATAQUEIRA (*Conoclea scoparioides* Cham. & Schldl.), DE  
ORIGEM NATURAL E DE CULTIVO HIDROPÔNICO.**

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

AREA DE CONCENTRAÇÃO: Desenvolvimento de Processos

**ORIENTADORES: Prof. Dr. José Guilherme Soares Maia  
Prof. Dr. Lênio José Guerreiro de Faria**

**BELÉM**

**2010**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Biblioteca Setorial do Curso de Mestrado em Engenharia Química**

---

Rosilene Gomes Costa

Estudo da obtenção do óleo essencial e da secagem da Pataqueira (Conobea scoparioides Cham. & Schltl.), de origem natural e de cultivo hidropônico/ Rosilene Gomes Costa; orientadores, José Guilherme Soares Maia e Lênio José Guerreiro de Faria.- 2010

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2010

1. Plantas aromáticas 2. Essências e óleos essenciais 3. Secagem 4. Hidroponia I. Título

CDD 22.ed. 581.636

---

ROSILENE GOMES COSTA

**ESTUDO DA OBTENÇÃO DO ÓLEO ESSENCIAL E DA SECAGEM  
DA PATAQUEIRA (*Conoclea scoparioides* Cham. & Schltdl.), DE  
ORIGEM NATURAL E DE CULTIVO HIDROPÔNICO.**

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.

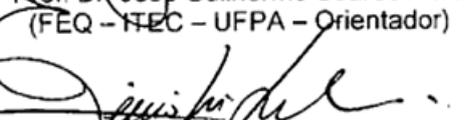
Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos

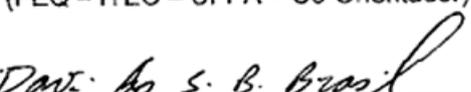
DATA DA AVALIAÇÃO: 12 107 12010

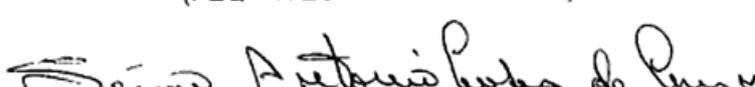
CONCEITO: EXCELENTE

BANCA EXAMINADORA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Guilherme Soares Maia  
(FEQ - ITEC - UFPA - Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Lênio José Guerreiro de Faria  
(FEQ - ITEC - UFPA - Co-Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Davi do Socorro Barros Brasil  
(FEQ - ITEC - UFPA - Membro)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sérgio Antonio Lopes de Gusmão  
(Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA - Membro)

Esse trabalho é dedicado a minha querida família, em especial aos meus pais, meus irmãos e meu namorado.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que me deu força, proteção e saúde para desenvolver esse trabalho e vencer todos os obstáculos que apareceram pelo caminho, agradeço também a virgem de Nazaré que atendeu as minhas preces e me fortaleceu espiritualmente para alcançar essa vitória.

Aos meus pais, Antonio Aureliano da Silva Costa e Maria Rosa Gomes Costa, pelo apoio, dedicação e paciência durante todo esse período. Aos meus irmãos Renato, Rosilane, Rosileide e Ricardo, pela força e companheirismo. E ao meu namorado Aldenor Lacerda e sua família, por sempre estarem ao meu lado.

Ao **Prof. Dr. José Guilherme Maia**, pela sua orientação, colaboração e apoio em cada etapa do desenvolvimento desse trabalho.

Ao **Prof. Dr. Lênio José Guerreiro de Faria**, pela orientação, incentivo e força para a realização desse trabalho.

Ao **Prof. Dr. Sérgio Gusmão**, pela sua grande contribuição no desenvolvimento do cultivo hidropônico, agradeço em especial pela sua paciência e seu auxílio que foi de suma importância para a realização deste trabalho.

A Prof. M.Sc. Joyce Kelly do Rosário da Silva, por todas as análises de cromatografia e pelo auxílio durante cada análise dos óleos essenciais.

Aos alunos de engenharia química Welisson de Araújo Silva e Melina Murata Natividade, pelo apoio no processo de cultivo hidropônico e de secagem em leito fixo.

Aos amigos do LEPRON, Elisângela, Rafaela, Ferdinando, Matheus e Julio, pelo apoio, amizade e grande ajuda nas análises realizadas. Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Química (LEQ) Mario e Saulo, por disponibilizar a água desmineralizada utilizada no início do cultivo hidropônico.

Aos meus amigos de curso: Érika Sousa, Daniela Lira, Simone Aranha, Clairon Lima e Carlos da Silva pela sua companhia, amizade, e pelos momentos de confraternização.

Aos professores do PPEQ por todo o conhecimento passado, e a CAPES pela concessão da bolsa

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que esse trabalho se concretizasse.

“Confia ao Senhor a tua sorte, espera nele, e ele agirá. Como a luz, fará  
brilhar a tua justiça e como o sol do meio-dia, o teu direito.”.

(Salmo 36)

## LISTA DE ILUSTRAÇÃO

### Esquemas

Esquema 1	Principais componentes do óleo essencial da pataqueira	24
Esquema 2	Protótipo do secador de leite fixo utilizado nesse trabalho	49
Esquema 3	Estrutura física do Kit Mini-Horta Hidropônica	67

### Fluxogramas

Fluxograma 1	Seqüência de experimentos para a secagem de pataqueira em leite fixo	55
--------------	--	----

### Fotografias

Fotografia 1	Espécie herbácea <i>Conobea scoparioides</i> (pataqueira)	22
Fotografia 2	Pataqueira em seu habitat natural no Utinga (Belém-PA)	46
Fotografia 3	Leito em aço inoxidável contendo amostras	48
Fotografia 4	Secador de leite fixo	48
Fotografia 5	Amostras de pataqueira coletadas para hidroponia	50
Fotografia 6	Planta de pataqueira	51
Fotografia 7	Instalação das plantas de pataqueira na horta hidropônica	62
Fotografia 8	Plantas de pataqueira após 1 mês de cultivo hidropônico	62
Fotografia 9	Plantas de pataqueira após 2 mês de cultivo hidropônico	62
Fotografia 10	Plantas de pataqueira após 4 meses de cultivo hidropônico	63
Fotografia 11	Sistema radicular das plantas no sistema hidropônico.	63
Fotografia 12	Horta hidropônica após as coleta das amostras de pataqueira	63
Fotografia 13	Plantas de pataqueira cultivadas no Kit mini-horta hidropônica	68
Fotografia 14	Entrelaçamento dos sistemas radiculares das plantas	68
Fotografia 15	Curvatura da planta devido ao tombamento durante o cultivo hidropônico	68
Fotografia 16	Plantas de pataqueira durante o período quente	69
Fotografia 17	Plantas de pataqueira mortas	69

## Gráficos

Gráfico 1	Curvas de secagem (A) e de taxa de secagem (B)	37
Gráfico 2	Altura média e máxima da parte aérea de amostras de pataqueira cultivadas em sistema hidropônico tipo NFT	64
Gráfico 3	Granulometria do solo	66
Gráfico 4	Diagrama de Pareto dos efeitos individuais e combinados para a resposta REND	77
Gráfico 5	Diagrama de Pareto dos efeitos individuais e combinados para a resposta XF	79
Gráfico 6	Gráfico de distribuição e gráfico de probabilidade normal dos resíduos para REND	83
Gráfico 7	Gráfico de distribuição e gráfico de probabilidade normal dos resíduos para XF	84
Gráfico 8	Superfície de resposta (Gráfico 3D) e curvas de níveis ( $X_3 = 0$ ) para a resposta REND	85
Gráfico 9	Superfície de resposta (Gráfico 3D) e curvas de níveis ( $X_2 = 0$ ) para a resposta REND	86
Gráfico 10	Superfície de resposta (Gráfico 3D) e curvas de níveis ( $X_3 = 0$ ) para a resposta XF	87
Gráfico 11	Gráficos da função desejabilidade para as variáveis de respostas REND, XF, MT e TI	88
Gráfico 12	Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 1 (60 °C, 60 min, 300 g)	89
Gráfico 13	Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 2 (80 °C, 60 min, 300 g)	90
Gráfico 14	Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 3 (60 °C, 120 min, 300 g)	90
Gráfico 15	Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 4 (80 °C, 120 min, 300 g)	90
Gráfico 16	Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 5 (60 °C, 90 min, 200 g)	91
Gráfico 17	Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 6 (80 °C, 90 min, 200 g)	91
Gráfico 18	Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 7 (60 °C, 90 min, 400 g)	91
Gráfico 19	Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 8 (80 °C, 60 min, 200 g)	92
Gráfico 20	Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 9 (70 °C, 60 min, 200 g)	92

Gráfico 21	Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 10 (70 °C, 120 min, 200 g)	92
Gráfico 22	Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 11 (70 °C, 60 min, 400 g)	93
Gráfico 23	Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 12 (70 °C, 120 min, 400 g)	93
Gráfico 24	Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 13 (70 °C, 90 min, 300 g)	93
Gráfico 25	Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 14 (70 °C, 90 min, 300 g)	94
Gráfico 26	Curva de taxa de secagem para as corridas com t = 60 min	96
Gráfico 27	Curvas de taxa de secagem para as corridas com t = 90 min	96
Gráfico 28	Curvas de taxa de secagem para as corridas com t = 120 min	97
Gráfico 29	Curvas de taxa de secagem para o ponto central	97
Gráfico 30	Curva de secagem dos dados experimentais da repetição da Corrida 1 com a amostra hidropônica	100
Gráfico 31	Curva de secagem dos dados experimentais da repetição da Corrida 2 com a amostra hidropônica	100
Gráfico 32	Curva de secagem dos dados experimentais da repetição da Corrida 4 com a amostra hidropônica	100
Gráfico 33	Curva de secagem dos dados experimentais da repetição da Corrida 9 com a amostra hidropônica	101
Gráfico 34	Curva de secagem dos dados experimentais da repetição da Corrida no ponto central com a amostra hidropônica	101
Gráfico 35	Curva de taxa de secagem para as corridas com amostra PH	103
Gráfico 36	Comparação das curvas de secagem e de taxa de secagem obtidas com a amostra PN e PH, a partir da Corrida 1 (60 °C, 60 min, 300 g)	103
Gráfico 37	Comparação das curvas de secagem e de taxa de secagem obtidas com a amostra PN e PH, a partir da Corrida 2 (80 °C, 60 min, 300 g)	104
Gráfico 38	Comparação das curvas de secagem e de taxa de secagem obtidas com a amostra PN e PH, a partir da Corrida 4 (60 °C, 120 min, 300 g)	104
Gráfico 39	Comparação das curvas de secagem e de taxa de secagem obtidas com a amostra PN e PH, a partir da Corrida 9 (70 °C, 60 min, 200 g)	104
Gráfico 40	Comparação das curvas de secagem e de taxa de secagem obtidas com a amostra PN e PH, a partir das corridas no ponto centra (PC – 70°C, 90 min, 300g)	105

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 3

Tabela 3.1	Composição química do óleo essencial de plantas de pataqueira coletadas em três pontos de ocorrência natural	23
Tabela 3.2	Proposta de formulação da solução nutritiva	29
Tabela 3.3	Matriz de planejamento de Box-Behnken ordem padronizada	41
Tabela 3.4	Comparação da eficiência dos planejamentos PBB e PCC	42

### CAPÍTULO 4

Tabela 4.1	Equipamentos e acessórios do laboratório utilizados nesse trabalho	46
Tabela 4.2	Análises do tecido vegetal das plantas (macro e micronutrientes).	52
Tabela 4.3	Análises de fertilidade do solo da área de proteção ambiental de Belém	52
Tabela 4.4	Variáveis independentes e seus valores codificados	54
Tabela 4.5	Escala de valores de desejabilidade individual ou global	59
Tabela 4.6	Modelos matemáticos aplicados à cinética de secagem de sólidos	60

### CAPÍTULO 5

Tabela 5.1	Análise do tecido vegetal das plantas de pataqueira (planta inteira)	65
Tabela 5.2	Análise solo coletado em março e em julho de 2009.	66
Tabela 5.3	Teor de umidade e rendimento em óleo essencial da pataqueira	70
Tabela 5.4a	Composição do óleo da pataqueira com ocorrência natural, proveniente de amostras fresca e seca à temperatura ambiente	72
Tabela 5.4b	Composição do óleo essencial de pataqueira submetida a cultivo hidropônico, proveniente de amostras fresca e seca à temperatura ambiente.	73
Tabela 5.5	Matriz de experimentos do planejamento de Box-Behnken.	75

Tabela 5.6	Estimativa dos efeitos para a variável de resposta REND	76
Tabela 5.7	Análise de Variância para a variável de resposta REND	78
Tabela 5.8	Estimativa dos efeitos para a variável de resposta XF	79
Tabela 5.9	Análise de Variância para a variável de resposta XF	80
Tabela 5.10	Análise de variância para a variável de resposta MT	81
Tabela 5.11	Análise de Variância para a variável de resposta TI	81
Tabela 5.12	Proposta de um modelo polinomial para as respostas REND e XF	82
Tabela 5.13	Matriz de Box-Behnken com os valores experimentais e preditos pelo modelo polinomial de segundo grau proposto para a resposta REND	83
Tabela 5.14	Matriz de Box-Behnken com os valores experimentais e preditos pelo modelo polinomial de segundo grau proposto para a resposta XF	84
Tabela 5.15	Valores atribuídos na otimização via função desejabilidade	88
Tabela 5.16	Ajustes dos pontos experimentais ao modelo logarítmico	94
Tabela 5.17	Ajuste do conteúdo de umidade das plântulas de pataqueira com o tempo, para os períodos à taxa de secagem constante e decrescente, utilizando as equações da reta e logarítmica, para a segunda fase dos experimentos	95
Tabela 5.18	Experimentos de secagem adicionais com amostras PH	99
Tabela 5.19	Ajustes dos pontos experimentais ao modelo logarítmico	102
Tabela 5.20	Ajuste do conteúdo de umidade das amostras PH com o tempo, para os períodos à taxa de secagem constante e decrescente, utilizando as equações da reta e logarítmica, para a segunda fase dos experimentos	102
Tabela 5.21	Comparação da composição química dos óleos essenciais de amostras de pataqueira PH seca naturalmente e em leito fixo	106

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

<b>A</b>	Área superficial do produto exposta a secagem.	cm <sup>2</sup>
<b>ANOVA</b>	Análise de variância	-
<b>a, b, c , k, n</b>	Constantes dos modelos de cinética de secagem	-
<b>C</b>	Carga da amostra	g
<b>C<sub>0</sub></b>	Número de pontos centrais	-
<b>CG</b>	Cromatografia Gasosa	-
<b>D<sub>fm</sub></b>	Deflexão manométrica	cm
<b>DFT</b>	Sistema hidropônico tipo: <i>Deep flow technique</i>	-
<b>EM</b>	Espectrometria de massa	-
<b>k</b>	Número de variáveis independentes	-
<b>L</b>	Linear	-
<b>m</b>	Massa	g
<b>MSR</b>	Metodologia de superfície resposta	-
<b>MT</b>	Concentração do componente metiltimol no óleo essencial	%
<b>N</b>	Número de corridas experimentais	-
<b>PBB</b>	Planejamento de Box-Behnken	-
<b>PCC</b>	Planejamento composto central	-
<b>PH</b>	Pataqueira hidropônica	-
<b>PMP</b>	Passa pela maioria dos pontos	-
<b>PN</b>	Pataqueira colhida em seu habitat natural	-
<b>PTP</b>	Passa por todos os pontos	-
<b>NPMP</b>	Não passa pela maioria dos pontos	-
<b>NFT</b>	Sistema hidropônico tipo: <i>Nutrient film technique</i> ou fluxo laminar de nutrientes	-
<b>p</b>	Nível de significância	-
<b>Q</b>	Quadrático	-
<b>REND</b>	Rendimento em óleo essencial	% v/m
<b>R<sup>2</sup></b>	Coeficiente de determinação	%
<b>s</b>	Desvio padrão	-

<b>t</b>	Tempo	min
<b>T</b>	Temperatura	°C
<b>TI</b>	Concentração do componente timol no óleo essencial	%
<b>T<sub>AMB</sub></b>	Temperatura ambiente	°C
<b>T<sub>BS</sub></b>	Temperatura de bulbo seco	°C
<b>T<sub>BU</sub></b>	Temperatura de bulbo úmido	°C
<b>T<sub>s</sub></b>	Temperatura de secagem	°C
<b>UFRA</b>	Universidade Federal Rural da Amazônia	-
<b>UR</b>	Umidade relativa do ar ambiente	%
<b>v</b>	Volume	mL
<b>W</b>	Taxa de secagem	mg/cm <sup>2</sup> .min
<b>X</b>	Teor de umidade	% b.u.
<b>XF</b>	Teor de umidade final da amostra	% b.u
<b>X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub></b>	Variáveis de entrada codificadas	-
<b>X<sub>R</sub></b>	Teor de umidade adimensional	adim

### Índices

<b>b.s.</b>	Base seca	-
<b>b.u.</b>	Base úmida	-
<b>SS</b>	Sólido seco	-
<b>i</b>	Inicial	-
<b>Cr</b>	Critico	-
<b>o</b>	Inicial (no momento zero)	-
<b>IN</b>	<i>In natura</i>	-
<b>STA</b>	Secagem em temperatura ambiente ( $\cong 29$ °C)	-

## RESUMO

*Cono-bea scoparioides* Cham. & Schltl. (Scrophulariaceae), é uma planta de porte herbáceo, conhecida como “pataqueira” ou “vassourinha-do-brejo”, com ocorrência em áreas úmidas da região Amazônica. O seu óleo essencial possui excelente fragrância, elevada capacidade antioxidante, atividade biológica comprovada e rendimento da ordem de 3,0%. Os constituintes principais são timol, metiltimol e  $\alpha$ -felandreno, que correspondem a cerca de 90% do óleo. A fragrância do óleo vem sendo considerada com interesse pela indústria, contudo a exploração econômica da planta ainda não está consolidada já que sua característica é de área úmida e incompatível com a estação seca. Durante o verão a pataqueira desaparece destas áreas e suas sementes só voltam a germinar no início das chuvas. Por esta razão, a planta foi submetida a tratamento hidropônico, cujos resultados foram altamente satisfatórios, com aumento do rendimento em óleo essencial (corte da planta aos 6 meses) de 2,2 % para 3,2 %v/m, sem alteração qualitativa da composição química do óleo. O balanço dos três principais componentes é mantido no cultivo hidropônico, com pequena alteração nas suas proporções. Para a obtenção de melhores rendimentos em óleo, é importante a secagem prévia da planta, devido sua umidade elevada, cerca de 90%, então, realizou-se o estudo da secagem de pataqueira em secador convectivo de leito fixo usando o planejamento Box-Behnken. As variáveis operacionais de entrada foram a temperatura, o tempo e a carga, e as variáveis de resposta foram o rendimento em óleo, a umidade final e os percentuais de timol e metiltimol. O rendimento em óleo variou de 0,50 a 3,00%, a umidade final oscilou de 4,36 a 79,97% e os teores de timol e metiltimol variaram de 42,20 a 77,44% e de 8,70 a 35,47%, respectivamente. As condições ótimas de secagem de acordo com a análise de superfície resposta e função desejabilidade global são: temperatura de 60 °C, tempo de 120 minutos e carga de 200 g.

## ABSTRACT

*Conobea scoparioides* Cham. & Schltl. (Scrophulariaceae) is a herbaceous plant, known as "pataqueira" and "vassourinha-do-brejo" and with occurrence in wetlands of the Amazon region. Its essential oil has excellent fragrance, high antioxidant capacity, proven biological activity and yield by 3.0%. The main constituents are thymol, methylthymol and  $\alpha$ -phellandrene, which represent about 90% of the oil. The fragrance oil are being considered with interest by the industry, however, the economic exploitation of the plant has not been consolidated since their characteristic is of wetland and incompatible with the dry season. During the summer the pataqueira disappears from these areas and their seeds only germinate again in the beginning of the rains. For this reason, the plant was subjected to hydroponic treatment, whose results were highly satisfactory, with increased yield in essential oil (cutting the plant at 6 months) from 2.2% to 3.2% w/m, with no qualitative change the chemical composition of the oil. The balance of the three main components is maintained in the hydroponic cultivation, with little change in their proportions. To obtain better yields in oil, is important to drying the plant before, due to its high humidity, about 90%, then the plant was subjected to convective drying in fixed bed dryer using the Box-Behnken design. The input operating variables were temperature, time and weight, and the response variables were the oil yield, the final moisture content and the percentages of thymol and methylthymol. The oil yield ranged from 0.50 to 3.00%, the final moisture content ranged from 4.36 to 79.97% and the content of thymol and methylthymol ranged from 42.20 to 77.44% and 8.70 to 35.47%, respectively. The optimum conditions for drying according to the analysis of response surface and global desirability function are: temperature of 60 ° C, time of 120 minutes and load of 200 g.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>19</b>
2.1	GERAL	19
2.2	ESPECÍFICOS	19
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>20</b>
3.1	PLANTAS AROMÁTICAS	20
3.2	PATAQUEIRA ( <i>Conoclea scoparioides</i> Cham. & Schltdl.)	21
<b>3.2.1</b>	<b>Características químicas</b>	<b>22</b>
3.3	HIDROPONIA	24
<b>3.3.1</b>	<b>Histórico</b>	<b>25</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Processo de cultivo</b>	<b>26</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Trabalhos com plantas aromáticas cultivadas em hidroponia</b>	<b>29</b>
3.4	SECAGEM	34
<b>3.4.1</b>	<b>Cinética de secagem</b>	<b>36</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Secadores de leito fixo</b>	<b>38</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Planejamento de experimentos</b>	<b>39</b>
3.4.3.1	Planejamento de Box-Behnken (PBB)	40
<b>3.4.4</b>	<b>Trabalhos de secagem com plantas aromáticas</b>	<b>42</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>46</b>
4.1	MATERIAL, EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS	46
<b>4.1.1</b>	<b>Horta hidropônica</b>	<b>47</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Secador de leito fixo</b>	<b>47</b>
4.2	MÉTODOS	50
<b>4.2.1</b>	<b>Hidroponia</b>	<b>50</b>
4.2.1.1	Medição das plantas de pataqueira	51
4.2.1.2	Análise do tecido vegetal das plantas de pataqueira	52
4.2.1.3	Fertilidade do solo	53
<b>4.2.2</b>	<b>Métodos de análise do óleo essencial</b>	<b>53</b>
4.2.2.1	Umidade do material vegetal	53
4.2.2.2	Hidrodestilação	53
4.2.2.3	Análise do óleo essencial	53
<b>4.2.3</b>	<b>Planejamento estatístico da secagem de pataqueira em leito fixo</b>	<b>54</b>
4.2.3.1	Procedimento experimental da secagem em leito fixo	55
4.2.3.2	Descrição do modo operacional e método de medição das variáveis no secador de leito fixo	56
4.2.3.3	Função desejabilidade global	57
<b>4.2.4</b>	<b>Cinética da secagem em leito fixo da amostra PN</b>	<b>59</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>61</b>

5.1	HIDROPONIA	61
5.1.1	<b>Crescimento das plantas</b>	<b>64</b>
5.1.2	<b>Análise do tecido vegetal das plantas de pataqueira</b>	<b>65</b>
5.1.3	<b>Fertilidade do solo de onde foram coletadas as amostras PN</b>	<b>66</b>
5.1.4	<b>Riscos do cultivo hidropônico da pataqueira</b>	<b>67</b>
5.2	ÓLEO ESSENCIAL DA PATAQUEIRA ( <i>Conoclea scoparioides</i> )	70
5.2.1	Composição química do óleo essencial de pataqueira obtida por crescimento espontâneo e por meio hidropônico	71
5.3	SECAGEM CONVECTIVA DA PATAQUEIRA EM LEITO FIXO	74
5.3.1	<b>Planejamento experimental</b>	<b>75</b>
5.3.2	<b>Otimização do experimental</b>	<b>76</b>
5.3.2.1	Efeitos das variáveis de entrada na resposta REND	76
5.3.2.2	Efeito das variáveis de entrada na resposta XF	78
5.3.2.3	Efeitos das variáveis de entrada na resposta MT	80
5.3.2.4	Efeitos das variáveis de entrada na resposta TI	81
5.3.2.5	Proposta de um modelo polinomial de segundo grau	82
5.3.2.6	Análise da superfície resposta e contornos	85
5.3.2.7	Otimização via função desejabilidade global	87
5.3.3	<b>Cinética de secagem</b>	<b>89</b>
5.3.3.1	Curvas de secagem	89
5.3.3.2	Ajuste da curva de secagem aos modelos cinéticos	94
5.3.3.3	Curvas de taxa de secagem	95
5.4	SECAGEM CONVECTIVA DE PATAQUEIRA HIDROPÔNICA EM LEITO FIXO	98
5.4.1	<b>Análise da cinética de secagem</b>	<b>99</b>
5.4.1.1	Ajuste da curva de secagem aos modelos cinéticos	101
5.4.1.2	Curvas de taxa de secagem da amostra PH	102
5.4.2	<b>Comparação do comportamento da amostra PH e PN durante a secagem em leito fixo</b>	<b>103</b>
5.4.3	<b>Comparação da composição química da amostra PH secada em temperatura ambiente e secada em leito fixo</b>	<b>106</b>
6	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>108</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>109</b>
	<b>APÊNDICE A</b>	<b>114</b>
	<b>APÊNDICE B</b>	<b>120</b>
	<b>APÊNDICE C</b>	<b>125</b>
	<b>APÊNDICE D</b>	<b>130</b>

## CAPÍTULO 1

---

### INTRODUÇÃO

A espécie herbácea *Conobea scoparioides* Cham. & Schltl. (Scrophulariaceae), conhecida como “pataqueira” ou “vassourinha-do-brejo”, é uma planta muito aromática, característica do norte brasileiro, utilizada pela população nativa para banhos de cheiro e no tratamento do beribéri. É encontrada em áreas semi-inundadas, terras baixas, rios e riachos. Apresenta um rendimento em óleo essencial de 1,5 a 3,0 % e os principais componentes do seu óleo são:  $\alpha$ -felandreno, metiltimol e timol. O óleo essencial de pataqueira possui uma alta capacidade antioxidante e importante atividade biológica (MAIA, 2007; REBELO et al., 2009).

A pataqueira possui boas perspectivas na indústria de fragrâncias, contudo, a sua exploração econômica ainda não é uma realidade, porque essa é uma planta característica de áreas semi-inundadas que com a chegada do período seco (menor intensidade de chuvas) tende a desaparecer, permanecendo em um estado latente até a volta do período chuvoso. Então, para a exploração dessa planta é necessário viabilizá-la, em primeiro lugar, por meio de um cultivo sistemático e sem alteração de sua composição química.

A hidroponia é uma técnica com notável versatilidade que vem sendo amplamente utilizada. A aplicação desta técnica em plantas aromáticas vem apresentando bons resultados, em especial no aumento do rendimento em óleo essencial (PAULUS et al., 2007; SOUSA et al., 2007; PAULUS et al., 2008).

Portanto, a aplicação dessa técnica no cultivo da pataqueira poderá viabilizar o seu aproveitamento econômico, com obtenção de óleo essencial de alto rendimento e bouquet apropriado para a indústria de fragrâncias.

Como a planta possui elevada umidade, para a obtenção de seu óleo essencial será necessário também um estudo de secagem para evitar o processo de emulsão durante a destilação, que gera dificuldades na separação água-óleo. Logo, além de cultivo sistemático é necessário um estudo de secagem para obtenção de variáveis operacionais que otimizem o seu processo de destilação, com aumento do rendimento em óleo.

## CAPÍTULO 2

---

### OBJETIVOS

#### 2.1. Geral

Estudar o potencial de produção de óleo essencial de pataqueira (*Conoclea scoparioides*) com base na planta colhida no seu local de ocorrência espontânea e produzida por meio hidropônico.

#### 2.2. Específicos

- 1- Avaliar o comportamento de pataqueira quando cultivada em sistema hidropônico tipo NFT, em comparação a planta no seu sistema natural;
- 2- Comparar rendimento e composição química do óleo essencial de pataqueira por crescimento espontâneo e por meio hidropônico;
- 3- Analisar o comportamento da secagem da pataqueira com base em experimentos estatisticamente planejados, incluindo estudos de cinética em leito fixo;

---

---

## REVISÃO DE LITERATURA

Na pesquisa bibliográfica apresentada a seguir, primeiramente será feito uma breve abordagem sobre plantas aromáticas para, em seguida, apresentar à cultura da pataqueira (*Conoclea scoparioides* Cham. & Schlttdl.), abordando as generalidades sobre a planta, alguns aspectos botânicos, e a sua composição química.

Em sequência será feito um estudo de hidroponia apontando: histórico, processos de cultivos, sistema hidropônico do tipo NFT (fluxo laminar de nutrientes) e citações de trabalhos recentes aplicados às plantas aromáticas.

No estudo da secagem serão apresentados: conceitos, cinética, secadores de leito fixo e abordagem dos métodos de análise estatística aplicada, enfatizando-se o planejamento de Box-Behnken.

### 3.1. Plantas Aromáticas

A região amazônica possui rica diversidade de plantas aromáticas, com mais de 2.000 óleos essenciais e aromas, muitos com excelentes condições de exploração econômica e aproveitamento no mercado nacional e internacional de fragrâncias e cosméticos (MAIA, 2008).

Segundo Maia (2008), as 12 principais famílias de plantas aromáticas que predominam na região amazônica são: Piperaceae, Asteraceae, Myrtaceae, Lamiaceae, Annonaceae, Lauraceae, Euphorbiaceae, Verbenaceae, Scrophulariaceae, Anacardiaceae, Rutaceae e Burseraceae.

As plantas aromáticas são aquelas que podem gerar, por algum processo físico-químico, um produto aromático (BANDONI, 2008). Os aromas têm sido parte da vida do homem há vários séculos. Os egípcios utilizaram material aromático no processo de mumificação dos corpos, na cosmética e na medicina. Também os chineses, indianos, hebreus, árabes, gregos e romanos, e outros povos, no decorrer

da história, fizeram uso das essências de plantas aromáticas na medicina, culinária e em cerimônias religiosas.

As plantas aromáticas podem ser aproveitadas do ponto de vista comercial ou industrial de distintas maneiras: como material vivo, material fresco, material seco (inteiro, picado ou moído) ou para obtenção de extratos. No primeiro caso se comercializa plantas em maço para o uso hortigranjeiro ou em jardins; no caso do material fresco ou dessecado as finalidades são fundamentalmente para o uso alimentício (alfavaca, poejo, noz-moscada, cravo, canela, etc.), e medicinal (folhas de eucalipto, raízes de valeriana, camomila). Os extratos obtidos podem ser: óleos essenciais, resinóides, concretos, absolutos, extratos brutos ou purificados, óleo-resina e exsudados naturais (bálsamos e resinas) (BANDONI, 2008).

Os óleos essenciais existem nas plantas em estruturas celulares especiais de secreção, cavidades e canais equizógenos ou lisígenos e pêlos glandulares, podendo ainda estar depositados no lenho das árvores. Desta forma podem estar presentes em diversos órgãos da planta, difundindo pelas partes aéreas, nas flores, nas folhas, no lenho, nos rizomas e nas sementes (MAIA e ZOGHBI, 1998).

Os óleos essenciais constituem-se em uma mistura heterogênea e complexa, possuindo de 50 a 300 compostos, distribuídos principalmente nas classes dos terpenóides, lignóides, hidrocarbonetos, fenóis, éteres, ésteres, aldeídos, cetonas, alcoóis e ácidos, havendo sempre a prevalência de uma, duas ou três delas, que irão caracterizar as fragrâncias (MAIA e ZOGHBI, 1998; OLIVEIRA, 2007). Os seus componentes que possuem ação terapêutica, nas plantas medicinais, de modo geral, possuem propriedades antibióticas, antiinflamatórias, antifúngicas, analgésicas e sedativas.

### **3.2. Pataqueira (*Conobea scoparioides* Cham. & Schltl.)**

A espécie *Conobea scoparioides*, conhecida como “pataqueira” ou “vassourinha-do-brejo”, é uma planta de porte herbáceo (Fotografia 1), característica do norte brasileiro utilizada pela população nativa para banhos de cheiro e

tratamento de beribéri, sendo encontrada em áreas semi-inundadas, terras baixas, rios e riachos (MAIA, 2007).

É uma erva perene de até um metro de comprimento, muito aromática, com folhas sésseis, opostas, lanceoladas, serradas, com talo verde, quadrangular, com flores brancas, azuis ou róseas, pertencente à família Scrophulariaceae, tendo sinonímia à espécie *Sphaerotherca scoparioides* Cham. & Schlttdl (MAIA, 2007; REBELO, 2008).



**Fotografia 1** – Espécie herbácea *Conobea scoparioides* (pataqueira)

FONTES: MAIA (2007).

### 3.2.1. Características químicas

O rendimento em óleo essencial da pataqueira pode variar de 1,5 a 3,0% (MAIA, 2007). Os constituintes majoritários deste óleo na amostra *in natura* e previamente seca, são:  $\alpha$ -felandreno (12,1 e 14,3%), *p*-cimeno (1,5 e 1,7%), metiltimol (39,6 e 47,7%) e timol (40,0 e 26,4%), respectivamente (REBELO et al., 2009).

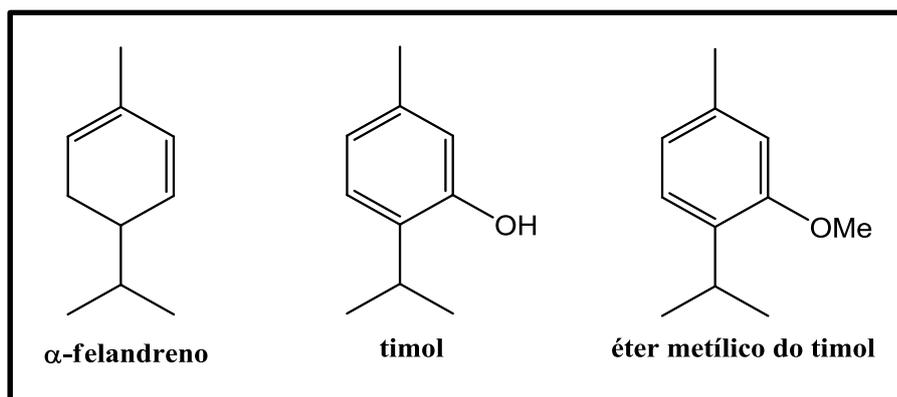
Na Tabela 3.1 é apresentada uma composição química detalhada do óleo de pataqueira obtido em três áreas diferentes do norte brasileiro.

**Tabela 3.1:** Composição química do óleo essencial de plantas de pataqueira coletadas em três pontos de ocorrência natural

Constituintes	Amapá	Pará	Maranhão
$\alpha$ -tujeno	-	-	0,1
$\alpha$ -pineno	-	1,1	0,8
1-octen-3-ol	-	-	0,1
3-octanona	1,7	1,1	0,4
3-octanol	0,1	-	-
<i>n</i> -decano	-	0,7	-
<b><math>\alpha</math>-felandreno</b>	<b>5,1</b>	<b>9,6</b>	<b>0,2</b>
<i>p</i> -cimeno	0,9	7,3	26,7
limoneno	0,4	1,4	5,7
$\beta$ -felandreno	-	-	1,8
( <i>Z</i> )- $\beta$ -ocimeno	-	-	0,1
( <i>E</i> )- $\beta$ -ocimeno	0,4	-	0,2
$\gamma$ -terpineno	-	0,9	-
<i>p</i> -cimeneno	0,1	-	0,1
linalol	0,4	-	0,2
<i>n</i> -undecano	-	0,9	-
<i>p</i> -cimen-8-ol	0,2	-	0,6
<i>n</i> -dodecano	-	1,1	-
<i>p</i> -cimen-9-ol	0,7	-	1,2
<b>metiltimol</b>	<b>36,0</b>	<b>42,4</b>	-
safrol	-	4,3	-
<b>timol</b>	<b>52,0</b>	<b>17,9</b>	<b>57,5</b>
<i>n</i> -tridecano	-	0,5	-
eugenol	0,7	-	0,2
acetato de timol	-	-	0,7
$\beta$ -cariofileno	-	-	0,4
geranil acetona	-	-	0,1
viridifloreno	-	2,4	-
$\alpha$ -selineno	-	0,8	-
<i>n</i> -pentadecano	-	1,6	-
( <i>E,E</i> )- $\alpha$ -farneseno	-	2,4	-
( <i>E</i> )-nerolidol	0,1	-	0,2
óxido de cariofileno	-	-	0,1

FONTE: MAIA et al.(2000).

O timol, o metiltimol e o  $\alpha$ -felandreno representam cerca de 90% do óleo essencial de pataqueira (REBELO, et al., 2009). Estes componentes são monoterpenos, caracterizados pela presença de 10 carbonos, e suas estruturas químicas podem ser observadas no Esquema 1.



**Esquema 1** – Principais componentes do óleo essencial da pataqueira

O óleo essencial da pataqueira apresenta alta atividade antioxidante e importante atividade biológica, atribuídos à presença de timol e seu éter metílico (REBELO 2008, REBELO et al., 2009).

### 3.3. Hidroponia

O termo hidroponia vem da junção de hidro e ponos que, literalmente, significa trabalho na água ou cultivo na água. Esse termo é utilizado, atualmente, para cultivos sem solo, realizados em água ou em substratos com pequena atividade química ou mesmo inertes como cascalhos, areia, serragem, turfa, vermiculita, argila expandida, espumas sintéticas e lãs minerais. Em todos estes meios a nutrição da planta é feita com o uso de solução contendo os nutrientes essenciais ao crescimento. Esse tipo de cultivo vem se desenvolvendo gradativamente desde a descoberta das exigências minerais das plantas (MARTINEZ, 2002).

Para compreender melhor a hidroponia pode-se, inicialmente, entender que esta pode ser praticada de inúmeras maneiras, como na produção de alimentos e flores em escala comercial, utilizando unidades de crescimento comunitárias, pequenos canteiros e bandejas.

A notável versatilidade do cultivo de plantas sem terra, aliado aos excelentes resultados que podem ser obtidos nos mais variados lugares, fazem da hidroponia o

sistema ideal para uma ampla gama de condições diferentes. De fato, a jardinagem com hidroponia pode ser mais fácil e mais agradável de executar do que o modo tradicional utilizando-se a terra (DOUGLAS, 1987).

A hidroponia possibilita a produção de hortaliças consideradas diferenciadas, alcançando maior preço de mercado. Desconsiderando-se os custos de infraestrutura, o custo de produção é baixo tendo como maior gasto a energia elétrica.

Na aplicação da hidroponia em plantas medicinais e condimentares as principais vantagens encontradas são: redução no extrativismo predatório, qualidade do produto, maior produtividade por área cultivada, regularidade na produção, assepsia superior ao cultivo no solo, isenção ou diminuição do uso de agrotóxico, utilização de baixo volume e qualidade da água, uso de pequena quantidade de fertilizante, redução do número de operações quanto aos tratamentos culturais e rápido retorno econômico (HABER, 2005).

### **3.3.1. Histórico**

Em 1600, o belga Jan Van Helmont, fez a primeira tentativa de investigar a composição das plantas, plantando uma estaca de salgueiro de 2,5 kg em vaso de 150 kg de solo seco, coberto para evitar entrada e saída de pó. Após cinco anos, a planta, irrigada sempre com água limpa, apresentou peso de matéria seca de 82 kg, enquanto o solo só havia perdido 180 g. Essa perda foi considerada erro experimental e o autor concluiu que a planta é formada basicamente por água. Em 1669, o inglês John Woodward cultivou plantas em água com diversos tipos de solo, verificando melhor desenvolvimento nos tratamentos com maior quantidade de solo, e concluiu que o vegetal não era composto apenas de água, mas também de substâncias do solo dissolvidas na água (MARTINEZ, 2002).

A identificação dessas substâncias foi muito lenta. Em 1804, De Saussure estabeleceu em seu livro “Pesquisas Químicas sobre a Vegetação” que as plantas são compostas por elementos químicos, provenientes do solo e ar. Este princípio foi confirmado mais tarde por Boussingault (1851), químico francês que, em seus ensaios com plantas cultivadas em areia, quartzo e carvão vegetal, adicionou uma solução química de composição determinada, concluindo que a água fornece

hidrogênio, o ar, carbono e oxigênio, e o solo os minerais indispensáveis à vida da planta (MARTINEZ, 2002).

Os primeiros a cultivarem plantas em meio líquido, de sementes a semente, foram os alemães Sachs (1860) e Knop (1861), que usaram soluções aquosas contendo N, P, S, K, Ca e Mg. A descoberta dos micronutrientes foi mais lenta, pois sua presença ocorria como contaminante. Então muitas pesquisas passaram a ser desenvolvidas e em 1925, o interesse pelo cultivo hidropônico comercial foi despertado. Porém na década de 30, foi aos poucos abandonado, em razão do sensacionalismo com que as técnicas de cultivo hidropônico foram apresentadas e da venda de equipamentos inadequadas ao cultivo (MARTINEZ, 2002).

Atualmente, os sistemas hidropônicos são muito usados nos países desenvolvidos, principalmente em razão dos problemas de inverno rigoroso, como na Holanda e na França, das limitações de áreas como no caso do Japão, e da escassez hídrica no caso de Israel, dentre outros casos. A hidroponia também tem sido usada em locais próximos a grandes centros, onde o preço da terra se torna um limitante e a demanda de produtos hortícolas é alta. No Brasil ainda há poucas informações a respeito do cultivo hidropônico comercial, porém o cultivo já é uma realidade, em especial, nos cinturões verdes de São Paulo (Vargem Grande, Moji das Cruzes), Belo Horizonte, Rio de Janeiro e Porto Alegre (MARTINEZ, 2002).

### **3.3.2. Processo de cultivo**

Em um processo de cultivo, é importante a prevenção de diversos tipos de problemas que acarretam situações prejudiciais para o andamento desse cultivo. Esses problemas em geral estão relacionados a situações climáticas adversas que ocasionam grandes variações de temperatura, alta luminosidade, chuvas intensas, ventos fortes e granizo e então, para evitar esse tipo de problema, é proposto um cultivo protegido.

A expressão cultivo protegido tem sido utilizada com um significado bastante amplo, engloba um conjunto de práticas e tecnologias, incluindo quebra-ventos, *mulching*, casas de vegetação, túneis altos e túneis baixos, utilizados pelos

produtores para o cultivo mais seguro e protegido de seus plantios (WITTWER e CASTILLA, 1995).

O cultivo sem solo é uma técnica alternativa de cultivo protegido, na qual os nutrientes são fornecidos via água de irrigação, permitindo o plantio em locais onde as correções da fertilidade, a desinfestação ou a desinfecção do solo é problemática.

Uma forma de cultivo sem solo é o cultivo hidropônico com ou sem substrato sólido, em que os nutrientes são fornecidos às plantas em um fluxo contínuo ou intermitente, como em filme estático, continuamente aerado de solução nutritiva.

Atualmente, observamos três meios para cultivo: ar, líquido e sólido. Sendo que se podem produzir culturas de três formas: ar em meio líquido, líquido em meio ar e os três componentes junto (RESH, 1997).

Quando há predominância de ar a técnica é chamada aeroponia. Nesse sistema as plantas ficam preferencialmente em um suporte vertical, tubos ou placas de PVC, e em frequências determinadas, é aspergida a solução nutritiva no meio. Esse sistema apresenta como vantagem o aproveitamento de maior espaço dentro do ambiente protegido (JONES JUNIOR, 2005).

O segundo sistema é composto por meio líquido, com possibilidade de oxigenação tanto da solução nutritiva, quanto do ambiente radicular. A solução pode ser oxigenada pela própria movimentação no sistema hidropônico. Há dois modelos utilizados nesse sistema, denominados de NFT e DFT.

No modelo **NFT** (*nutrient film technique*) as plantas são colocadas em ferfís e pelas quais, passa em intervalos definidos, uma lâmina de solução nutritiva, da qual as raízes extraem água e elementos essenciais (FURLANI et al., 1999). O sistema é composto por reservatório, bomba, unidade de automação, bancadas e ferfís. A solução não aproveitada pelas plantas volta para o reservatório. O fornecimento é intermitente, sendo usual intervalo de 15 minutos entre abastecimentos de igual período. Durante a noite o abastecimento é interrompido (BLISKA JUNIOR et al., 1998). A técnica de fluxo laminar é a mais usada no Brasil, já que a estrutura facilita a oxigenação da solução nutritiva pelos próprios desníveis formados na montagem, o retorno da solução nutritiva para o reservatório ocorre por gravidades, sendo então necessários tais desníveis (BLISKA JUNIOR et al., 1998).

No modelo **DFT** (*deep flow technique*) as raízes ficam submersas no meio líquido e este é enriquecido por oxigênio através de injeção de ar. Aumentos de

temperatura reduzem a disponibilidade de oxigênio. Aumento da oxigenação é obtido por formação de um retorno da solução para a caixa, próximo à bomba, o que também facilita regular a vazão no sistema. Nesse sistema é formada uma espécie de tubo Venturi, fazendo uma pequena perfuração na curva que desvia a tubulação para o interior da caixa. Forma-se no ambiente radicular, uma lâmina de água com aproximadamente 15 cm de profundidade e promove-se a aeração através de um sistema de compressor e bicos de aeração (JONES JUNIOR, 2005).

No terceiro sistema são utilizados substratos sólidos no cultivo, com fertirrigação feita através de gotejamento. Como substratos podem ser utilizados: areia, seixo miúdo, serragem, casca de arroz carbonificada, substratos comerciais, dentre outros. Preferencialmente o substrato deverá ser inerte (isento de nutrientes) e obrigatoriamente isento de patógenos. O volume de substrato deverá ficar entre 5 e 10 litros, dependendo da espécie. A frequência de fertirrigação poderá ser de até 10 vezes ao dia (RESH, 1997).

As mudas podem ser produzidas em sistema de *floating* (flutuação), em que as bandejas com mudas são colocadas em uma superfície com solução nutritiva ou por irrigação sub-superficial. Essa solução também deve ser frequentemente movimentada para promover a oxigenação. O substrato mais utilizado é a vermiculita. Outros substratos podem ser utilizados, desde que não absorvam e retenham muita umidade. O substrato deverá ser lavado das raízes antes do transplântio, podendo ser reutilizado (FURLANI et al., 1999).

### **3.3.3. Solução nutritiva**

A solução nutritiva deve atender integralmente às necessidades da cultura. A composição ideal de uma solução nutritiva não depende somente das concentrações dos nutrientes, mas também de outros fatores ligados ao cultivo, incluindo o tipo ou o sistema hidropônico, os fatores ambientais, a época do ano (duração do período de luz), estágio fenológico, e espécie vegetal. Deve ser observada, diariamente, a condutividade elétrica e o pH da solução (FURLANI et al., 1999).

A condutividade elétrica mede a concentração salina da solução, e o seu valor ideal é de aproximadamente 1,4 mS/cm, e para a alface, e em torno de 1,8 mS/cm, para o tomateiro. O pH da solução, varia com o pH da água e deve ser ajustado para cerca de 6,0. As correções de acidez podem ser feitas com hidróxido de sódio e em caso de alcalinidade com ácido sulfúrico (FAQUIN e FURLANI, 1999).

Um problema, relacionado à solução nutritiva, que ocorre nas regiões quentes é o baixo valor de oxigênio dissolvido na água, isso se deve ao fato da água saturar-se de oxigênio em valores baixos, à medida que a temperatura aumenta. Em temperaturas próximas de 35 °C, a saturação de oxigênio atinge níveis muito baixos, próximo do limite de sobrevivência para várias espécies de hortaliças (JONES JUNIOR, 2005).

Segundo Furlani (1999), a formulação da solução nutritiva recomendada para folhosas é a apresentada na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2:** Proposta de formulação da solução nutritiva

<b>Sal/fertilizante</b>	<b>g/1000L</b>
Nitrato de cálcio	750
Nitrato de potássio	500
Fosfato monoamônio	150
Sulfato de magnésio	400
Sulfato de cobre	0,15
Sulfato de zinco	0,5
Sulfato de manganês	1,5
Ácido bórico	1,5
Molibdato de sódio	0,15
Ferrilene (FeDDHA-6% Fe)	30

FONTE: FURLANI (1999)

### 3.3.3. Trabalhos com plantas aromáticas cultivadas em hidroponia

A literatura sobre plantas aromáticas cultivadas em sistema hidropônico, não é muito extensa, mas já existem diversos estudos nessa área. Alguns desses estudos são citados a seguir, obedecendo a sequência: autor (ano), título do trabalho e resumo (compactado).

**ECONOMAKIS et al. (2002) – Effect of phosphorus concentration of the nutrient solution on the volatile constituents of leaves and bracts of Origanum dictamnus.**

Estudaram o efeito de diferentes concentrações de fósforo na composição química dos óleos essenciais obtidos das folhas e brácteas de *Origanum dictamnus* cultivado em sistema hidropônico, do tipo NFT. Utilizaram a técnicas de GC-MS para a identificação e quantificação dos componentes, e três diferentes tipos de concentrações de fósforo (5, 30 e 60 mg / L) na solução nutritiva. Verificaram que os componentes majoritários foram o *p*-cimeno e o carvacrol, sendo que para as folhas o principal componente foi o *p*-cimeno, e o aumento de fósforo proporcionou aumento da sua concentração no óleo; e nas brácteas o principal componente foi o carvacrol que teve seu teor diminuído com o aumento da concentração de fósforo. Neste trabalho também foi realizada a quantificação dos componentes  $\alpha$ -felandreno e timol, e com os dados dos autores pode ser verificado que o aumento da concentração de fósforo ocasiona um aumento significativo no teor desses componentes obtidos do óleo essencial das brácteas, já nos óleos obtidos das folhas não houve  $\alpha$ -felandreno e o teor de timol foi diminuído com o aumento da concentração de fósforo de 5 para 30 mg / L.

**FERNANDES et al. (2004) – Cultivo de manjeriço em hidroponia e em diferentes substratos sob ambiente protegido.**

Estudaram a produtividade de duas espécies de manjeriço, de folha estreita (*Ocimum minimum* L.) e de folha larga (*Ocimum basilicum* L.), em ambiente protegido. Os sistemas de cultivo utilizados foram: hidroponia (*floating*); substrato preparado e substrato comercial. Observaram que o sistema hidropônico apresentou a maior produtividade de massa verde, aproximadamente 44% superior aos outros dois tipos de cultivo, para ambas as espécies estudadas. Quanto ao rendimento e composição química dos óleos essenciais dentro da mesma espécie, não houve diferenças significativas entre as formas de cultivo.

**HABER et al. (2005) – Diferentes concentrações de solução nutritiva para o cultivo de *Mentha piperita* e *Melissa officinalis***

Estudaram o desenvolvimento das espécies *Mentha piperita* (hortelã-pimenta) e *Melissa officinalis* (melissa) em diversas concentrações de solução nutritiva em sistema hidropônico NFT. As variáveis analisadas foram: concentrações da solução nutritiva (I- 50%, II- 75%, III- 100%, IV- 125%) e posição das plantas nos perfis hidropônicos (I- inicial, II- intermediária e III- final). Observaram que a variável posição das plantas nos perfis gera interação significativa entre os tratamentos para número de folhas e peso seco para menta e melissa, respectivamente, onde a posição inicial revelou ser o melhor tratamento. Concluíram que para a *Melissa officinalis* o cultivo em sistema hidropônico tipo NFT pode ser feito com a solução de Furlani et al. (1999), na concentração de 100%. E para a *Mentha piperita* pode ser feito com a solução de Furlani et al (1999), na concentração reduzida a 85%,

**NASCIMENTO (2006) – Trace elements and in particular manganese in three brazilian medicinal plants studied in tea and in hydropony grown plants**

Estudou as correlações entre alguns metais e compostos orgânicos nas plantas de basilicão (*Ocimum gratissimum*), beldroega (*Portulaca oleracea*) e jambu (*Spilanthes oleracea*), utilizando material fresco (na forma de chá), e material hidropônico cultivado com diferentes concentrações de manganês. Os elementos detectados foram o Mn, Mg, Fe, Zn, Sr, S, P, Ni e Co. Os cromatogramas e espectros de massa analisados foram semelhantes, e os ácidos orgânicos como o ácido cítrico, ácido tartárico e o ácido maleico foram detectados por HPLC-UV e confirmados por HPLC-ESI-MS.

**PAULUS et al. (2007) – Teor e qualidade do óleo essencial de menta (*Mentha arvensis L.*) produzida sob cultivo hidropônico e em solo.**

Estudaram o teor e a qualidade de óleo essencial de menta cultivada em hidroponia (sistema NFT) em comparação às condições de campo. Obtiveram os melhores resultados de produção de óleo essencial (0,76 g/ planta) e constituintes  $\alpha$ -pineno (0,40 %),  $\beta$ -pineno (0,45 %), limoneno (1,71 %) e mentol (82,4 %) com 100 % da

concentração da solução nutritiva no transplante e reposição de 50 % quando a condutividade elétrica reduziu 50 % do valor inicial o espaçamento utilizado foi de 0,50 m x 0,25 m. Constataram que o óleo essencial de menta (*Mentha arvensis* L.) produzido em hidroponia é de melhor qualidade e com teor de mentol (82,4 %) superior ao verificado em campo (64,43 %).

**SOUZA et al. (2007) – Produção de biomassa óleo essencial de hortelã em hidroponia em função de nitrogênio e fósforo.**

Estudaram a influência da nutrição mineral sobre o crescimento vegetal e a produção de óleos essenciais de *Mentha piperita* (hortelã). Cultivaram as plantas com soluções nutritivas, variando os teores de N e P entre: (1) 120 e 16; (2) 60 e 16; (3) 120 e 4; (4) 60 e 4 mg/L de N e P. Observou que o maior rendimento em óleos essenciais ocorreu aos 29 DAT (dias após o início dos tratamentos) para as plantas cultivadas nas condições do tratamento 4; a maior produção de biomassa foi aos 64 DAT (em todos os tratamentos). As plantas submetidas à maior concentração de N apresentaram menor rendimento de óleo essencial; no entanto, com maior ganho de biomassa. Observaram uma diminuição gradual no rendimento de óleo essencial ao longo do ciclo da planta e uma relação inversa entre o peso de folhas e o rendimento de óleo. Constataram que aos 29 DAT, em cultivo hidropônico, as plantas de hortelã estão aptas para coleta e obtenção do óleo essencial, o que significa redução no tempo de colheita e economia no processo de produção.

**GARLET (2007) – Produtividade, teor e composição do óleo essencial de espécies de *Mentha* L. (Lamiaceae) cultivadas em hidroponia com variação de potássio.**

Estudou as espécies *Mentha arvensis* L. fo. *piperascens* Holmes, *Mentha x gracilis* Sole e *Mentha x piperita* var. *citrata* (Ehrh.) Briq., com os objetivos de avaliar a produtividade, o teor e a composição química do óleo essencial testando quatro concentrações de potássio (276, 414, 552 e 690 mg/L de K) na solução nutritiva para cada espécie. Os resultados mostraram que os teores de óleo essencial e de mentol, em *M. arvensis* fo. *piperascens* aumentam com o acréscimo de K na solução

nutritiva, e a dose de K de 552 mg/L é a que proporciona maior rendimento de óleo em g/planta, porém a melhor composição química e conteúdo de mentol são proporcionados pela dose de 690 mg/L de K. O rendimento do óleo essencial por planta e a quantidade de linalol, em *M. x gracilis*, são reduzidos com a dose máxima de K e a concentração de K, para obtenção de maior rendimento, não deve ultrapassar 276 mg/L na solução nutritiva. O teor e o rendimento total de óleo essencial por planta, em *M. x piperita var. citrata*, aumentou na dose máxima de K, porém nessa dose há diminuição na quantidade de linalol e acetato de linalila. Para obtenção de maior rendimento de óleo essencial por planta de *M. x piperita var. citrata*, associado ao acúmulo de linalol e acetato de linalila, recomendam-se concentrações de K entre 414 e 552 mg/L. Concluiu que o cultivo hidropônico de mentas associado à variação de K, gera excelente matéria-prima, em pequenas áreas de cultivo, e pode servir de subsídio para novos estudos em espécies de Lamiaceae, com potencial econômico e farmacológico.

#### **PAULUS et al. (2008) – Solução nutritiva para produção de menta em hidroponia**

Estudaram a melhor solução nutritiva para o cultivo de menta em hidroponia tipo NFT. As variáveis analisadas foram concentração da solução nutritiva e espaçamentos. Os melhores resultados de teor de óleo essencial (0,60 mL /100 g de folhas frescas), mentol (82,4 %) e fitomassa seca (45 g/planta) foram obtidos com 100 % da concentração da solução nutritiva, no transplante e reposição de 50 % quando a condutividade elétrica reduziu 50 % do valor inicial; e no espaçamento de 0,50x0,25m nos canais de cultivo. Constataram que o teor e rendimento de óleo essencial e fitomassa seca, no cultivo hidropônico com a solução nutritiva proposta foram superiores aos encontrados em cultivo a campo (de 27 g/planta de fitomassa seca, óleo essencial de 0,53mL/100g de folhas frescas e 64,43 % de mentol). Concluíram, que a solução nutritiva com concentração de 100% no transplante e reposição de 50 % dos nutrientes quando a condutividade elétrica reduzir 50 % do valor inicial e o espaçamento 0,50 x 0,25 m pode ser recomendada para o cultivo hidropônico de *Mentha arvensis*.

### 3.4. Secagem

A secagem de sólidos é realizada há muitos anos, sendo uma das mais antigas e usuais operações unitárias encontradas nos mais diversos tipos de processos usados em indústrias agrícolas, alimentícias, farmacêuticas, cerâmicas, químicas, de papel e celulose, mineral e de polímeros. É uma operação de alta complexidade e com dificuldades de compreensão, devido ao fato de que engloba diversas operações da engenharia química, gerando a dificuldade não só da compreensão do processo em si, mas em especial da descrição matemática dos fenômenos envolvidos de transferência simultânea de calor, massa e quantidade de movimento em um sistema particulado.

O termo secagem pode ser definido como uma operação unitária através da qual a água (ou qualquer outro líquido) é removida de um material; porém esse conceito é muito restrito e não atende a real complexidade desta operação unitária. Até mesmo a simples definição “operação de eliminação de pequenas quantidades de água, ou umidade, de um material sólido, através da evaporação utilizando energia térmica”, que é um consenso na maioria dos textos específicos sobre secagem, ainda não seria tão abrangente (MUJUMDAR, 1987).

Segundo Van't Land (1991) *apud* Faria (1998), a melhor forma de se conceituar secagem é como a remoção de água (ou qualquer outro líquido) de um material sólido, na forma de vapor, para uma fase gasosa insaturada, através de um mecanismo de vaporização térmica, numa temperatura inferior à de ebulição. Essa definição seria a mais completa por evitar que esta operação unitária seja confundida com outros processos de separação de líquidos, que sejam puramente mecânicos (centrifugação, prensagem, filtração) ou físico-químicos (evaporação, desumidificação, extração, absorção, osmose).

Uma das principais finalidades do processo de secagem consiste em uma forma de manter a qualidade de um determinado produto, com a conservação de suas propriedades físico-químicas, pelo abaixamento da concentração de água para teores em que não exerça papel biológico, inibindo dessa forma a ação de agentes de deterioração, principalmente microrganismos. (FARIA, 1998).

Outros fatores de alta relevância também podem ser citados, como por exemplo, redução de peso e volume para tornar o transporte e embalagem economicamente mais vantajosos, permitir uma armazenagem em longo prazo do produto e concentrar suas substâncias para mudar ou melhorar o sabor e agregar valor ao produto. Contudo, é necessário cautela com as mudanças físicas e químicas que ocorrem durante a secagem, porque estas podem contribuir para a redução dos nutrientes e propriedades organolépticas do material, caso o processo de secagem não seja adequadamente conduzido (BARBOSA-CÁNOVAS e VEGAMERCADO, 1996).

A condição necessária e suficiente para que um produto seja submetido ao fenômeno de secagem é que a pressão parcial do vapor d'água sobre a superfície do produto seja maior do que a pressão parcial do vapor d'água no ar. Se ambas forem iguais, não há secagem, e sim, equilíbrio higroscópico entre o produto e o ar. Se a pressão parcial do vapor d'água do meio for maior do que a da superfície do produto ocorrerá à adsorção de umidade pelo produto, até que o equilíbrio seja atingido.

Segundo Mujumdar (1987) na secagem, dois processos ocorrem simultaneamente:

1. Transferência de energia (calor) das redondezas (ambiente) para evaporar a umidade superficial
2. Transferência interna de umidade para a superfície do sólido e subsequente evaporação, devido ao processo 1.

No Processo 1, a remoção de umidade (água), como vapor, da superfície do material depende de condições externas, como: temperatura, umidade e vazão do ar, superfície exposta à secagem e pressão. No Processo 2, a movimentação interna de umidade (dentro do sólido) é função da natureza física do sólido, da temperatura e do seu conteúdo de umidade.

Os materiais submetidos à secagem são constituídos de uma matriz sólida seca e uma quantidade de umidade, presente usualmente no estado líquido. Estes materiais úmidos apresentam diferentes propriedades físicas, químicas, e

mecânicas, que são dependentes da estrutura e composição química da matriz sólida e dos estados em que a água se encontra, nos mesmos (MUJUMDAR, 1987).

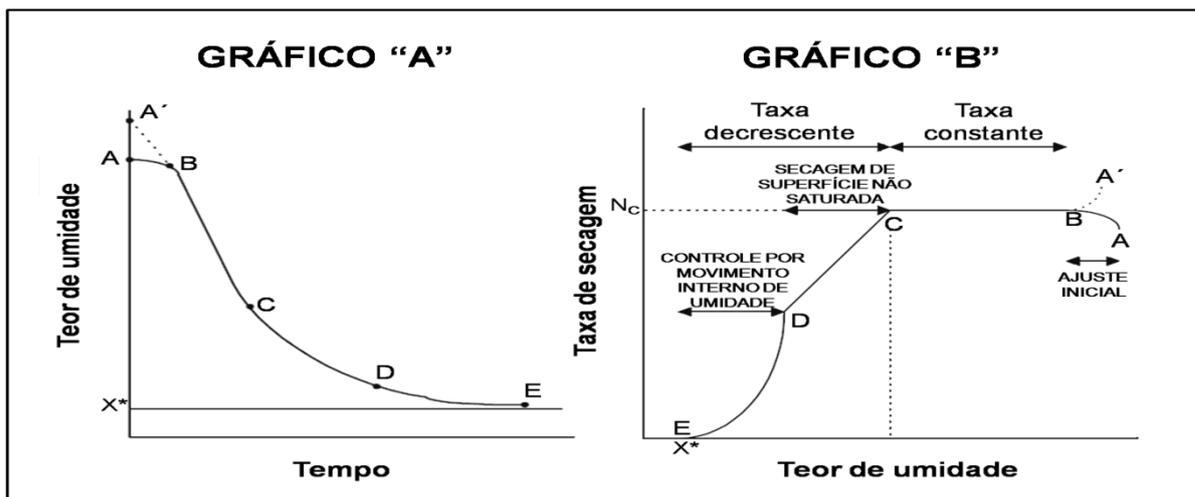
A quantidade de umidade contida neste sólido úmido pode ser descrita em termos da massa total (base úmida) ou em termos da massa de sólido seco (base seca). Geralmente encontramos na literatura a massa total em base úmida, contudo a massa total em base seca permite uma fácil contabilização da umidade quando a mesma varia, uma vez que, em processos tais como os de secagem, a massa da matriz sólida seca permanece inalterada.

### **3.4.1. Cinética de secagem**

A cinética de secagem de um determinado produto está relacionada com as mudanças no conteúdo de umidade e na temperatura média com o tempo. A cinética de secagem permite que sejam determinados a quantidade de água evaporada, o tempo de secagem, o consumo de energia, e outros parâmetros, com base no conhecimento de propriedades físico-químicas do material.

A intensidade de secagem, descrita pela variação no teor de umidade com o tempo, é significativamente influenciada pelos parâmetros do processo de secagem, tais como temperatura, umidade (pressão de vapor), velocidade do ar, e pressão total. A taxa de secagem aumenta com o decréscimo no diâmetro da partícula e com o aumento na temperatura do gás e na taxa de aquecimento (determinada pelo coeficiente convectivo). Em sistemas dispersos, a taxa de secagem é influenciada pela interação entre partículas e pela interação de partículas com as paredes do equipamento de secagem (STRUMILLO e KUDRA, 1986).

No Gráfico 1 é apresentado uma típica curva de secagem e de taxa de secagem, e em seguida é dada uma interpretação para cada um dos trechos das curvas (AB e A'B, BC, CD e DE), de acordo com Segundo Strumillo e Kudra (1986).



**Gráfico 1 – Curvas de secagem (A) e de taxa de secagem (B)**

FONTE: modificado de STRUMILO e KUDRA (1986)

**Trecho AB e A'B:** Período para entrar em regime operacional. Como esta no começo, o produto normalmente se encontra mais frio do que ar, e a pressão parcial de vapor da água na superfície desse produto é pequena, e por consequência, a transferência de massa e a velocidade de secagem também são pequenas. Logo o calor chegando em excesso acarreta numa elevação da temperatura do produto ocorrendo um aumento de pressão e da velocidade de secagem. Este fenômeno continua até que a transferência de calor compense exatamente a transferência de massa, delimitando assim o trecho AB. Se a temperatura do ar for inferior àquela do produto, esta última diminuirá até atingir o mesmo estado de equilíbrio, representada pelo trecho A'B. A duração deste período é insignificante em relação ao período total de secagem e muitas vezes não aparecem dependendo das características do produto.

**Trecho BC:** Período de velocidade (taxa) constante de secagem. Durante este período a quantidade de água disponível dentro do produto é grande e água evapora como água livre. A pressão de vapor de água na superfície é constante e é igual à pressão de vapor de água pura à temperatura do produto. A velocidade de secagem é, por conseguinte, constante. Este período continua enquanto a migração de água do interior até a superfície do produto seja suficiente para acompanhar a perda por evaporação de água na superfície.

**Trechos CD e DE:** Período de velocidade (taxa) decrescente de secagem. Desde o momento em que a água começa a ser deficiente na superfície, a velocidade de secagem diminui. O valor do conteúdo de umidade do produto no ponto de transição entre os pontos B e D é definido como sendo o teor de umidade crítico ( $X_{cr}$ ). Durante todo este período o fator limitante é a migração interna de água. No ponto E, o teor de umidade do sólido atingiu o valor de equilíbrio  $X_{eq}$  para as condições de umidade do ar prevalecentes e a secagem é então interrompida e tem velocidade nula, podendo ser continuada somente se as condições do ar de secagem forem alteradas.

### 3.4.2. Secadores de leito fixo

O leito fixo é um dos sistemas de contato sólido-fluido de concepção mais simples na área de meios porosos e um dos mais utilizados na indústria química, seja como reator de leito catalítico, como adsorvedor, trocador de calor e secador.

De acordo com Faria (1998) o equipamento utilizado na secagem de sólidos em leito fixo consiste essencialmente de um aquecedor do agente de secagem, normalmente ar ambiente, um soprador para forçar o escoamento desse ar, distribuído através de um dispositivo adequado, através de uma camada de material estática sobre uma base de sustentação. Normalmente o equipamento é dotado de instrumentação capaz de indicar e controlar a vazão e a temperatura do ar, como também de indicar a umidade de entrada e saída do secador.

A secagem em leito fixo é um processo em batelada (secagem descontínua) e as condições dentro do secador variam em função da posição e do tempo, tanto do material úmido quanto do agente de secagem, o que conduz a dificuldades adicionais para a estimativa dos parâmetros de secagem durante a operação, tornando a análise mais difícil do que no processo de secagem contínua. O secador de leito fixo possui circulação permeante de ar através de uma camada estacionária de sólidos.

### 3.4.3 Planejamento de experimentos

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.

Segundo Montgomery (1991), através de experimentos estatisticamente planejados pode-se determinar:

1. variáveis, ou fatores, do processo que são mais influentes no(s) parâmetro(s) de resposta de interesse;
2. níveis de ajuste das variáveis do processo influentes na resposta, de modo que a variabilidade do parâmetro de resposta seja mínimo;
3. níveis de ajuste das variáveis influentes do processo, de modo que o valor do resultado seja próximo do valor nominal;
4. níveis de ajuste das variáveis influentes na resposta, de modo que o efeito das variáveis não controláveis seja reduzido.

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).

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, por exemplo, um planejamento de dois níveis ( $2^k$ ) e três variáveis ( $k=3$ ), resulta em oito corridas ( $2^3=8$ ) (BOX, HUNTER e HUNTER; 1978).

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).

O modelo matemático de uma função  $f_k$  (Equação 3.1), pode ser representado por um polinômio (Equação 3.2), para que seja possível a obtenção de uma estimativa mais precisa da condição ideal de operação de um processo.

$$y_k = f_k(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (3.1)$$

$$y_k = b_{k0} + \sum_{i=1}^k b_{ki} X_i + \sum_{i=1}^k b_{kii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k b_{kij} X_i X_j + \varepsilon \quad (3.2)$$

Nas equações acima  $y_k$  é a variável resposta para  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) que são as variáveis independentes codificadas,  $\varepsilon$  representa um componente do erro aleatório, e os parâmetros  $b_{k0}$ ,  $b_{ki}$ ,  $b_{kii}$  e  $b_{kij}$  representam os coeficientes de regressão constantes.

As variáveis independentes estão linearmente relacionadas a  $\xi_i$  conforme a Equação 3.3:

$$X_i = \frac{\xi_i - \xi_i^0}{d_i} \quad (3.3)$$

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

### 3.4.3.1 Planejamento de Box-Behnken (PBB)

G. E. P. Box e D. W. Behnken, em 1960, desenvolveram um novo arranjo de três níveis ( $3^k$ ) para o estudo da quantificação de variáveis, em um planejamento de experimentos. Esse arranjo é formado pela combinação fatorial  $2^k$  e um delineamento de bloco incompleto, o que resulta em um projeto que faz uso eficiente das unidades experimentais e que também é rotacional. (BOX e BEHNKEN, 1960; MASON, GUNST e HESS, 1989).

O número de experimentos necessários para o desenvolvimento do PBB é definido através da Equação 3.4, onde  $N$  é o número de experimentos,  $k$  é o número de variáveis, e  $C_0$  é o número de pontos centrais (FERREIRA et al., 2007).

$$N = 2k(k-1) + C_0 \quad (3.4)$$

A matriz de planejamento de Box-Behnken de ordem padronizada pode ser observada na Tabela 3.3, onde é observado que para três variáveis de entrada são necessárias 15 corridas experimentais sendo 3 no ponto central.

**Tabela 3.3:** Matriz de planejamento de Box-Behnken ordem padronizada

Corridas	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	-1	-1	0
2	+1	-1	0
3	-1	+1	0
4	+1	+1	0
5	-1	0	-1
6	+1	0	-1
7	-1	0	+1
8	+1	0	+1
9	0	-1	-1
10	0	+1	-1
11	0	-1	+1
12	0	+1	+1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

O PBB diferencia-se do planejamento composto central (PCC), porque não contém pontos nos extremos da região cúbica, criado pelos dois níveis fatorial, possui um ponto central (MASON, GUNST e HESS, 1989); e tem maior eficiência, já que a eficiência de um planejamento é definida pela divisão entre o número de coeficientes estimados pelo modelo e o número de experimentos (FERREIRA et al., 2007). A Tabela 3.4 mostra a eficiência dos planejamentos PBB e PCC.

**Tabela 3.4:** Comparação da eficiência dos planejamentos PBB e PCC

Variáveis ( <i>k</i> )	Número de coeficientes ( <i>p</i> )	Número de Experimentos ( <i>N</i> )		Eficiência ( <i>p/N</i> )	
		PCC	PBB	PCC	PBB
2	6	9	-	0,67	-
3	10	15	13	0,67	0,77
4	15	25	25	0,60	0,60
5	21	43	41	0,49	0,61
6	28	77	61	0,36	0,46
7	36	143	85	0,25	0,42
8	45	273	113	0,16	0,40

FONTE: FERREIRA et al. (2007)

Portanto, o planejamento de Box-Behnken possui alta eficiência, requer um número menor de corridas experimentais, é rotacional, permiti a estimativa dos parâmetros do modelo quadrático e a detecção de falta de ajuste do modelo (MASON, GUNST e HESS, 1989; FERREIRA et al., 2007).

#### 3.4.4 Trabalhos de secagem com plantas aromáticas

A literatura de secagem de plantas aromáticas e de trabalhos que aplicaram planejamento de experimentos para otimização das variáveis do processo é extensa, contudo a aplicação do planejamento de Box-Behnken ainda é restrita.

A seguir são apresentadas citações de trabalhos de secagem de plantas aromáticas que analisaram a influência da temperatura na secagem, e que utilizaram planejamentos estatísticos para otimização da secagem. Por fim será apresentado um trabalho que aplicou o planejamento de Box-Behnken em plantas aromáticas. Será obedecida a sequência: autor (ano), título do trabalho e resumo (compactado).

**MOCHI (2005) – Efeito da temperatura de secagem no rendimento do óleo essencial e teor de 1,8-cineol presentes nas folhas de *Eucalyptus camaldulensis*.**

Analizou experimentalmente a influência da temperatura do ar de secagem no rendimento do óleo essencial de *Eucalyptus camaldulensis* e no teor de 1,8- cineol nele presente. O procedimento experimental foi realizado em leito fixo, a extração do óleo essencial em um destilador tipo Clevenger, e as análises do óleo essencial foram por cromatografia gasosa. Os parâmetros operacionais foram fixados em velocidade do ar de secagem a 0,60 m/s, carga de folhas úmidas em 100 g e tempo de secagem de 60 minutos. A temperatura do ar de secagem variou de 35 e 70 °C. Os resultados mostraram que a secagem de folhas de *E. camaldulensis* em secador tipo leito fixo, aumentou em até 5,4 vezes o rendimento em óleo essencial e proporcionou um aumento de 1,7 vezes no teor de 1,8-cineol presente no óleo essencial. E a temperatura do ar de secagem a 65° C foi a que forneceu os melhores resultados.

**BARBOSA (2006) – Influência da temperatura do ar de secagem sobre o teor e a composição química do óleo essencial de *Lippia alba* (Mill) N. E. BROWN**

Estudou a secagem das folhas de *Lippia alba*, submetendo-as a seis diferentes tratamentos de secagem com ar a temperatura ambiente e aquecido até 80°C (temperatura igual a 25, 40, 50, 60, 70 e 80 °C). Extraiu o óleo essencial por destilação a vapor e o analisou por CG-MS. Observou que o rendimento em óleo foi reduzido em 12 a 17% quando comparado com a planta fresca (0,66%), e o componente majoritário do óleo foi citral, representando 76% da planta fresca, e variando de 82-84% para o material seco. Concluiu que a *L. alba* pode ser submetido a um processo de secagem de até 80°C, sem degradação e / ou perda do componente majoritário e que para fins de comercialização (considerando que o citral é o principal constituinte químico de interesse no óleo dessa planta), a secagem pode ser realizada utilizando ar aquecido de 40 até 80 °C.

**BRAGA (2002) – Influência da secagem no rendimento e na composição química do óleo essencial das folhas de *Eucalyptus citriodora*.**

Estudou inicialmente a influência da temperatura na cinética de secagem em leito fixo das folhas de *Eucalyptus citriodora*, variando a temperatura de 35 a 60 °C, e verificou que se as variáveis operacionais forem: tempo de secagem de 60 minutos, carga de 100 g e vazão do ar de secagem de 7,43 cm/s, a temperatura de 60 °C é a mais adequada para a secagem, pois não ocasiona alteração na composição do óleo essencial e não utiliza energia desnecessária para efetuar a secagem. Então realizou o estudo dessa secagem com o planejamento fatorial fracionário tendo como variáveis de entrada a temperatura do ar de secagem (60, 70 e 80°C), a carga do material (150, 200, 250g), a velocidade do ar de secagem (4,26; 6,05 e 7,43 cm/s) e o tempo de secagem (30, 60 e 90 min). As respostas analisadas foram teor de citronelal adimensional e do rendimento adimensional em óleo essencial. Verificou que o secador convectivo de leito fixo utilizado aumentou 2,5 vezes o rendimento em óleo essencial sem alterar a concentração de citronelal e que o teor de citroneal adimensional pode ser estimado por modelo polinomial de primeira ordem, como função da velocidade do ar de secagem, tempo de secagem e pela combinação binária da temperatura e tempo de secagem, e velocidade e tempo de secagem. Já a resposta rendimento em óleo não foi influenciada por nenhuma variável, devido ao fato do conteúdo de umidade retirado das folhas ter sido constante, e a retirada de umidade é diretamente proporcional ao aumento do rendimento em óleo. Concluiu que a temperatura ótima de secagem é 60°C, porque acima desta temperatura ocorrem perdas no teor de citronelal.

**OLIVEIRA (2007) – Influência de variáveis operacionais da secagem em leito fixo na umidade final de rizoma de priprioca (*Cyperus articulatus* L.) e no rendimento e concentração de constituintes majoritários de seu óleo essencial.**

Estudou a secagem de priprioca (*Cyperus articulatus* L.) em leito fixo utilizando um planejamento fatorial de experimentos completo  $2^K$ , com as variáveis de entrada: tamanho dos rizomas (1/2, 1/3, 1/4) e temperatura do ar de secagem (40, 50, 60 °C), e as variáveis de resposta: teor de umidade final; rendimento e concentração de

constituintes majoritários do óleo essencial. Constatou que o aumento da temperatura do ar de secagem causou um decréscimo no teor de umidade final e o aumento do rendimento em óleo. Verificou que com o aumento do tamanho dos rizomas houve um decréscimo na umidade final e no rendimento em óleo. Observou que as alterações das variáveis de entrada do processo causaram alterações significativas na composição química de seu óleo. E concluiu que a região ótima de trabalho requer temperaturas em torno de 60 °C e rizomas cortados em metade; e que o modelo polinomial de primeira ordem foi o mais adequado para descrever a influência dos fatores de entrada sobre as variáveis de resposta.

**BEGAN (2000) – *Response surfaces of total oil yield of turmeric (Curcuma longa) in supercritical carbon dioxide.***

Estudou a influencias das variáveis: pressão, temperatura e vazão, no rendimento total em óleo de *Curcuma longa* L., utilizando a metodologia de Box-Behnken. Realizou uma extração com fluido supercrítico (CO<sub>2</sub>), variando as variáveis operacionais de 10 a 30 MPa (pressão), 313 a 333 K (temperatura) e 3 a 9 mL/min (vazão). Observou que o aumento da temperatura de extração levou à diminuição no rendimento em óleo, enquanto que o aumento da vazão gerou o aumento do rendimento. Determinou que a pressão ideal para a extração é 22,5 Mpa. Verificou que os valores experimentais estavam de acordo com os valores preditos pelo modelo quadrático proposto para a resposta rendimento em óleo essencial, e que dentro do domínio experimental escolhido a composição química do óleo não sofreu variações estatisticamente significativas. Concluiu que a metodologia de superfície de resposta utilizada foi capaz de prever as condições ótimas de extração para a produção total de óleo de *Curcuma longa* L.

## CAPÍTULO 4

### MATERIAL E MÉTODOS

#### 4.1. Material, Equipamentos e Acessórios

O material vegetal utilizado foram amostras de pataqueira (*Conoclea scoparioides*), denominadas de **PN** (pataqueira colhida em seu habitat natural) e **PH** (pataqueira colhida em horta hidropônica). As amostras PH são provenientes de uma horta hidropônica tipo NFT localizada na Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA); e as amostras PN são provenientes da área de proteção ambiental de Belém, no Utinga, na Fotografia 2 pode ser observado a amostra PN em seu ambiente natural.



**Fotografia 2** – Pataqueira em seu habitat natural no Utinga (Belém – PA)

**Foto:** Rosilene. G. Costa

Na Tabela 4.1 são apresentados os principais aparelhos utilizados durante cada etapa experimental. Sendo que os equipamentos utilizados na hidroponia e na secagem, serão detalhados nos tópicos 4.1.1 e 4.1.2, respectivamente.

**Tabela 4.1:** Equipamentos e acessórios do laboratório utilizados nesse trabalho.

Atividade	Equipamentos e acessórios
Análise de umidade	Estufa de secagem com renovação de ar, MEMMERT.
Hidrodestilação	Destilador <i>Clevenger</i> modificado; balança semi-analítica GEHAKA, modelo BG-8000; centrífuga FANEM, modelo 206; pipetas automáticas EPPENDORF.
Composição Química	Cromatógrafo a gás acoplado a espectrômetro de massas THERMO DSQ II GC-MS e Cromatógrafo a gás FOCUS GC/FID

#### **4.1.1 Horta hidropônica**

Na hidroponia foi utilizado um sistema hidropônico do tipo NFT (técnica da lâmina de nutriente), dotado de um reservatório com capacidade para 1000 L de solução nutritiva, instalado no interior de um fosso coberto com estrutura em telha canal; bomba centrífuga de ½ CV; controle de funcionamento de bomba dotado de chave contactora, disjuntor e timer analógico, da marca COEL. A bancada de cultivo foi formada por telhas de fibrocimento cobertas por filme de polietileno, tendo uma declividade de 2,0 %, localizada no interior de casa de cultivo protegido. As dimensões da casa eram 6,0 m x 15,0 m, com 2,8 m de pé direito, sendo coberta por filme agrícola aditivado com 100 micra de espessura.

#### **4.1.2 Secador de leito fixo**

Para o estudo da secagem foi utilizado um secador de leito fixo projetado e construído por Faria (1998), sendo que foram feitas pequenas modificações para a realização das corridas experimentais desse trabalho. O equipamento possui um duto de 25,4 cm de seção quadrada, contendo um soprador centrífugo com controle de velocidade do rotor, capaz de movimentar o ar até o leito de sólidos, com variação de sua velocidade. Compõe o sistema, dois pares de resistências elétricas de 1/2 kW e 1 kW cada, as quais propiciam o aquecimento do ar utilizado como agente de secagem. Adaptado a esta unidade, encontra-se o secador de leito fixo, acoplado por meio de redução gradual com mudança da seção quadrada para circular com 7,5 cm de diâmetro interno e 1,35 m de comprimento, construído em aço inoxidável e isolado termicamente com fibra de vidro. O corpo do leito secador é constituído em vidro borossilicato, contendo dispositivos para amostragem de ar para avaliação de suas propriedades psicrométricas.

O equipamento dispõe de um cesto cilíndrico telado, construído em aço inoxidável, no interior do qual são depositados o material vegetal, ficando então sujeito ao contato do ar de secagem, através do leito a partir de sua base e pelas laterais do dispositivo (Fotografia 3). Este cesto, que se constitui no leito propriamente dito, possui diâmetro interno 12,5 cm e altura 25,5 cm e uma capacidade volumétrica total de 3,13 litros. No momento das corridas experimentais,

fica suspenso no interior do corpo cilíndrico de vidro, conectado a uma balança eletrônica Gehaka BK 4000 com sensibilidade 0,01 g, a qual indica continuamente o decréscimo da massa do material no decorrer do processo de secagem.



**Fotografia 3** – Leito em aço inoxidável contendo amostras

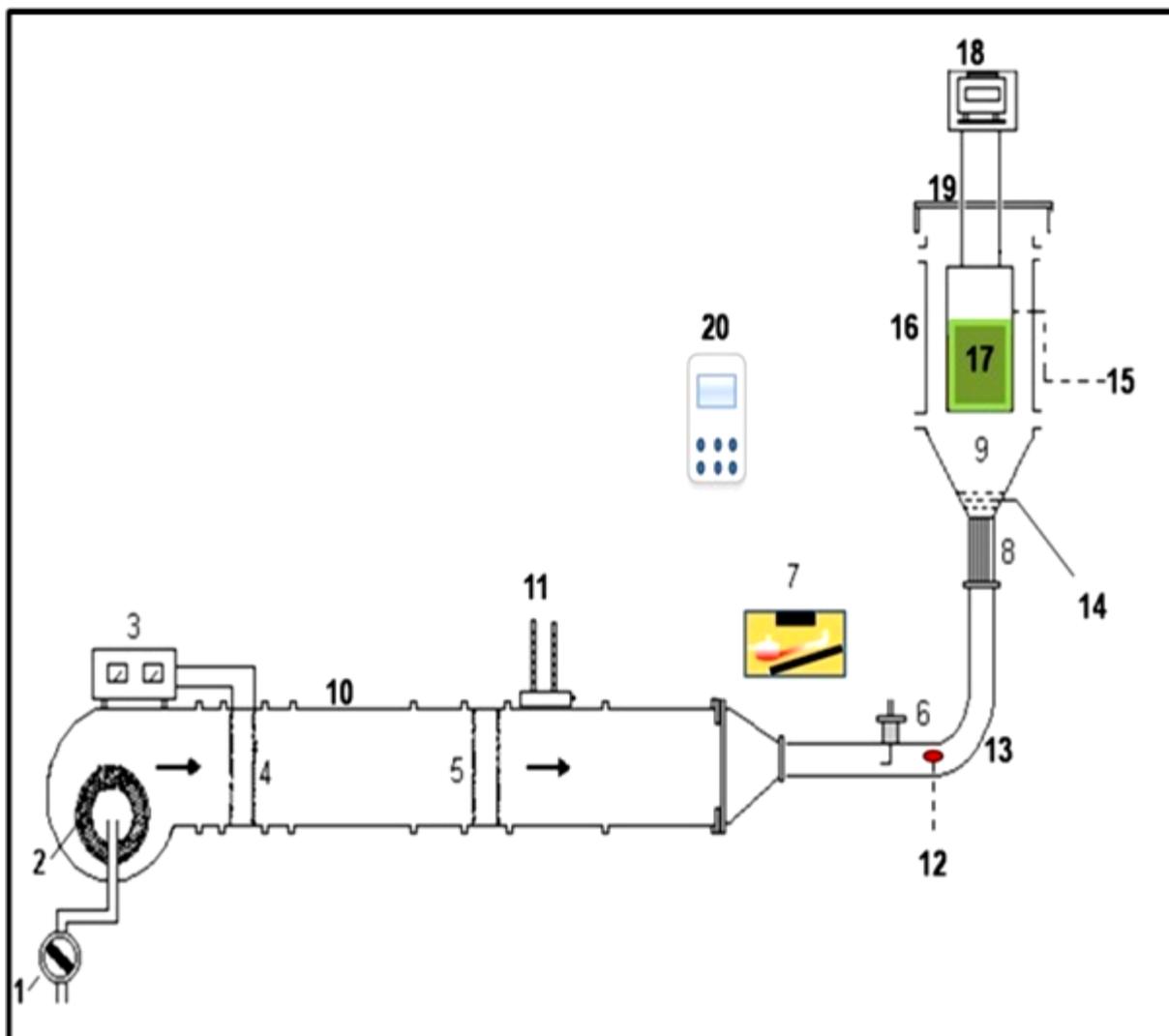
**Foto:** Rosilene. G. Costa

A instrumentação do protótipo consiste em um tubo de Pitot engastado na tubulação de aço inoxidável acoplado a um manômetro inclinado utilizado para a indicação da velocidade e da vazão mássica do ar de entrada. Um termômetro digital DM 68028 da EQUITHERM TIPE K, com indicadores em °C, foi colocado no ponto 12 da Esquema 2, para indicar a temperatura de entrada do ar de secagem. As condições ambientais no decorrer do processo foram monitoradas através de um termohigrômetro digital MOD SH 122. E foi utilizado um relógio de laboratório para cronometrar o tempo da cinética de secagem. Na Fotografia 4 é apresentado o secador de leite fixo durante uma corrida experimental, e o arranjo experimental completo está ilustrado no Esquema 2.



**Fotografia 4** – Secador de leite fixo

**Foto:** Rosilene. G. Costa



- |  |  |
|--|--|
| 1 - controle de velocidade do soprador | 11 - psicrômetro ( $T_{BS}$ e $T_{BU}$ de entrada) |
| 2 - soprador centrífugo                | 12 - medidor de temperatura do ar de entrada       |
| 3 - controlador de potência            | 13 - seção de acoplamento ao leito                 |
| 4 - par de resistências de 1 kW        | 14 - telas difusoras de ar                         |
| 5 - par de resistências de 1/2 Kw      | 15 - cesto (leito)                                 |
| 6 - tubo de Pitot                      | 16 - corpo do leito secador                        |
| 7 - manômetro inclinado                | 17 - camada de pataqueiras                         |
| 8 - distribuidor de ar                 | 18 - balança eletrônica de precisão                |
| 9 - câmara plenum                      | 19 - anteparo                                      |
| 10 - unidade básica de secagem         | 20 - termohigrômetro digital                       |

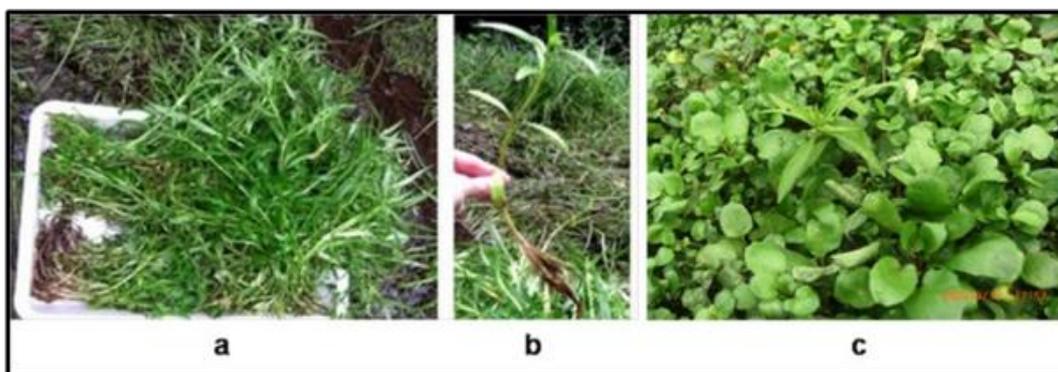
**Esquema 2** – Protótipo do secador de leite fixo utilizado neste trabalho

FONTE: adaptado de FARIA (1998)

## 4.2 Métodos

### 4.2.1 Hidroponia

O cultivo das plantas de pataqueira foi realizado numa horta hidropônica localizada na Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA). Para a instalação das plantas de pataqueira na horta hidropônica, exemplares de amostra PN foram cuidadosamente coletados com o seu sistema radicular e colocados em vasilhas de plástico para, então, serem levados para a horta hidropônica (Fotografia 5), onde foram instaladas consorciadas com agrião (plantas menores), decorrente de experimento paralelo.



**Fotografia 5** – Amostras de pataqueira coletadas para hidroponia.

**a)** plantas coletadas; **b)** planta com sistema radicular; **c)** plantas instaladas na horta hidropônica.

**Foto:** Rosilene. G. Costa

O sistema hidropônico utilizado foi do tipo NFT e promoveu o contato do sistema radicular das plantas com uma lâmina de solução nutritiva. A alimentação dessa solução no sistema ocorreu em intervalos de 15 minutos, com igual tempo sem fornecimento. O fornecimento de solução nutritiva ocorreu entre seis horas da manhã e 18 horas, sendo no período noturno interrompido a circulação da solução.

A solução nutritiva utilizada foi a recomendada por Furlani e colaboradores. (1998) para folhosas, 50% da formulação inicial, cuja composição química para 1000 L é 750 g  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ; 500g  $\text{KNO}_3$ ; 150 g  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ; 400 g  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ; 0,15 g  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ; 0,5 g  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ; 1,5 g  $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ; 1,5 g  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ; 0,15 g  $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e 30 g Fe-EDHHA.

Essa solução nutritiva foi mantida com pH de  $6,0 \pm 1,0$ , e condutividade elétrica ajustada para  $1,6 \pm 0,4$  mS/cm, adicionando-se água para correção da condutividade e sais para aumentar a concentração da solução. A cada 30 dias foi feita a renovação completa da solução.

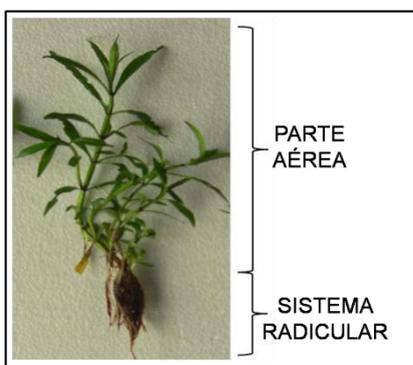
Para a avaliação do desenvolvimento das plantas de pataqueira na horta hidropônica, foram realizadas as seguintes análises:

1. medição da parte aérea das plantas para acompanhamento do seu crescimento,
2. quantificação dos macro e micronutrientes presentes no tecido vegetal da planta colhida em local de ocorrência espontânea e na horta hidropônica,
3. avaliação da fertilidade do solo onde as plantas foram coletadas,
4. análise do óleo essencial obtido da planta colhida em local de ocorrência espontânea e colhida na horta hidropônica.

A descrição dessas análises pode ser acompanhada nos tópicos a seguir:

#### 4.2.1.1. Medição das plantas de pataqueira

Para a análise do tamanho das amostras de pataqueira, foram escolhidas 50 plantas aleatoriamente, e com auxílio de uma trena foi obtido o comprimento da parte aérea de cada uma dessas plantas (Fotografia 6). A medição foi realizada com as plantas antes da instalação na horta hidropônica e dois e quatro meses após o início da hidroponia.



**Fotografia 6** – Planta de pataqueira

#### 4.2.1.2. Análise do tecido vegetal das plantas de pataqueira

As análises realizadas no tecido vegetal da planta de pataqueira inteira podem ser observadas na Tabela 4.2, estas também foram feitas pelo Laboratório de Solos da Embrapa Amazônia Oriental.

**Tabela 4.2:** Análises do tecido vegetal das plantas (macro e micronutrientes).

Análises	Metodologia	Instrumentação
N	Método Semimicro Kjeldahl	-
P	Método Colorimétrico	Espectrofotômetro (660nm)
K	Espectrometria de emissão atômica	Fotômetro de chama
Ca, Mg, Cu, Zn, Fe e Mn	Espectrometria de absorção atômica	Espectrofotômetro de absorção atômica

#### 4.2.1.3. Fertilidade do solo

Para a avaliação da fertilidade do solo foram realizadas as análises de granulometria e as apresentadas na Tabela 4.3. Todas estas análises foram feitas pelo Laboratório de Solos da Embrapa Amazônia Oriental.

**Tabela 4.3:** Análises de fertilidade do solo da área de proteção ambiental de Belém.

Análises	Metodologia	Instrumentação
pH do solo	-	Medidor de pH
Material orgânico	Método do Dicromato e procedimento colorimétrico	Espectrofotômetro
N	Método Kjeldahl	-
P e K	Método de Mehlich 1 (duplo ácido)	P – Espectrofotômetro (660nm) K – Fotômetro de chama
Na	Extração ácida (HCl)	Fotômetro de chama
Ca e Mg	Extração com KCl	Espectrofotômetro de absorção atômica
Al	Extração com KCl seguida de titulação com NaOH	-

## 4.2.2. Métodos de análise do óleo essencial

### 4.2.2.1. Umidade do material vegetal

A análise de umidade da amostra foi realizada com aquecimento direto em estufa a 105°C, segundo a norma analítica 4.5.1 do Instituto Adolfo Lutz, 1985.

### 4.2.2.2. Hidrodestilação

A obtenção do óleo essencial foi realizada por hidrodestilação, em processo contínuo por aproximadamente 3 horas em regime de coobação, utilizando sistema de vidro tipo Clevenger modificado e acoplado a um condensador, cuja temperatura do banho de refrigeração era de aproximadamente 15°C. Esse experimento foi realizado em duplicatas.

O armazenamento do óleo essencial obtido foi feito em ampola de vidro âmbar, na ausência de oxigênio, conservada em ambiente refrigerado a 5 - 10°C.

Para o cálculo de rendimento em óleo essencial foi utilizada a relação volume/massa, ou seja, no cálculo utilizou-se o volume do óleo obtido (mL) pela massa do material utilizado na hidrodestilação (g).

### 4.2.2.3. Análise do óleo essencial

Para a análise de composição química do óleo essencial obtido utilizou-se o aparelho THERMO DSQ II GC-MS, equipado com coluna capilar de sílica DB-5MS (30 m x 0,25 mm; 0,25 µm de espessura de filme) nas seguintes condições operacionais: programação de temperatura 60 °C a 240 °C, com gradiente de 3°C/min; temperatura do injetor 220 °C; gás de arraste: hélio, em velocidade linear de 32cm/s (medido a 100 °C); tipo de injeção *splitless* (1µL de uma solução na proporção de 2µL de óleo para 1mL *n*-hexano). Espectrômetro de massas: impacto eletrônico, energia do elétron a 70 eV; temperatura da fonte de íons: 200°C.

Os componentes químicos foram identificados através dos seus espectros de massas (EM) e índices de retenção (IR) com os de substâncias padrão, existentes nas bibliografias do sistema e, com dados da literatura (ADAMS, 2001). Os IR foram obtidos utilizando-se uma série homologa de *n*-alcanos.

A análise quantitativa do óleo essencial de pataqueira foi realizada por cromatografia de gás - ionização de chama (CG/IC), usando-se um FOCUS GC/FID operando nas mesmas condições do GC-MS, exceto o gás de arraste que foi nitrogênio.

#### 4.2.3. Planejamento estatístico da secagem de pataqueira em leito fixo.

Foram realizadas 14 corridas experimentais, sendo duas no ponto central, conforme o planejamento de Box-Behnken, cuja matriz do planejamento na ordem padronizada foi apresentada na Tabela 3.3. Os ensaios foram realizados de forma aleatória, visando minimizar os erros experimentais.

As variáveis de entrada foram: temperatura (**T**), tempo (**t**) e carga (**C**); codificadas como **X<sub>1</sub>**, **X<sub>2</sub>** e **X<sub>3</sub>**, respectivamente. As variáveis de respostas analisadas foram: teor de umidade final (**XF**), rendimento em óleo essencial (**REND**) e concentração dos componentes majoritários metiltimol (**MT**) e timol (**TI**) do óleo essencial. Na Tabela 4.4 são apresentados os valores das variáveis de entrada do processo utilizadas durante os experimentos.

**Tabela 4.4:** Variáveis independentes e seus valores codificados

Variáveis de Entrada	Unidades	Notação	Níveis		
			- 1	0	+ 1
Temperatura	°C	X <sub>1</sub>	60	70	80
Tempo	min	X <sub>2</sub>	60	90	120
Carga	g	X <sub>3</sub>	200	300	400

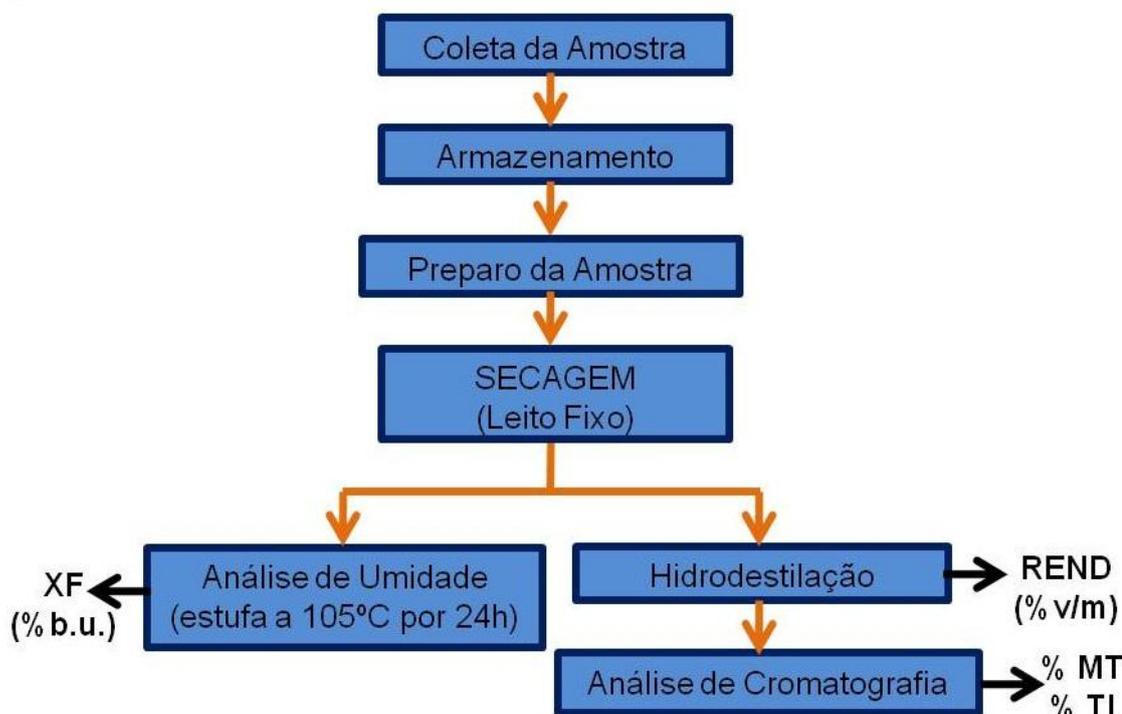
É importante destacar que as temperaturas de secagem foram escolhidas entre 60 e 80 °C devido às limitações do secador, no qual somente é possível controlar as variáveis operacionais de entrada a partir de 57 °C, por isso a escolha

da temperatura mínima de 60°C, e por segurança, até o limite máximo de 80 °C, devido à possível termodegradação de componentes de interesse contidos na amostra de pataqueira. Dessa forma, para diminuir o impacto desta temperatura no material vegetal e evitar uma possível degradação, o tempo de secagem foi estipulado no intervalo entre 1 e 2 horas. É válido ressaltar que na literatura citada à temperatura de secagem em torno de 60 °C foi a que gerou os melhores rendimentos em óleo essencial das plantas aromáticas estudadas, sem alteração significativa da composição química e degradação do óleo.

A otimização experimental das variáveis respostas desse experimento foi realizada com auxílio do software Statistica® 7.0 utilizando o planejamento de Box-Behnken.

#### 4.2.3.1 Procedimento experimental da secagem em leito fixo

As amostras PN foram secadas em secador convectivo de leito fixo (Fotografia 4), conforme a matriz de experimentos de Box-Behnken. Em cada corrida experimental foi realizada a sequência de atividades apresentada no Fluxograma 1.



**Fluxograma 1** - Sequência de experimentos para a secagem de pataqueira em leito fixo

**Coleta:** A pataqueira foi coletada na área de Proteção Ambiental de Belém, no Utinga, e para isso foram utilizados luvas e tesoura.

**Armazenamento:** Na etapa de armazenamento, as amostras PN primeiramente passaram por um processo de limpeza, onde foram retirados os materiais estranhos (capim e solo), em seguida foram colocadas em sacos plásticos pretos, na sequência pesadas, etiquetadas e enfim armazenadas em freezer.

**Preparo da Amostra:** Antes de cada corrida experimental as amostras PN foram retiradas do freezer e espalhadas em uma bandeja, ficando expostas ao ambiente por aproximadamente 30 minutos.

**Secagem:** A secagem foi realizada em secador convectivo de leito fixo com as variáveis independentes escolhidas no planejamento estatístico. A descrição detalhada do modo operacional e dos métodos de medição das variáveis no equipamento pode ser observada no tópico a seguir.

As etapas de determinação de umidade, hidrodestilação e análise cromatográfica, para a obtenção das variáveis respostas **XF**, **REND**, **MT** e **TI**, foram realizadas de acordo com a metodologia descrita no tópico 4.2.2, sendo que na análise cromatográfica foi utilizado apenas um cromatógrafo analítico quantitativo (FOCUS GC/FID), para determinar o teor de timol e metiltimol, presentes no óleo essencial de pataqueira.

#### **4.2.3.2 Descrição do modo operacional e método de medição das variáveis no secador de leito fixo**

Esse tópico foi escrito tomando por base o Esquema 2 (ver em página 48) que apresenta o protótipo de secador de leito fixo utilizado nesse trabalho.

O ar fresco foi admitido no protótipo, insuflado pelo soprador [2], com o controle da vazão realizado por meio de um transformador [1] que permitiu a variação da velocidade do rotor do soprador. A velocidade média e a vazão mássica do ar foram determinadas através do tubo de Pitot [6], em função da queda de pressão indicada no manômetro inclinado [7]. O ar de entrada foi aquecido através dos pares de resistências elétricas de 1kW [4] e 1/2kW [5], acionados em conjunto, para se obter as temperaturas desejadas de entrada lidas no medidor [12]. O ajuste fino da temperatura era obtido pelo controlador de potência [3] acoplado às

resistências elétricas de 1 kW [4]. A razão de umidade e demais propriedades psicrométricas do ar foram obtidas a partir da leitura das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido nos psicrômetros [11]. Para uniformização do fluxo de ar, este passou através das telas [14] e então fluiu através do leito fixo de sólidos [16], dispostos em camada espessa dentro do cesto telado [15] recebendo fluxo de ar ascendente com uma vazão adequada para não haver movimentação do leito.

#### 4.2.3.3. Função desejabilidade global

É um método proposto por Derringer e Suich (1980), que consiste em que para a qualidade de um processo com múltiplas características, é inaceitável quando pelo menos uma destas características se encontra fora do limite desejado; sendo que este limite se encontra num intervalo de [0, 1], onde 0 significa um valor inaceitável e 1 o valor mais desejável, ou seja, o valor ótimo.

A função desejabilidade é um método muito utilizado para a otimização simultânea de processos com múltiplas escolhas, e a definição da desejabilidade global, pode ser dada pela Equação 4.1.

$$D = \sqrt[m]{d_1 d_2 \dots d_m} \quad (4.1)$$

Na equação 4.1 verifica-se que a desejabilidade global é uma média geométrica das  $m$  desejabilidades individuais, artifícios pela qual a otimização simultânea das varias respostas se reduz a maximização de um único valor, a desejabilidade global ( $D$ ). Nesta equação pode ser observado que caso uma resposta  $d_m$  seja igual a zero, a desejabilidade global será igual a zero também.

Para a otimização numérica desta função, pode ser utilizado programas computacionais específicos no mercado, e o que será utilizado nesse trabalho é o Statistica 7.0®.

O programa Statistica® 7.0 utiliza uma abordagem usada por Derringer e Suich (1980), que é baseada no seguinte principio:

- Os valores inferior, superior e mediano são denominados, respectivamente, por  $L_i$ ,  $L_s$  e  $M$ , os quais são desejados para a resposta  $\hat{Y}$ , com  $L_i \leq M \leq L_s$ .

- 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 4.2.
- Se a resposta deve ser minimizada, a desejabilidade individual é definida na forma da Equação 4.3.
- Se a resposta é 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 4.4.

$$d = \begin{cases} 0 & \hat{Y} < Li \\ \left( \frac{\hat{Y} - Li}{M - Li} \right)^s & Li \leq \hat{Y} \leq M \\ 1 & \hat{Y} > M \end{cases} \quad (4.2)$$

$$d = \begin{cases} 1 & M < \hat{Y} \\ \left( \frac{Ls - \hat{Y}}{Ls - M} \right)^t & M \leq \hat{Y} \leq Ls \\ 0 & \hat{Y} > Ls \end{cases} \quad (4.3)$$

$$d = \begin{cases} 0 & \hat{Y} < Li \\ \left( \frac{\hat{Y} - Li}{M - Li} \right)^s & Li \leq \hat{Y} \leq M \\ \left( \frac{Ls - \hat{Y}}{Ls - M} \right)^t & M \leq \hat{Y} \leq Ls \\ 0 & \hat{Y} > Ls \end{cases} \quad (4.4)$$

Por fim a desejabilidade consiste em três etapas: **(1)** Conduzir os experimentos e ajustar as respostas dos modelos para todas as respostas; **(2)** Definir as funções desejabilidade individuais para cada resposta e **(3)** Maximizar a desejabilidade global  $D$ , em relação aos fatores controlados.

Na Tabela 4.5, estão indicados os critérios de aceitabilidade para as respostas obtidas, propostos por Akhnazarova e Kafarov (1982), utilizados para a determinação do ponto ótimo, em função de restrições nas variáveis operacionais de entrada.

**Tabela 4.5:** Escala de valores de desejabilidade individual 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 de limite de aceitação
0,00 a 0,20	Inaceitável

#### 4.2.4. Cinética da secagem em leito fixo da amostra PN.

Para a cinética de secagem, durante as corridas experimentais, foram coletados dados do processo nos intervalos de 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 e 120 minutos. Esses dados foram: massa da amostra ( $m(t)$ ); temperatura de secagem ( $T_s$ ); temperatura de bulbo úmido ( $T_{B.U.}$ ); temperatura de bulbo seco ( $T_{B.S.}$ ); deflexão manométrica ( $Dfm$ ); temperatura ambiente ( $T_{AMB}$ ) e umidade relativa do ambiente ( $UR$ ).

A montagem das curvas de secagem foi realizada com o auxílio das Equações 4.5 e 4.6, e foi posto em gráfico os valores do teor de umidade adimensionais ( $X_R$ ) em função do tempo de secagem.

$$X_{b.s.}(t) = \left( \frac{m(t) - m_{ss}}{m_{ss}} \right) \times 100 \quad (4.5)$$

$$X_R = \frac{X_{(t)}}{X_0} \quad (4.6)$$

em que  $m(t)$  representa a variação média da massa de sólidos durante o processo de secagem,  $m_{ss}$  a massa sólido seco (g),  $X$  é o teor de umidade e o subscrito  $b.s.$  representa que o valor é dado em base seca.

Os pontos experimentais das curvas de secagem foram ajustados aos modelos cinéticos da literatura apresentados na Tabela 4.3. Os ajustes foram realizados, utilizando uma estimativa não linear, por meio do método dos mínimos quadrados, com auxílio do software de Statistica® 7.0.

A escolha do modelo mais adequado foi realizada com base nas estatísticas: coeficiente de determinação ( $R^2$ ), análise do gráfico em duas dimensões ou no plano (**gráfico 2D**) e análise de resíduos (amplitude e distribuição).

Para o ajuste dos pontos experimentais da curva de secagem aos modelos cinéticos, primeiramente determinou-se quais os pontos da curva de secagem que apresentam um comportamento linear (período de retirada da umidade superficial, em que a velocidade (taxa) de secagem é constante) e em seguida, ajustou-se os pontos restantes da curvas aos outros modelos cinéticos da Tabela 4.6 (período de taxa de secagem decrescente, em que a água começa a ser deficiente na superfície e a velocidade de secagem diminui).

**Tabela 4.6:** Modelos matemáticos aplicados à cinética de secagem de sólidos

Modelo (ano)	Equações	Parâmetros (unidade)
Andrade; Faria (2009)	$X_R = \exp(-k.t) + b.t^n + c.t$	$k$ ( $\text{min}^{-1}$ ), $b$ ( $\text{min}^{-n}$ ), $n$ (adim), $c$ ( $\text{min}^{-1}$ )
Linear	$X_R = a - b.t$	$a$ (adim), $b$ ( $\text{min}^{-1}$ )
Logarítmico	$X_R = a.\exp(-k.t) + b$	$a$ (adim), $k$ ( $\text{min}^{-1}$ ), $b$ (adim)
Page (1949)	$X_R = \exp(-k.t^n)$	$k$ ( $\text{min}^{-1}$ ), $n$ (adim)
Polinomial	$X_R = a + b.t + c.t^2$	$a$ (adim), $b$ ( $\text{min}^{-1}$ ), $c$ ( $\text{min}^{-2}$ )
Wang e Singh (1978)	$X_R = 1 + a.t + b.t^2$	$a$ ( $\text{min}^{-1}$ ), $b$ ( $\text{min}^{-2}$ )

Com a escolha dos modelos cinéticos apropriados foi calculada a taxa de secagem ( $W$  -  $\text{mg}/\text{min}.\text{cm}^2$ ), através da derivação desses modelos e aplicação desta na Equação 4.7, e por fim foram construídas as curvas de taxa de secagem de  $W$  em função do tempo de secagem e do teor de umidade adimensional.

$$W = -\frac{m_{ss}}{A} \cdot \frac{dX}{dt} \quad (4.7)$$

---

---

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Hidroponia

A pataqueira apresentou boa adaptação ao sistema hidropônico tipo NFT e essa constatação pode ser comprovada comparando-se as Fotografias 7, 8, 9, e 10, que apresentam as plantas do momento em que foram instaladas na horta hidropônica até o momento em que atingiram o seu tamanho adulto. Nas fotografias é observado que as plantas de pataqueira estão consorciadas com agrião (plantas menores), decorrente de experimento paralelo.

Durante o cultivo, foi observado que as raízes de pataqueira retinham parte da solução nutritiva, o que resultava em constante disponibilidade de água e nutrientes para o sistema radicular das plantas, e isso, de certa forma, simulava o ambiente em que a pataqueira é comumente encontrada. Os sistemas radiculares das plantas se entrelaçaram de tal forma que impediu a coleta de plantas inteiras, sendo necessário cortá-las (Fotografias 11 e 12). Essa característica permitiu que as plantas cortadas, voltassem a crescer e se desenvolver, como acontece em seu ambiente natural e, em apenas 2 meses, as plantas já apresentavam altura média de 30 cm, distribuídas em toda a horta hidropônica, com um rendimento de massa fresca de 2,5 kg/m<sup>2</sup>.

Nesse sistema hidropônico, foram constatados danos provocados por hemípteros os quais provocavam lesões nas folhas, e o controle foi feito com produtos alternativos à base de alho e neem. Também foi identificada no sistema a ocorrência de *Pythium* sp., porém as plantas de pataqueira mostraram tolerância ao fungo tendo sistema radicular pouco afetado se comparado ao agrião, no consorcio experimentado.



**Fotografia 7** – Instalação das plantas de pataqueira na horta hidropônica

**Foto:** Rosilene. G. Costa



**Fotografia 8** – Plantas de pataqueira após 1 mês de cultivo hidropônico.

**Foto:** Rosilene. G. Costa



**Fotografia 9** – Plantas de pataqueira após 2 meses de cultivo hidropônico.

**Foto:** Rosilene. G. Costa



**Fotografia 10** – Plantas de pataqueira após 4 meses de cultivo hidropônico.

**Foto:** Rosilene. G. Costa



**Fotografia 11** – Sistema radicular das plantas no sistema hidropônico

**Foto:** Rosilene. G. Costa

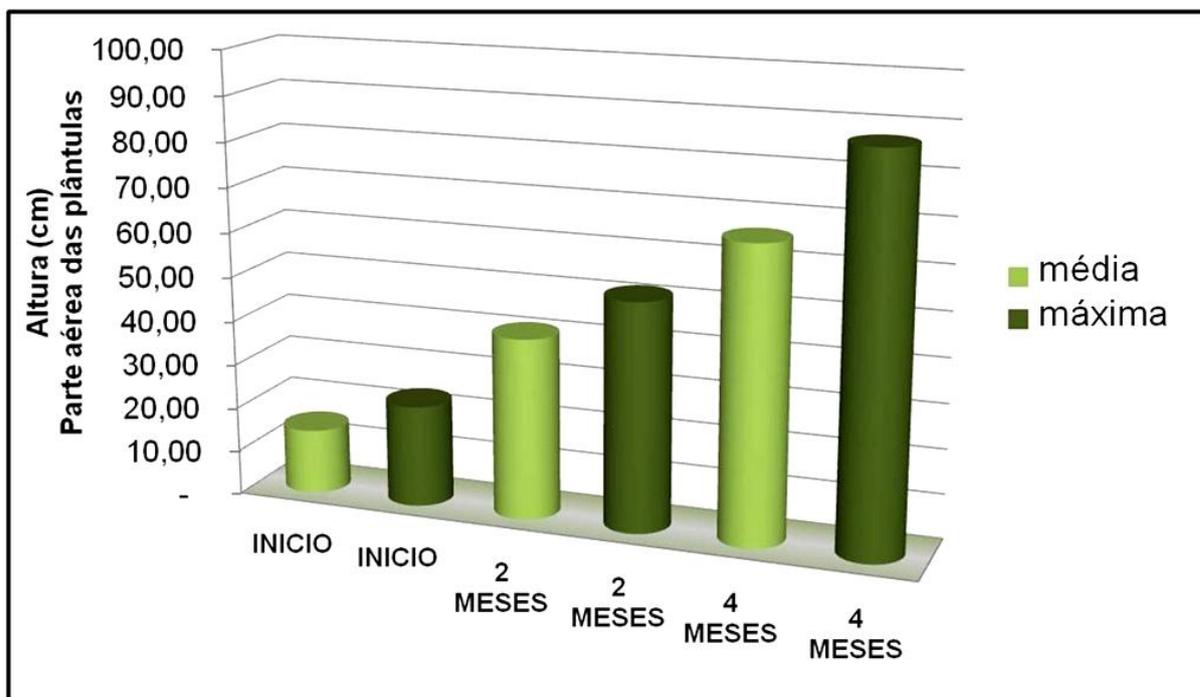


**Fotografia 12** – Horta hidropônica após as coleta das amostras de pataqueira.

**Foto:** Rosilene. G. Costa

### 5.1.1. Crescimento das plantas

A pataqueira cultivada em sistema hidropônico do tipo NFT apresentou um crescimento significativo, como pode ser observada no Gráfico 2.



**Gráfico 2** – Altura média e máxima da parte aérea de amostras de pataqueira cultivadas em sistema hidropônico tipo NFT.

No Gráfico 2 verifica-se que a média da altura da parte aérea das plantas de pataqueira instaladas na horta era 14,5 cm, chegando a uma altura máxima de aproximadamente 23 cm, e após 4 meses de cultivo as amostras cresceram mais de 50 cm, em média, chegando a uma altura máxima de 87 cm.

É importante destacar que muitas plantas de pataqueira se ramificaram e algumas dessas ramificações resultaram em novas plantas, e isso pode ter influenciado no cálculo da média das alturas obtidas, já que a escolha das plantas para a medição foi aleatória. Contudo, essas ramificações favoreceram o rendimento da massa de planta fresca, cujo valor foi em média 4 kg/m<sup>2</sup>.

### 5.1.2. Análise do tecido vegetal das plantas de pataqueira

Na Tabela 5.1 constam os valores dos macro e micronutrientes presentes nos tecidos vegetais das plantas colhidas em local de ocorrência espontânea, no Utinga, (amostra PN) e colhidas na horta hidropônica após 4 meses de cultivo (amostra PH). As plantas da amostra PN apresentavam em média 50 cm de comprimento (parte aérea), e foram colhidas junto com as mudas de pataqueira selecionadas para a instalação na horta hidropônica.

**Tabela 5.1:** Análise do tecido vegetal das plantas de pataqueira (planta inteira)

Análises do tecido vegetal	Componentes	Amostra vegetal	
		PN	PH
MICRONUTRIENTES	Cu (mg/kg)	5,5	9,2
	Mn (mg/kg)	164,7	188,3
	Zn (mg/kg)	60,6	60,6
	Fe (mg/kg)	1086,4	471,9
MACRONUTRIENTES	N (g/kg)	24,26	31,37
	P (g/kg)	4,15	5,34
	K (g/kg)	11,02	45,63
	Ca (g/kg)	4,31	6,49
	Mg (g/kg)	6,77	12,23

Na Tabela 5.1 verifica-se que nos micronutrientes ocorreu um aumento de cobre e manganês após o cultivo hidropônico, já a concentração de zinco se manteve constante, e a concentração de ferro que era elevada na amostra PN, diminuiu significativamente. Devido a observação dessa elevada concentração de ferro na amostra PN, foi realizado uma análise do solo para a quantificação desse micronutriente e foi comprovado a elevada concentração de ferro no solo (714,2mg/kg) em comparação com a concentração de Cu (0,9 mg/kg), Mn (1,8 mg/kg) e Zn (3,6 mg/kg).

Nos macronutrientes houve um enriquecimento de todos os componentes analisados, em especial o potássio e o magnésio cuja as concentrações aumentaram de 11,02 para 45,64 g/kg e 6,77 para 12,23 g/kg, respectivamente.

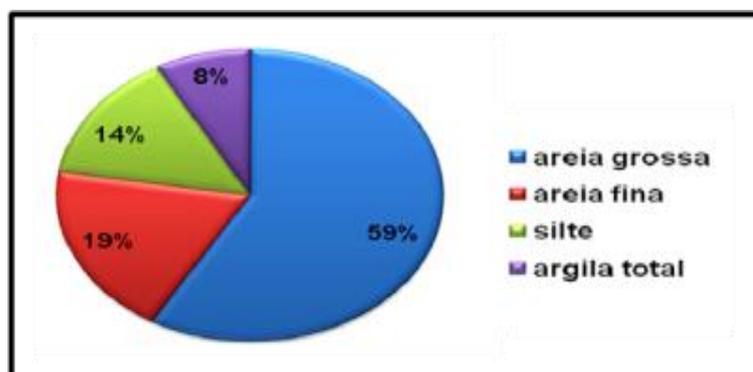
### 5.1.3. Fertilidade do solo de onde foram coletadas as amostras PN

Foram retiradas duas amostras de solo para essa análise, uma no mês de março (período chuvoso) e outra no mês de julho (período seco). Com essas amostras foram determinados o pH do solo, a concentração de matéria orgânica, e as concentrações de P, K, Na, Ca, Ca+Mg e Al presentes no solo. Os valores obtidos podem ser observados na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2:** Análise solo coletado em março e em julho de 2009.

Análises (unidades)	Solo em Março	Solo em Julho
pH da água	5,2	4,8
Matéria Orgânica (g/kg)	52,33	32,06
N (%)	0,43	0,32
P (mg/dm <sup>3</sup> )	3	5
K (mg/dm <sup>3</sup> )	33	20
Na (mg/dm <sup>3</sup> )	23	11
Ca (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	0,7	0,5
Ca+Mg (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	1,2	1,0
Al (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	0,9	0,9

É observado que do período chuvoso para o início do verão ocorre um aumento da acidez do solo, que pode ser explicado devido ao fato de que solos alagados tendem a elevar o pH. É observado também um decréscimo de quase todos os componentes do solo, em especial o teor de matéria orgânica, que são muito importantes na avaliação da sua fertilidade, e pode ser um fator que contribui para o processo de desaparecimento temporário da pataqueira. A análise granulométrica desse solo é apresentada no gráfico ilustrado a seguir:

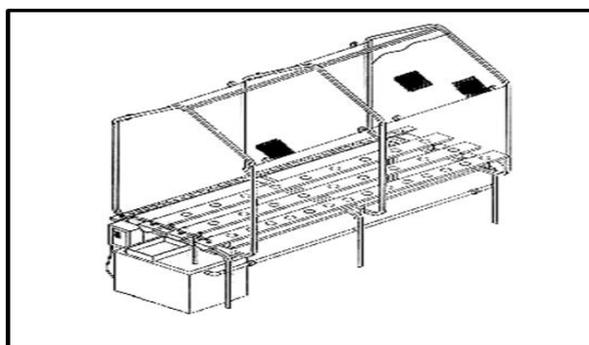


**Gráfico 3 –** Granulometria do solo

#### 5.1.4. Riscos do cultivo hidropônico da pataqueira

Entre o período de fevereiro a julho de 2009 tentou-se realizar o cultivo da pataqueira em um Kit Mini-Horta Hidropônica comercializado por empresa especializada.

Este Kit mini-horta hidropônica (Esquema 3) é composto de: armação de aço, plástico atóxico, tubulações especiais para hidroponia, sistema controlado por timer, reservatório da solução nutritiva, com capacidade para 16 L, sistema de bombeamento para a circulação da solução nutritiva e aeração da mesma, e a área de ocupação do Kit é de aproximadamente 3 m<sup>2</sup>.



**Esquema 3** – Estrutura física do Kit Mini-Horta Hidropônica.

Com o Kit vieram os sais necessários para o preparo da solução nutritiva, com as suas devidas concentrações para o preparo das soluções **A**, **B**, **C** e **D**. A solução “**A**” composta por nitrato de potássio 1200 g/1000 L, fosfato de monoamônio 200 g/1000 L e sulfato de magnésio 240 g/1000 L. A solução “**B**” composta por nitrato de cálcio 400 g/1000 L. A solução “**C**” é uma solução concentrada contendo boro, cobre, manganês, molibdênio e zinco, com concentração de 100 mL/1000 L. A solução “**D**” é composta por ferro quelatinizado na concentração de 250 mL/1000 L.

A utilização desse Kit foi satisfatória no período chuvoso, pois as plantas de pataqueira se desenvolveram e produziram flores (Fotografia 13). Também houve o entrelaçamento do sistema radicular das plantas na mini-horta hidropônica (Fotografia 14). Contudo, a falta de apoio das plantas no Kit causou o seu tombamento para os lados, gerando uma curvatura não observada no cultivo natural (Fotografia 15).



**Fotografia 13** – Plantas de pataqueira cultivadas no Kit mini-horta hidropônica.

**Foto:** Rosilene. G. Costa



**Fotografia 14** – Entrelaçamento dos sistemas radiculares das plantas

**Foto:** Rosilene. G. Costa



**Fotografia 15** – Curvatura da planta devido ao tombamento durante o cultivo hidropônico

**Foto:** Rosilene. G. Costa

Com o aumento da temperatura e diminuição das chuvas, provocado pela chegada do verão, ocorreu o ressecamento das plantas e o apodrecimento do seu sistema radicular (Fotografia 16). Descartou-se o ataque de microorganismos porque a morte das plantas não ocorreu de forma generalizada.



**Fotografia 16** – Plantas de pataqueira durante o período quente.

**Foto:** Rosilene. G. Costa

As principais possibilidades avaliadas para a causa dessas mortes foram à incidência direta do sol nas plantas e o aumento significativo da temperatura da solução nutritiva. A temperatura da solução nutritiva elevou-se acima de 31°C, apesar das trocas sucessivas da solução nutritiva. Como forma de controlar estes problemas foi utilizado sombrite e remanejamento do Kit para um ambiente com menor incidência solar, porém as plantas continuaram morrendo (Fotografia 17). É evidente que o cultivo hidropônico de pataqueira exige condições semelhantes às aquelas observadas com outras plantas aromáticas. Portanto, ambiente e solução nutritiva com temperatura abaixo de 30 °C.



**Fotografia 17** – Plantas de pataqueira mortas.

**Foto:** Rosilene. G. Costa

## 5.2. Óleo Essencial da Pataqueira (*Conobea scoparioides*)

O óleo foi destilado de amostras recém coletadas de pataqueira, tanto da área de ocorrência natural (PN), quanto da horta hidropônica (PH). Foram obtidos óleos da planta fresca (destilação imediata) e da planta previamente seca (temperatura ambiente durante 5 dias), resultando nas seguintes amostras: **PN<sub>IN</sub>** (PN *in natura*), **PN<sub>STA</sub>** (PN seca), **PH<sub>IN</sub>** (PH *in natura*) e **PH<sub>STA</sub>** (PH seca), respectivamente.

As amostras PN (proveniente da área de proteção ambiental) foram coletadas nos meses de março, julho e setembro, e o valor da média do rendimento em óleo essencial, pode ser observado na Tabela 5.3.

As amostras PH (proveniente da horta hidropônica) foram coletadas após 4 meses de cultivo hidropônico, quando foi feito o primeiro corte (mencionado no tópico 5.1). O segundo corte foi feito aos 6 meses. Com base nisso as amostras PH foram denominadas de **PHP** e **PHR**, que significam pataqueira hidropônica obtida na primeira coleta (4 meses de cultivo) e pataqueira hidropônica obtida da rebrota (6 meses de cultivo), Respectivamente. A Tabela 5.3 apresenta os valores médios obtidos na caracterização dessas amostras.

**Tabela 5.3:** Teor de umidade e rendimento em óleo essencial da pataqueira

Amostras	X (% b.u.) ± s	Rendimento (% v/m) ± s
PN <sub>IN</sub>	90,9 ± 1,18	0,2 ± 0,07
PN <sub>STA</sub>	12,8 ± 0,78	2,2 ± 0,33
PHP <sub>IN</sub>	91,1 ± 0,21	0,2 ± 0,09
PHP <sub>STA</sub>	20,8 ± 0,75	1,5 ± 0,02
PHR <sub>IN</sub>	90,7 ± 1,08	0,6 ± 0,02
PHR <sub>STA</sub>	18,7 ± 0,92	3,2 ± 0,20

**PN<sub>IN</sub>**: pataqueira natural *in natura*; **PN<sub>STA</sub>**: pataqueira natural seca; **PHP<sub>IN</sub>**: pataqueira hidropônica *in natura* obtida no primeiro corte; **PHP<sub>STA</sub>**: pataqueira hidropônica seca obtida no primeiro corte; **PHR<sub>IN</sub>**: pataqueira hidropônica *in natura* obtida da rebrota; **PHR<sub>STA</sub>**: pataqueira hidropônica seca obtida da rebrota; **X** = teor de umidade; **s** = desvio padrão.

Verificou-se que as amostras apresentaram teor de umidade e rendimento em óleo essencial semelhante àqueles previamente descritos na literatura (MAIA, 2007; REBELO et al., 2009). As amostras secas tiveram rendimento significativamente maior do que as amostras *in natura*, muito provavelmente devido ao elevado teor de umidade, que é característico desta planta. Foi visto que a separação da mistura azeotrópica água-óleo é dificultada no processo de destilação, à medida que aumenta o teor de água na planta.

As amostras PN (frescas, recém coletadas) apresentaram comportamento semelhante, independentemente da época de coleta. O desvio padrão das amostras foi baixo.

As amostras cultivadas em meio hidropônico apresentaram excelente resultado proporcionando rendimento maior que da amostra fresca, recém coletada no campo. A amostra da horta hidropônica colhida com 4 meses (PHP<sub>STA</sub>, 1,5 %) apresentou rendimento em óleo ligeiramente menor que aquele observado na amostra colhida no campo (PN<sub>STA</sub>, 2,2 %). A amostra colhida com 6 meses (PHR<sub>STA</sub>, 3,2 %) apresentou rendimento em óleo superior ao da amostra fresca colhida no campo PN (PN<sub>STA</sub>, 2,2 %), além de ser maior que os valores previamente obtidos (MAIA, 2007). É evidente que o tempo de cultivo hidropônico não deve ser inferior a 6 meses para se evitar menor rendimento em óleo. É oportuno também testar amostras com tempo de cultivo maior que 6 meses, no sentido de aumentar o rendimento em óleo. Com estes resultados verifica-se que a pataqueira pode ser cultivada em sistema hidropônico (do tipo NFT), com bom rendimento em óleo essencial.

### **5.2.1 Composição química do óleo essencial de pataqueira obtida por crescimento espontâneo e por meio hidropônico.**

Para a análise da composição química do óleo essencial de pataqueira foram utilizadas amostras de crescimento espontâneo (**PN**) e amostras provenientes da horta hidropônica (**PH**), com 4 meses de cultivo. Os óleos foram obtidos com amostras da planta fresca e amostras da planta previamente secas à temperatura ambiente, e comparadas entre si (Tabelas 5.4a e 5.4b).

Nas Tabelas 5.4a e 5.4b verifica-se que o cultivo hidropônico não promoveu alteração qualitativa na composição química do óleo essencial da pataqueira. Foi observada uma correlação entre os componentes majoritários ( $\alpha$ -felandreno, metiltimol e timol) das amostras PN (*in natura* e seca) e PH (*in natura* e seca), cuja soma é da ordem de 90 %. Esta proporção também foi observada em trabalho anterior (REBELO, 2008; MAIA et al, 2000). A similaridade dos compostos pode ter alguma implicação com este resultado, tendo em vista a sua estabilidade estrutural (ver Esquema 1 na página 23).

Por outro lado, os processos de secagem e hidroponia ocasionam alteração quantitativa significativa nos óleos essenciais analisados, em especial quanto à proporção dos componentes majoritários.

**Tabela 5.4a:** Composição do óleo da pataqueira com ocorrência natural, proveniente de amostras fresca e seca à temperatura ambiente.

Componentes	PN <sub>IN</sub>	PN <sub>STA</sub>
$\alpha$ -pineno	0,3	0,4
3-octanona	1,2	1,8
$\alpha$ -felandreno	12,9	24,8
p-cimeno	0,9	1,1
$\gamma$ -terpineno	0,3	0,3
p-cimeneno	0,2	0,1
linalol	0,3	0,1
p-cimen-8-ol	0,7	0,3
$\alpha$ -terpineol	-	0,1
trans-p-menta-1(7),8-dien-2-ol	0,2	0,1
metiltimol	40,0	20,3
timol	38,5	47,8
carvacrol	0,2	0,1
acetato de timol	-	0,1
eugenol	-	0,3
$\alpha$ -zingibereno	0,9	0,1
(E,E)- $\alpha$ -farneseno	-	-
(E)-nerolidol	-	-
<b>Total</b>	<b>96,6</b>	<b>97,8</b>

Desta forma, nas amostras PN (de ocorrência natural), fresca e seca à temperatura ambiente, o teor de  $\alpha$ -felandreno duplicou de 12,9% para 24,8 %, o teor de metiltimol reduziu-se na mesma proporção de 40,0% para 20,3 %, enquanto o teor do timol se elevou de 38,5% para 47,8 %. É provável que a maior volatilidade do metiltimol tenha contribuído para esta nova composição dos três principais constituintes do óleo de pataqueira. Ou seja, com a redução do percentual de metiltimol, aumentou a proporção de  $\alpha$ -felandreno e timol, particularmente do primeiro que é um hidrocarboneto.

**Tabela 5.4b:** Composição do óleo essencial de pataqueira submetida a cultivo hidropônico, proveniente de amostras fresca e seca à temperatura ambiente.

<b>Componentes</b>	<b>PH<sub>IN</sub></b>	<b>PH<sub>STA</sub></b>
$\alpha$ -pineno	0,3	0,2
3-octanona	1,2	1,8
$\alpha$ -felandreno	25,0	20,0
<i>p</i> -cimeno	1,1	1,2
$\gamma$ -terpineno	0,3	0,4
<i>p</i> -cimeneno	0,1	0,2
linalol	0,2	0,3
<i>p</i> -cimen-8-ol	0,3	0,6
$\alpha$ -terpineol	-	0,1
trans- <i>p</i> -menta-1(7),8-dien-2-ol	-	-
metiltimol	33,8	27,2
timol	32,1	43,8
carvacrol	-	0,3
acetato de timol	0,4	0,5
eugenol	0,3	0,4
$\alpha$ -zingibereno	0,8	0,1
( <i>E,E</i> )- $\alpha$ -farneseno	-	0,1
( <i>E</i> )-nerolidol	0,1	0,1
<b>Total</b>	<b>96,0</b>	<b>97,3</b>

Nas amostras PH (cultivo hidropônico) fresca e seca à temperatura ambiente, os teores do  $\alpha$ -felandreno e metiltimol foram reduzidos de 25,0% para 20,0 % e de 33,8% para 27,2 %, respectivamente, enquanto que o teor do timol aumentou de

32,1% para 43,8 %. Observa-se que as alterações provocadas pela secagem foram menores nas amostras PH do que nas amostras PN. Estas modificações podem ser atribuídas à mudança do meio nutricional da planta. O processo hidropônico ocasionou alteração no balanço de macro e micronutrientes da planta em comparação com o ambiente natural, como pode ser visto no tópico 5.1.2. Houve uma redução significativa no teor de ferro e aumento da concentração de outros elementos como o fósforo. O aumento do teor de timol no óleo essencial das brácteas *Origanum dictamnus* foi influenciado pelo aumento da concentração de fósforo no seu cultivo hidropônico (ECONOMAKIS, C. et al., 2002.); e isto pode ter ocorrido com o aumento de timol na amostra de pataqueira obtida por meio hidropônico.

Em ambos os casos, na análise das amostras PN e PH, não se elimina a possibilidade da secagem ter influenciado o sistema enzimático da planta, promovendo estas alterações. Os constituintes principais, do ponto de vista estrutural são muito assemelhados e é provável que as enzimas que controlam o metabolismo da planta tenham agido em função da presença/ausência de água no processo.

### **5.3. Secagem Convectiva da Pataqueira em Leito Fixo**

Na execução das corridas experimentais de secagem com as amostras PN e PH utilizou-se o secador convectivo de leito fixo, conforme ilustrado no Esquema 2 (página 48) e Fotografia 4 (página 47), mantendo-se constante a velocidade do ar de secagem, variedade de pataqueira, forma e tamanho do material e teor inicial de umidade, em média.

Das variáveis que mais influenciam a eficiência de secagem convectiva: temperatura, tempo de secagem, velocidade do ar e tamanho (ou granulometria) do material, segundo Strumillo e Kudra (1986), somente a temperatura e o tempo serão consideradas variáveis de entrada do processo, sendo as outras mantidas constantes. A velocidade do ar de secagem, e conseqüentemente suas vazões volumétrica e mássica, foram quantificadas por meio de tubo de Pitot e psicrômetro,

instalados no secador. A leitura do psicrômetro, para todas as corridas experimentais, indicou as temperaturas de bulbo seco e úmido médias, que constam no Apêndice D, onde também estão contidos os cálculos das vazões volumétricas e mássicas do ar de secagem.

Para a secagem da pataqueira em leito fixo foi utilizada a amostra PN (pataqueira proveniente do seu habitat natural), e o planejamento de Box-Behnken.

### 5.3.1 Planejamento experimental

A matriz de experimentos com as variáveis de entrada originais e os resultados das variáveis de resposta, é apresentada na Tabela 5.5.

**Tabela 5.5:** Matriz de experimentos de Box-Behnken.

Corridas	Variáveis Originais			Variáveis de Respostas			
	T (°C)	t (min)	C (g)	REND (%)	XF (%)	MT (%)	TI (%)
01	60	60	300	1,00	79,97	28,77	51,71
02	80	60	300	0,50	13,39	8,70	71,43
03	60	120	300	2,50	25,35	31,67	44,93
04	80	120	300	1,86	4,36	15,02	73,28
05	60	90	200	2,42	42,33	35,47	42,20
06	80	90	200	1,67	4,58	11,64	77,44
07	60	90	400	1,66	45,60	29,04	57,25
08	80	90	400	1,56	44,43	27,18	50,01
09	70	60	200	1,83	47,79	25,77	61,54
10	70	120	200	3,00	8,58	26,56	60,53
11	70	60	400	1,31	69,50	32,17	45,99
12	70	120	400	2,22	18,35	31,92	49,73
13	70	90	300	2,58	19,01	34,33	44,05
14	70	90	300	2,63	22,39	29,09	57,01

**T:** Temperatura; **t:** tempo; **C:** carga, **REND:** rendimento em óleo essencial; **XF:** teor de umidade final da amostra seca em leito fixo, em base úmida; **MT:** Concentração do componente metiltimol, no óleo essencial da amostra de pataqueira seca em leito fixo **TI:** Concentração do componente timol, no óleo essencial da amostra de pataqueira seca em leito fixo.

Na Tabela 5.5 verifica-se que dentro do domínio experimental selecionado, o rendimento em óleo essencial variou de 0,50 a 3,00 %v/m, a umidade final oscilou entre 4,36 e 79,97 % e os teores de timol e metiltimol variaram entre 42,27 - 77,44%

e 8,70 - 35,47%, respectivamente. O  $\alpha$ -felandreno não foi quantificado tendo em vista que nas condições máximas da secagem a sua oscilação foi muito grande, provavelmente pela sua maior volatilidade. Os dados experimentais obtidos durante cada corrida podem ser observados no Apêndice A.

### 5.3.2 Otimização do experimento

Para otimizar o processo de secagem em leito fixo de amostras de pataqueira, foi utilizado o método de superfície resposta, e análises e interpretações de dados obtidos das variáveis respostas, conforme as saídas do Statistica® 7.0, considerando o nível de significância  $\alpha = 0,05$  (confiança 95%).

Foi proposto um modelo polinomial completo de segunda ordem para ajuste dos dados e determinação do erro puro, para as respostas que possuem significância estatística para a operação de secagem de pataqueira em leito fixo.

#### 5.3.2.1 Efeitos das variáveis de entrada na resposta REND

##### 5.3.2.1.1. Efeitos principais e das interações

Os efeitos das variáveis isoladas e combinadas na resposta REND estão apresentados na Tabela 5.6.

**Tabela 5.6:** Estimativa dos efeitos para a variável de resposta REND

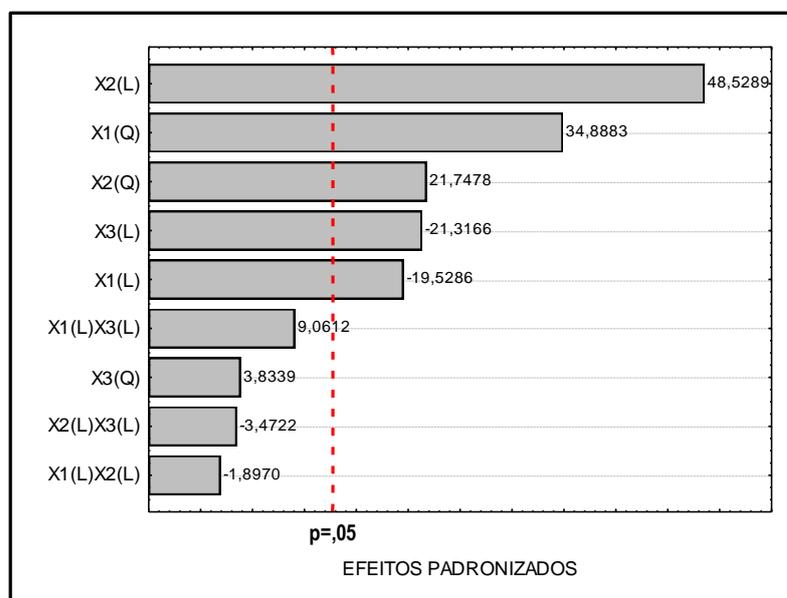
Efeitos	Valores estimados $\pm$ erro
X <sub>1</sub> (L)	- 0,4973 $\pm$ 0,0255
X <sub>1</sub> (Q)	0,7024 $\pm$ 0,0201
X <sub>2</sub> (L)	1,2359 $\pm$ 0,0255
X <sub>2</sub> (Q)	0,4379 $\pm$ 0,0201
X <sub>3</sub> (L)	- 0,5429 $\pm$ 0,0255
X <sub>3</sub> (Q)	0,0772 $\pm$ 0,0201
X <sub>1</sub> (L)X <sub>2</sub> (L)	- 0,0683 $\pm$ 0,0360
X <sub>1</sub> (L)X <sub>3</sub> (L)	0,3263 $\pm$ 0,0360
X <sub>2</sub> (L)X <sub>3</sub> (L)	- 0,1250 $\pm$ 0,0360
Grande média	1,7945 $\pm$ 0,0104

X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> e X<sub>3</sub>: temperatura, tempo e carga, respectivamente;  
(L): linear; (Q): quadrático.

Em primeira análise, observa-se que as variáveis individuais  $X_1(L)$ ,  $X_1(Q)$ ,  $X_2(L)$ ,  $X_2(Q)$ ,  $X_3(L)$  e a interação  $X_1(L)X_3(L)$  têm significância estatística, pois seus efeitos, em módulo, são maiores quando comparados ao erro, evidenciando que estes efeitos não ocorrem simplesmente devido a erros experimentais.

#### 5.3.2.1.2. Gráfico de Pareto

A análise do gráfico de barras, ou de Pareto (Gráfico 4) indica porém que as variáveis individuais  $X_1(L)$ ,  $X_1(Q)$ ,  $X_2(L)$ ,  $X_2(Q)$ ,  $X_3(L)$ , são significantes, já que somente estas aparecem à direita da reta vertical indicativa do limite de rejeição da hipótese nula ( $p = 0,05$ ).



**Gráfico 4** – Diagrama de Pareto dos efeitos individuais e combinados para a resposta REND.

#### 5.3.4.1.3. Análise de variância (ANOVA)

Na Tabela 5.7 é apresentada a análise de variância (ANOVA), que consiste de uma análise com mais propriedade do efeito das variáveis de entrada sobre a resposta REND. Na ANOVA a estatística  $p$  indica a probabilidade que cada variável possui de não ser considerada estatisticamente significativa para a variável de resposta, ou seja, de estar dentro da região de aceitação de hipótese nula, situação na qual os efeitos são considerados apenas ruído ou erros aleatórios, ou seja,

estatisticamente não significativos. Na Tabela 5.7 verifica-se que a somatória dos efeitos lineares e quadráticos para as três variáveis individuais  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$ , estão fora da região de hipótese nula para a confiança de 95% ( $p < 0,05$ ). O que confirma que as variáveis operacionais: temperatura, tempo e carga, têm influência significativa no rendimento em óleo essencial de pataqueira secada em leito fixo. Fato observado na Tabela 5.5, onde se verificou que dentro do domínio experimental escolhido houve uma variação no rendimento em óleo de 0,50 a 3,00 %v/m.

**Tabela 5.7:** Análise de Variância para a variável de resposta REND

Efeitos	SQ	GL	Qm	F	p
A: $X_1(L+Q)$	2,0735	2	1,0368	799,2810	0,0250
B: $X_2(L+Q)$	3,6683	2	1,8341	1414,0110	0,0188
C: $X_3(L+Q)$	0,6085	2	0,3042	234,5480	0,0461
AB	0,0047	1	0,0047	3,5990	0,3088
AC	0,1065	1	0,1065	82,1050	0,0699
BC	0,0156	1	0,0156	12,0560	0,1785
Falta de Ajuste	0,1109	3	0,0370	28,4960	0,1366
Erro Puro	0,0013	1	0,0013		
Total SQ	6,2952	13			

**R<sup>2</sup>: 98,22%**

### 5.3.2.2 Efeito das variáveis de entrada na resposta XF

#### 5.3.2.2.1. Efeitos principais e das interações

Na Tabela 5.8, verifica-se, em primeira análise, que apenas os efeitos das variáveis individuais  $X_1(L)$  e  $X_2(L)$  apresentam significância estatística, pois seus efeitos comparativos aos erros são maiores, em módulo.

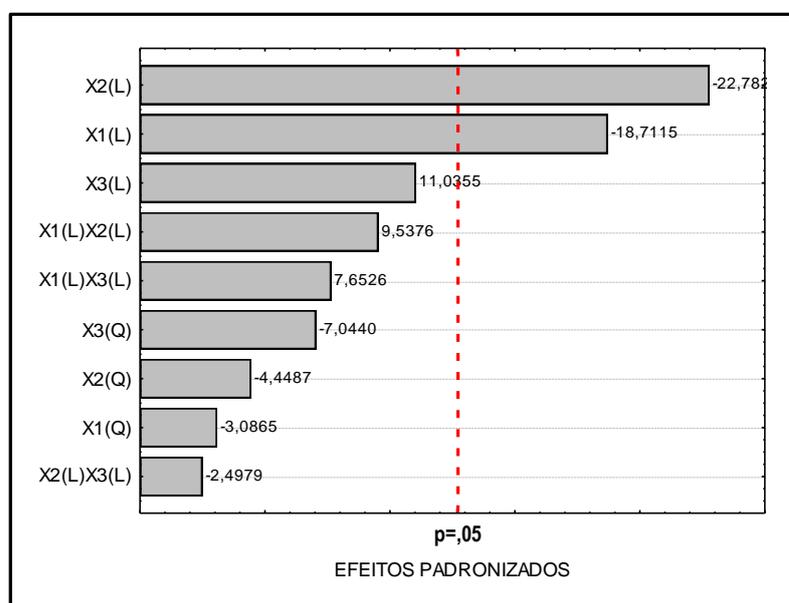
**Tabela 5.8:** Estimativa dos efeitos para a variável de resposta XF

Efeitos	Valores estimados $\pm$ erro
$X_1$ (L)	- 31,6225 $\pm$ 1,6900
$X_1$ (Q)	- 4,1237 $\pm$ 1,3361
$X_2$ (L)	- 38,5025 $\pm$ 1,6900
$X_2$ (Q)	- 5,9438 $\pm$ 1,3361
$X_3$ (L)	18,6500 $\pm$ 1,6900
$X_3$ (Q)	- 9,4113 $\pm$ 1,3361
$X_1(L)X_2(L)$	22,7950 $\pm$ 2,3900
$X_1(L)X_3(L)$	18,2900 $\pm$ 2,3900
$X_2(L)X_3(L)$	- 5,9700 $\pm$ 2,3900
Grande média	33,6858 $\pm$ 0,6899

$X_1$ ,  $X_2$ , e  $X_3$ : temperatura, tempo e carga, respectivamente;  
(L): linear; (Q): quadrática.

### 5.3.3.2.2. Gráfico de Pareto

O gráfico de Pareto (Gráfico 5) confirma a significância dos efeitos individuais de  $X_1(L)$  e  $X_2(L)$ , já que estes foram os únicos que apareceram à direita da reta vertical indicativa do limite de rejeição da hipótese nula.



**Gráfico 5** – Diagrama de Pareto dos efeitos individuais e combinados para a resposta XF

### 5.3.2.2.3. Análise de variância (ANOVA)

A análise de variância na Tabela 5.9 confirma que a variável tempo ( $X_2$ ) tem probabilidade de ser considerada estatisticamente significativa, contudo a variável temperatura ( $X_1$ ) apresentou um valor muito próximo do limite de aceitação da hipótese nula.

**Tabela 5.9:** Análise de Variância para a variável de resposta XF

Efeitos	SQ	GL	Qm	F	p
A: $X_1$ (L+Q)	2054,382	2	1027,191	179,8241	0,052657
B: $X_2$ (L+Q)	3077,935	2	1538,968	269,4177	0,043040
C: $X_3$ (L+Q)	979,074	2	489,537	85,7003	0,076161
AB	519,612	1	519,612	90,9653	0,066506
AC	334,524	1	334,524	58,5631	0,082721
BC	35,641	1	35,641	6,2394	0,242424
Falta de Ajuste	401,967	3	133,989	23,4566	0,150361
Erro Puro	5,712	1	5,712	-	-
Total SQ	7304,759	13	-	-	-

**R<sup>2</sup>: 94,42%**

### 5.3.2.3 Efeitos das variáveis de entrada na resposta MT

Não houve variáveis estatisticamente significativas para a resposta MT, como é observado na análise de variância da Tabela 5.10, onde todas as variáveis e combinações binárias apresentam valores de **p** maiores que 0,05, ou seja, a probabilidade de estarem dentro da região de aceitação de hipótese nula é grande, bem maior que o estabelecido pela confiança de 95% (probabilidades acima de 14%). Nessa situação, os efeitos são considerados apenas ruído ou erros aleatórios.

**Tabela 5.10:** Análise de variância para a variável de resposta MT

Efeitos	SQ	GL	Qm	F	p
A: $X_1(L+Q)$	642,3907	2	321,1953	23,39573	0,1446
B: $X_2(L+Q)$	55,6856	2	27,8428	2,02806	0,4447
C: $X_3(L+Q)$	58,2727	2	29,1364	2,12228	0,4367
AB	2,9241	1	2,9241	0,21299	0,7247
AC	120,6702	1	120,6702	8,78957	0,2071
BC	0,2704	1	0,2704	0,01970	0,9112
Falta de Ajuste	25,5032	3	8,5011	0,61921	0,7066
Erro Puro	13,7288	1	13,7288	-	-
Total SQ	917,8234	13	-	-	-

### 5.3.2.4 Efeitos das variáveis de entrada na resposta TI

A Tabela 5.11 apresenta todas as variáveis e combinações binárias com altas probabilidades de pertencerem a região de aceitação de hipótese nula ( $p$  acima de 25%). Ou seja, não houve variáveis estatisticamente significativas para TI.

**Tabela 5.11:** Análise de Variância para a variável de resposta TI

Efeitos	SQ	GL	Qm	F	p
A: $X_1(L+Q)$	840,168	2	420,0842	5,002146	0,3014
B: $X_2(L+Q)$	45,966	2	22,9829	0,273668	0,8039
C: $X_3(L+Q)$	187,576	2	93,7880	1,116779	0,5561
AB	18,619	1	18,6192	0,221708	0,7198
AC	451,138	1	451,1376	5,371914	0,2593
BC	5,641	1	5,6406	0,067166	0,8386
Falta de Ajuste	82,080	3	27,3601	0,325789	0,8219
Erro Puro	83,981	1	83,9808	-	-
Total SQ	1699,050	13	-	-	-

### 5.3.2.5 Proposta de um modelo polinomial de segundo grau

Na Tabela 5.12 é proposto um modelo polinomial de segundo grau completo, que melhor expressou à influência dos fatores estatisticamente significativos para a resposta REND (rendimento em óleo essencial) e XF (teor de umidade final da pataqueira secada em leito fixo).

**Tabela 5.12:** Proposta de um modelo polinomial para as respostas REND e XF.

VR	R <sup>2</sup> (%)	Equação
REND	98,22	$\text{REND} = 2,6061 - 0,2487.X_1 + 0,6179.X_2 - 0,2714.X_3 - 0,0342.X_1.X_2$ $+ 0,1632.X_1.X_3 - 0,0625.X_2.X_3 - 0,7024.X_1^2 - 0,4378.X_2^2 - 0,0772.X_3^2$
XF	94,42	$\text{XF} = 20,7 - 15,8112.X_1 - 19,2512.X_2 + 9,325.X_3 + 11,3975.X_1.X_2$ $+ 9,145.X_1.X_3 - 2,985.X_2.X_3 + 4,1237.X_1^2 + 5,9438.X_2^2 + 9,4113.X_3^2$

VR: Variáveis respostas significativas para o processo de secagem em leito fixo; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, e X<sub>3</sub>: temperatura, tempo e carga, respectivamente;

Os valores de X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> e X<sub>3</sub> estão correlacionados com as variáveis de entradas originais, como citado na literatura, e podem ser obtidos através das Equações 5.1, 5.2 e 5.3.

$$X_1 = \frac{T - 70}{10} \quad (5.1)$$

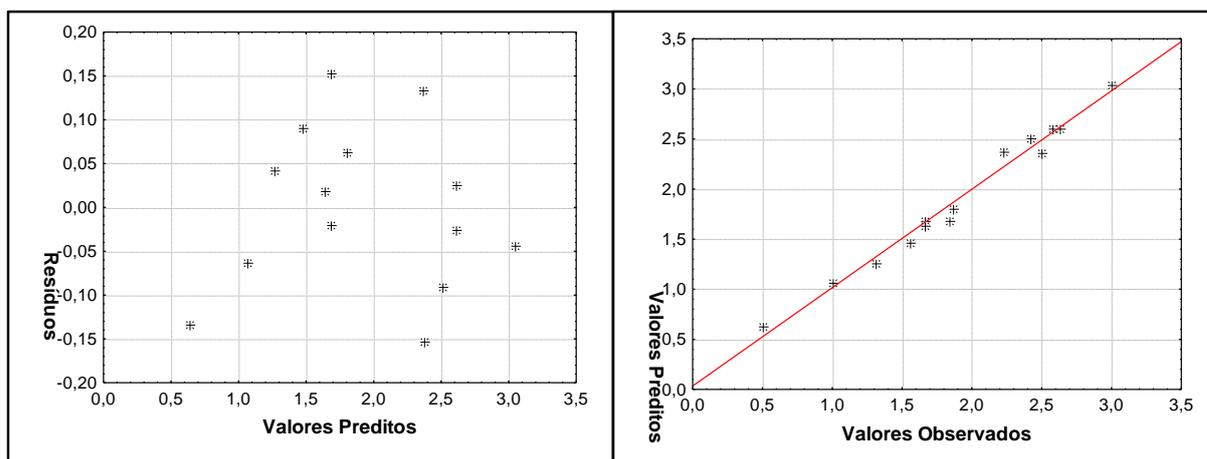
$$X_2 = \frac{t - 90}{30} \quad (5.2)$$

$$X_3 = \frac{C - 300}{100} \quad (5.3)$$

#### 5.3.2.5.1. Qualidade dos modelos propostos

O modelo proposto para a resposta REND, apresentou um coeficiente de determinação de 98,22%, indicando que o modelo proposto é capaz de reproduzir ou explicar 98,22% das variabilidades experimentais, como é verificado na Tabela 5.13, através da comparação dos valores observados com os valores preditos pelo

modelo, gerando baixos resíduos, cuja distribuição em função dos valores preditos pode ser observada na parte esquerda do Gráfico 6. Observa-se que a distribuição é aleatória, e que os componentes de erro do modelo proposto seguem uma distribuição aproximadamente normal para a resposta REND, já que os pontos se encontram muito próximos e ao longo de uma reta (parte direita do gráfico).



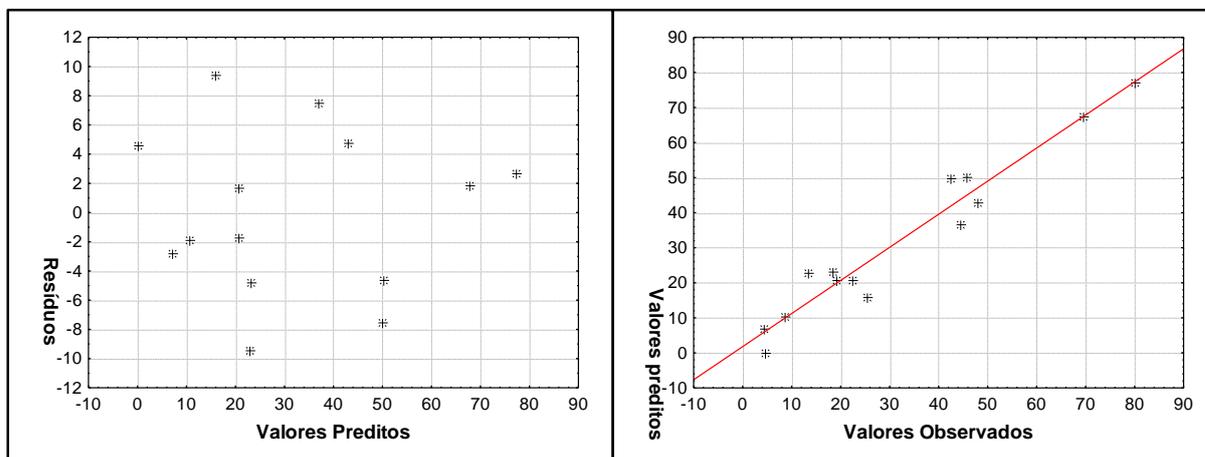
**Gráfico 6** – Gráfico de distribuição e gráfico de probabilidade normal dos resíduos para REND

**Tabela 5.13:** Matriz de Box-Behnken com os valores experimentais e preditos pelo modelo polinomial de segundo grau proposto para a resposta REND.

Variáveis de processo codificadas			Variáveis de Resposta		Resíduos
X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Observadas	Preditas	
- 1	- 1	0	1,00	1,0624	- 0,0624
+1	- 1	0	0,50	0,6334	- 0,1334
- 1	+1	0	2,50	2,3666	+ 0,1334
+1	+1	0	1,86	1,8009	+ 0,0624
- 1	0	- 1	2,42	2,5098	- 0,0904
+1	0	- 1	1,67	1,6861	- 0,0194
- 1	0	+1	1,66	1,6406	+ 0,0194
+1	0	+1	1,56	1,4696	+ 0,0904
0	- 1	- 1	1,83	1,6820	+ 0,1528
0	+1	- 1	3,00	3,0430	- 0,0430
0	- 1	+1	1,31	1,2642	+ 0,0430
0	+1	+1	2,22	2,3750	- 0,1528
0	0	0	2,58	2,6061	- 0,0255
0	0	0	2,63	2,6061	+ 0,0255

X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> e X<sub>3</sub>: temperatura, tempo e carga, respectivamente;

O modelo proposto para a resposta XF apresentou um coeficiente de determinação de 94,42% indicando que o modelo proposto é capaz de explicar 94,42% das variabilidades experimentais. No Gráfico 7 e na Tabela 5.14 é comprovada a qualidade deste modelo.



**Gráfico 7** – Gráfico de distribuição e gráfico de probabilidade normal dos resíduos para XF

**Tabela 5.14:** Matriz de Box-Behnken com os valores experimentais e preditos pelo modelo polinomial de segundo grau proposto para a resposta XF.

Variáveis de processo codificadas			Variáveis de Resposta		Resíduos
X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Observadas	Preditas	
- 1	- 1	0	79,97	77,2275	+ 2,7425
+ 1	- 1	0	13,39	22,8100	- 9,4200
- 1	+ 1	0	25,35	15,9300	+ 9,4200
+ 1	+ 1	0	4,36	7,1025	- 2,7425
- 1	0	- 1	42,33	49,8662	- 7,5362
+ 1	0	- 1	4,58	- 0,0462	+ 4,6263
- 1	0	+ 1	45,60	50,2262	- 4,6262
+ 1	0	+ 1	44,43	36,8937	+ 7,5362
0	- 1	- 1	47,79	42,9962	+ 4,7937
0	+ 1	- 1	8,58	10,4637	- 1,8837
0	- 1	+ 1	69,50	67,6162	+ 1,8837
0	+ 1	+ 1	18,35	23,1437	- 4,7937
0	0	0	19,01	20,7000	- 1,6900
0	0	0	22,39	20,7000	+ 1,6900

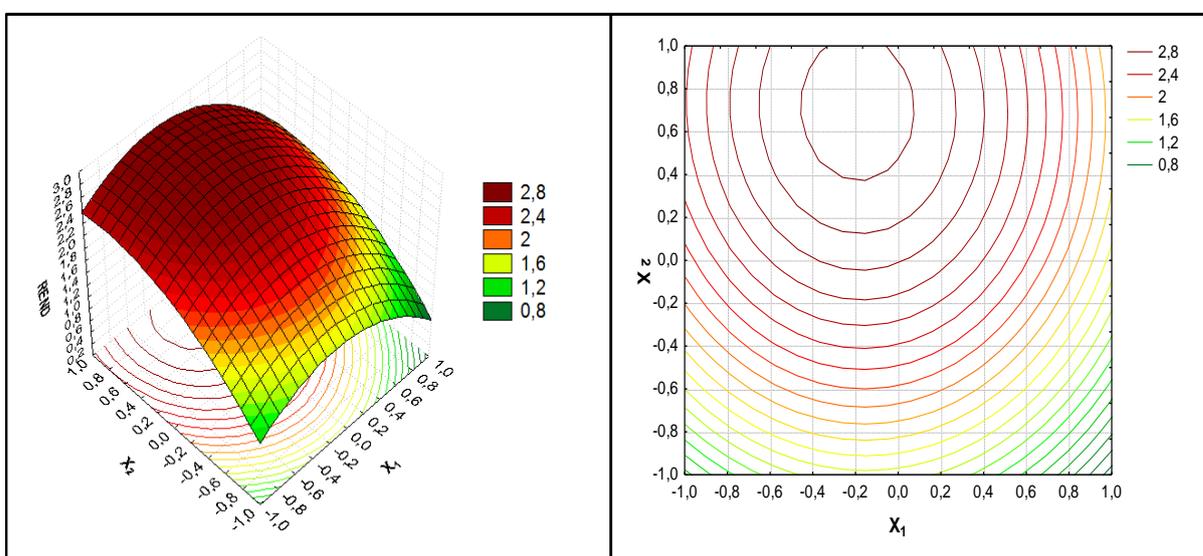
X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> e X<sub>3</sub>: temperatura, tempo e carga, respectivamente;

Verifica-se na Tabela 5.14, através da comparação dos valores observados com os valores preditos pelo modelo, gerando resíduos moderadamente baixos, cuja distribuição em função dos valores preditos pode ser observada na parte esquerda do Gráfico 7. Observa-se que a distribuição é aleatória, e que os componentes de erro do modelo proposto seguem uma distribuição aproximadamente normal para a resposta REND, já que os pontos se encontram próximos e ao longo de uma reta (parte direita do gráfico).

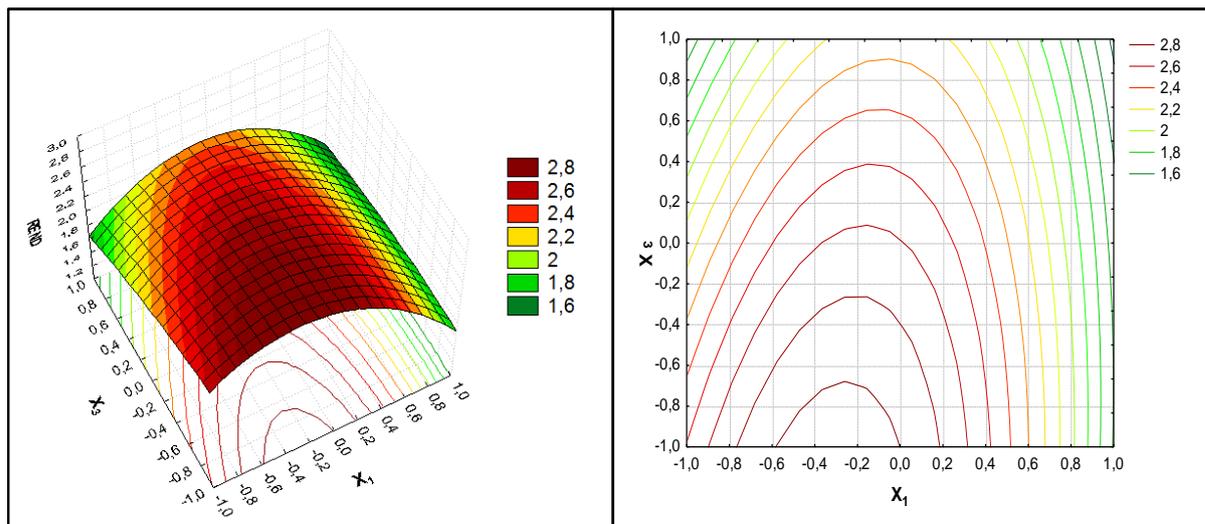
### 5.3.2.6. Análise da superfície resposta e contornos

#### 5.3.2.6.1 Resposta REND

Nos Gráficos 8 e 9 a seguir são apresentadas a superfície resposta e as correspondentes curvas de nível ou contornos em função das variáveis codificadas, que foram geradas a partir do modelo de segunda ordem proposto, sendo que o Gráfico 8 corresponde à superfície formada pela interação das variáveis  $X_1$  e  $X_2$  com a variável  $X_3 = 0$ , e o Gráfico 9 à superfície formada pela interação das variáveis  $X_1$  e  $X_3$  com a variável  $X_2 = 0$ .



**Gráfico 8** – Superfície de resposta (Gráfico 3D) e curvas de nível ( $X_3 = 0$ ) para a resposta REND



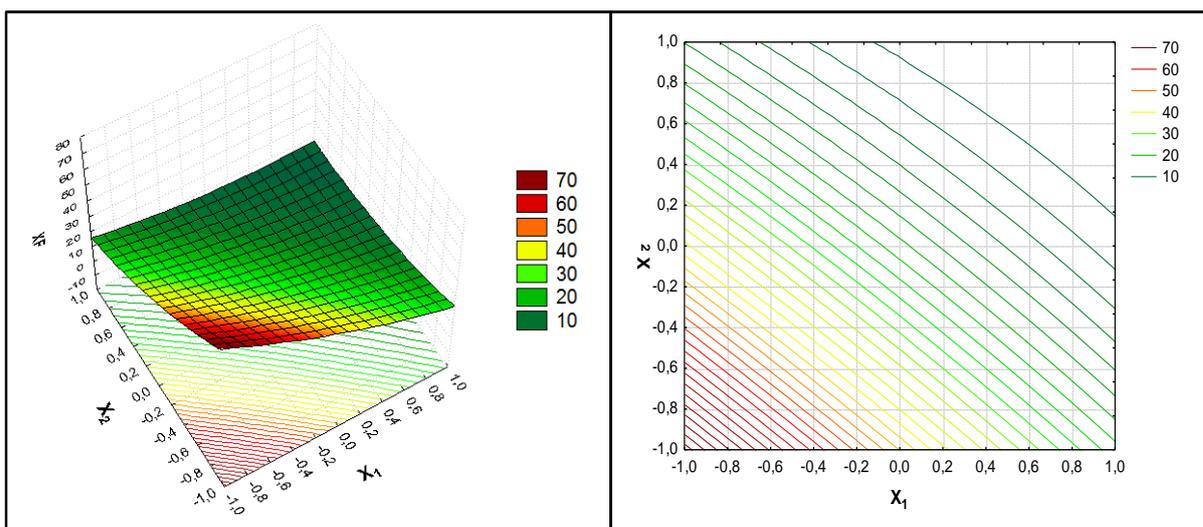
**Gráfico 10** – Superfície de resposta (Gráfico 3D) e curvas de níveis ( $X_2 = 0$ ) para a resposta REND

Nos Gráficos 9 e 10 têm-se uma melhor visualização do ponto ótimo de operação para o rendimento em óleo essencial de pataqueira (REND). Nestes gráficos pode ser observado que o maior rendimento em óleo essencial de pataqueira secada em leito fixo foi obtido quando as variáveis de entrada temperatura, tempo e carga se encontravam nas condições codificadas:  $X_1 = -1$ ,  $X_2 = +1$  e  $X_3 = -1$ , que correspondem a temperatura de 60°C, tempo de 120 minutos e carga de 200 g.

No Gráfico 9, é observado que em um tempo de secagem de 120 minutos há bons rendimento independente do valor da temperatura, contudo, em temperaturas menores o rendimento é maior. No Gráfico 10, verifica-se que, ao aumentar a temperatura e a carga há uma diminuição no rendimento em óleo essencial, e se a carga for mantida em 200 g pode ser obtido bons rendimentos utilizando as menores temperaturas.

#### 5.3.2.6.2 Resposta XF

No Gráfico 10 consta a superfície resposta e as correspondentes curvas de nível em função das variáveis codificadas  $X_1$  e  $X_2$ . Este foi construído a partir do modelo de segunda ordem obtido para a resposta XF, com a variável  $X_3$  mantida no ponto estacionário.



**Gráfico 10** – Superfície de resposta (Gráfico 3D) e curvas de nível ( $X_3 = 0$ ) para a resposta XF

No Gráfico 10, pode ser observado que mantendo a temperatura ( $X_1$ ) e tempo ( $X_2$ ) nas condições mínimas a umidade final do material é alta, portanto indesejável, e com o aumento do tempo de secagem para 120 minutos ( $X_2 = +1$ ) é obtido um material seco com teores de umidade desejáveis, independente da temperatura de secagem escolhida.

### 5.3.2.7. Otimização via função desejabilidade global

Para a análise de desejabilidade global foi utilizado o software Statistica® 7.0, utilizando uma grade de 30 pontos para cada uma das 3 variáveis independentes, ou seja, os valores das respostas e respectivas desejabilidades foram calculadas em  $30^3$  combinações de níveis para os fatores.

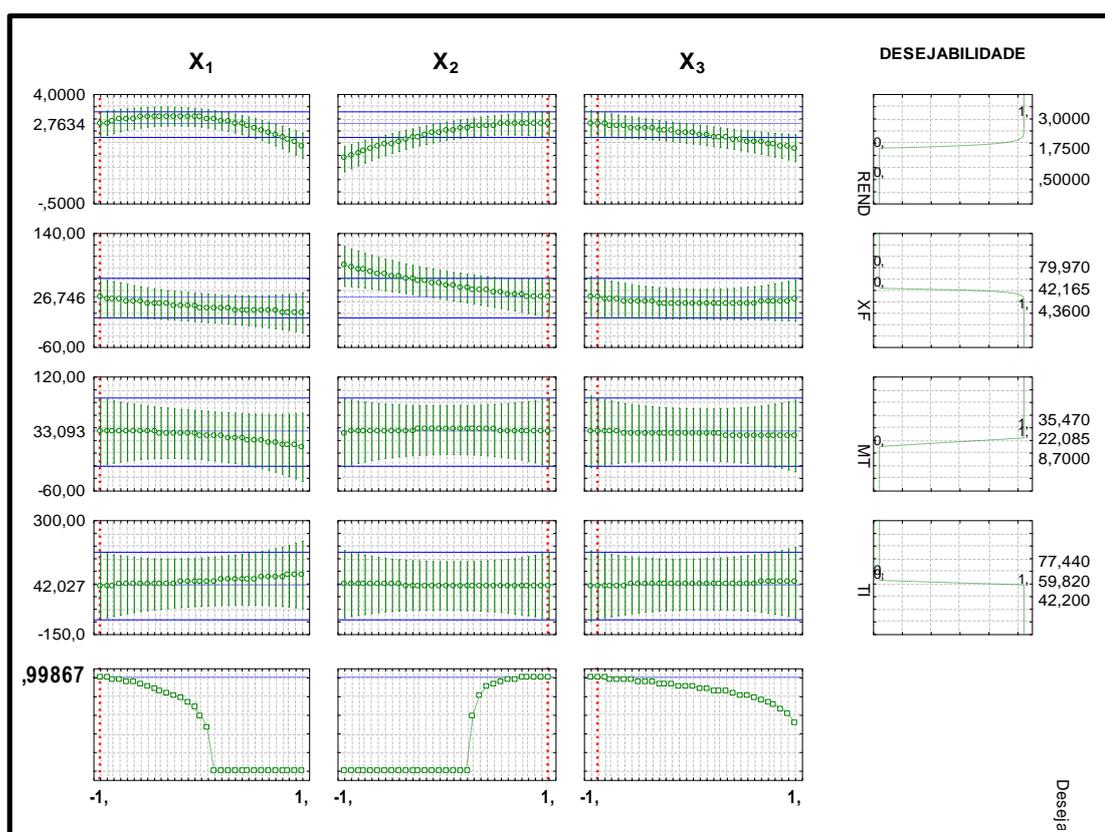
Na Tabela 5.15 pode ser observada as condições atribuídas na otimização, em que as variáveis de entradas proporcionaram os melhores resultados, ou seja, maior rendimento em óleo essencial, com o menor teor de umidade e as concentrações de MT e TI próximo as das composições química apresentada na Tabela 5.4, onde os valores dos expoentes **s** e **t** foram igualados a 10 para as respostas REND e XF, e foram igualados a 1 para as respostas MT e TI.

**Tabela 5.15:** Valores atribuídos na otimização via função desejabilidade.

Valor atribuído na otimização	Condições para as respostas			
	REND (%v/m)	XF (%b.u.)	MT (%)	TI (%)
Baixos	0,50 <b>(0)</b>	79,97 <b>(0)</b>	8,70 <b>(0)</b>	77,40 <b>(0)</b>
Médios	1,75 <b>(0)</b>	42,17 <b>(0)</b>	22,08 <b>(1)</b>	59,82 <b>(0)</b>
Altos	3,00 <b>(1)</b>	4,37 <b>(1)</b>	35,47 <b>(1)</b>	42,02 <b>(1)</b>

**(0):** corresponde aos valores considerados inaceitáveis; **(1):** corresponde aos valores considerados desejáveis

No Gráfico 11 é ilustrado a função desejabilidade global para a otimização dessas respostas. Neste pode ser verificado que a função desejabilidade atende de forma satisfatória as características estabelecidas, pois apresenta um resultado de desejabilidade global (D) igual a 0,99867; um valor considerado aceitável e excelente (AKHNAZAROVA e KAFAROV, 1982), ou seja, a função conseguiu especificar níveis para cada um dos valores de entrada, possibilitando a maximização da secagem de pataqueira em leito fixo.



**Gráfico 11 –** Gráficos da função desejabilidade para as variáveis de respostas REND, XF, MT e TI

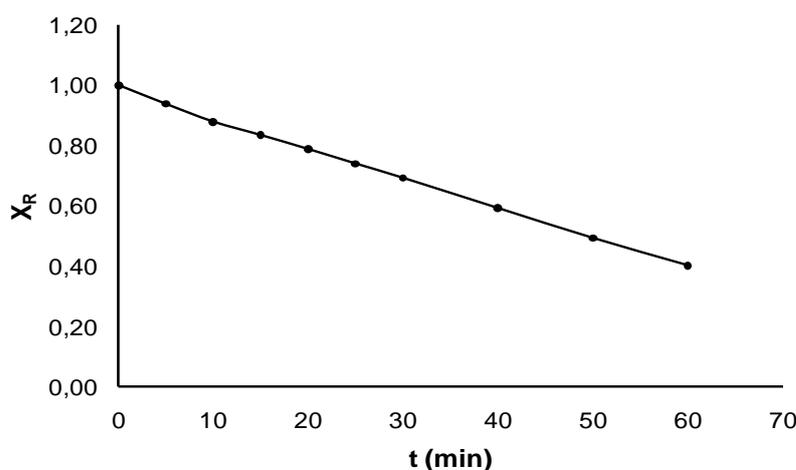
No Gráfico 11 são apresentadas as condições ótimas na forma codificada que representam os seguintes valores reais: temperatura de secagem de 60 °C, tempo de secagem de 120 minutos e carga de 200 g de pataqueira, confirmando os valores observados na análise prévia de superfícies resposta e curvas de nível.

### 5.3.3 Cinética de secagem

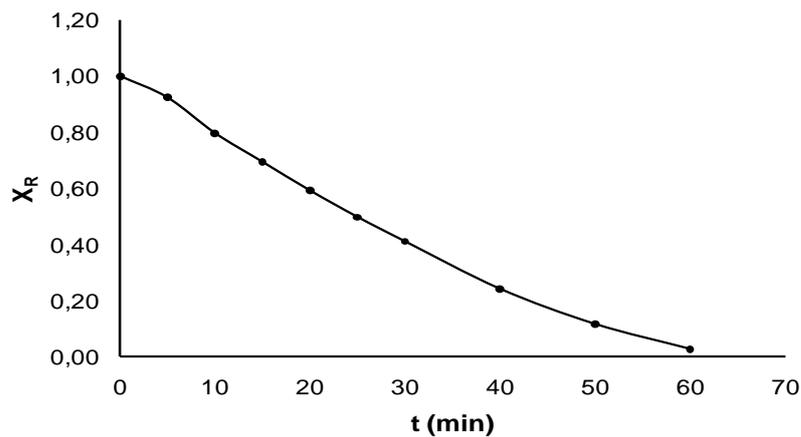
A análise da cinética de secagem de pataqueira em secador convectivo de leito fixo foi conduzida da seguinte forma: primeiramente foi realizada a construção das curvas de secagem para cada corrida experimental, cujos dados estão apresentados no Apêndice A. Em seguida as curvas de secagem foram ajustadas aos modelos cinéticos apresentados na Tabela 4.6, para então, a partir destas, serem obtidas as curvas de taxa de secagem, por meio da derivação do modelo cinético considerado mais adequado. Estes ajustes constam no Apêndice B.

#### 5.3.3.1. Curvas de secagem

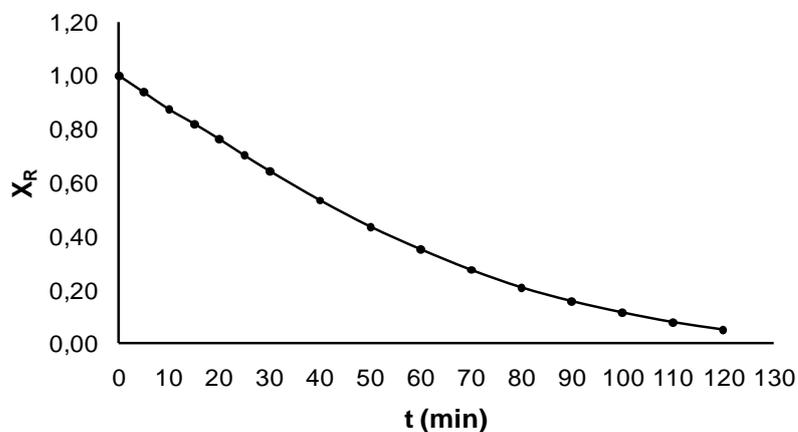
Foram construídas curvas de secagem para cada uma das 14 corridas experimentais (Gráficos 12 a 26), pondo em gráfico os valores do teor de umidade adimensional ( $X_R$ ) em função do tempo.



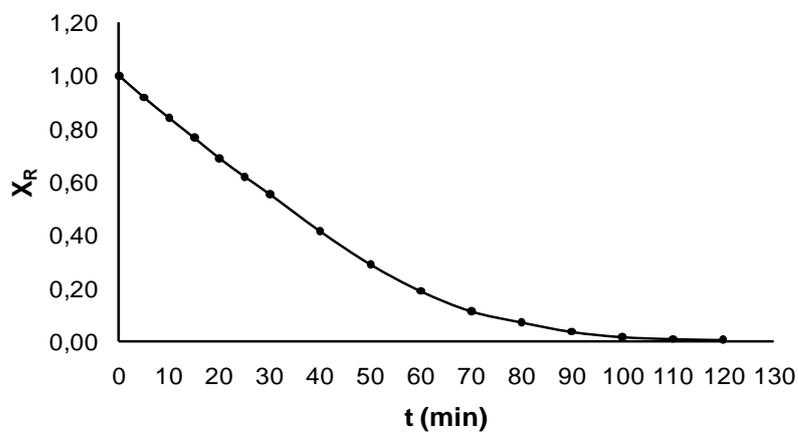
**Gráfico 12** – Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 1 (60 °C, 60 min, 300 g).



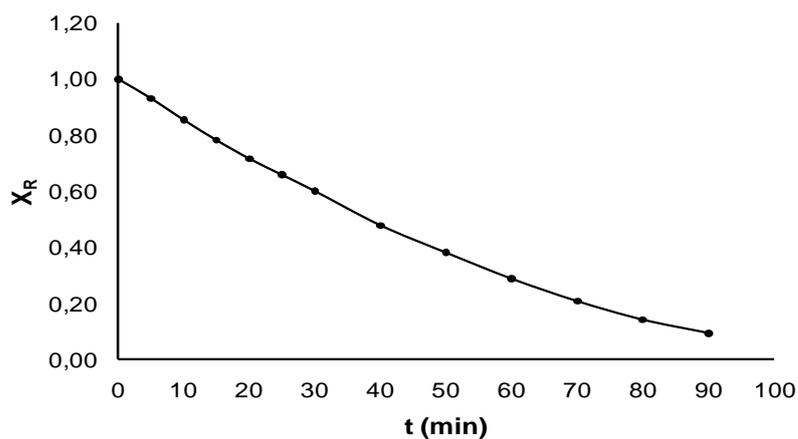
**Gráfico 13** – Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 2 (80 °C, 60 min, 300 g).



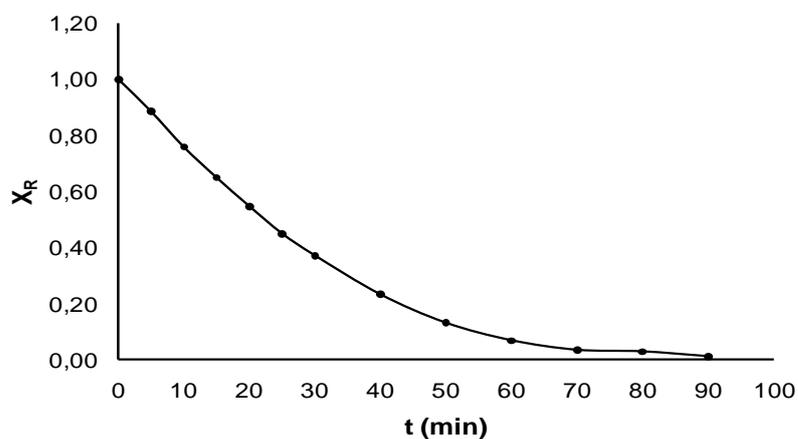
**Gráfico 14** – Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 3 (60 °C, 120 min, 300 g).



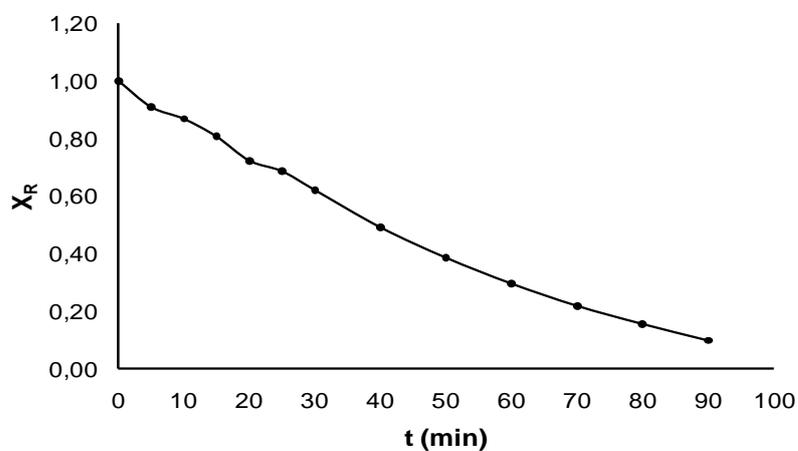
**Gráfico 15** – Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 4 (80 °C, 120 min, 300 g).



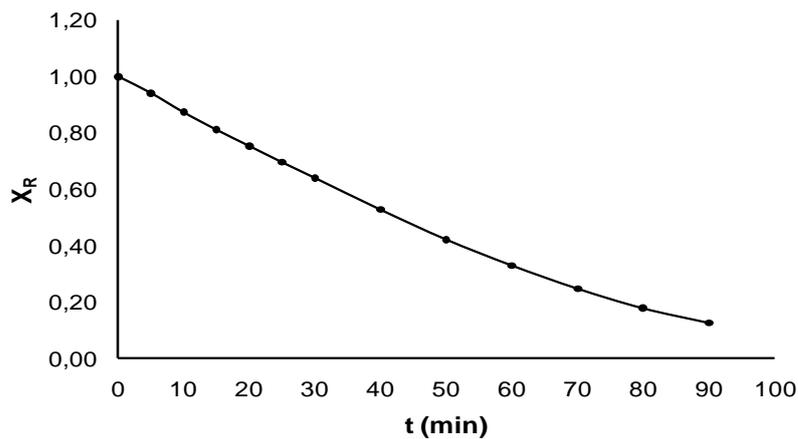
**Gráfico 16** – Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 5 (60 °C, 90 min, 200 g).



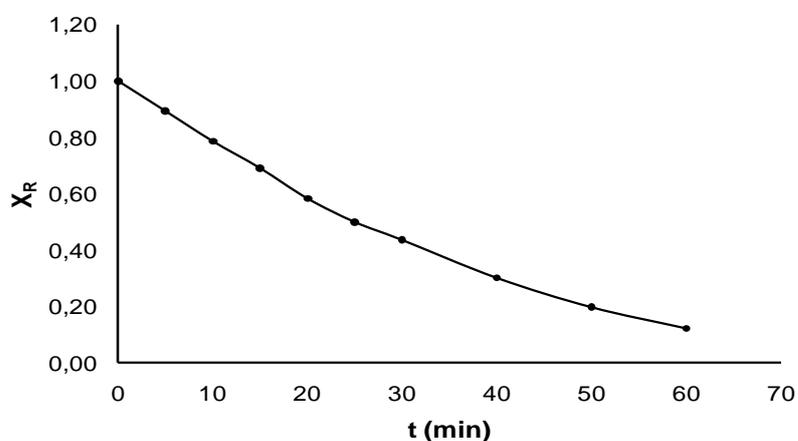
**Gráfico 17** – Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 6 (80 °C, 90 min, 200 g).



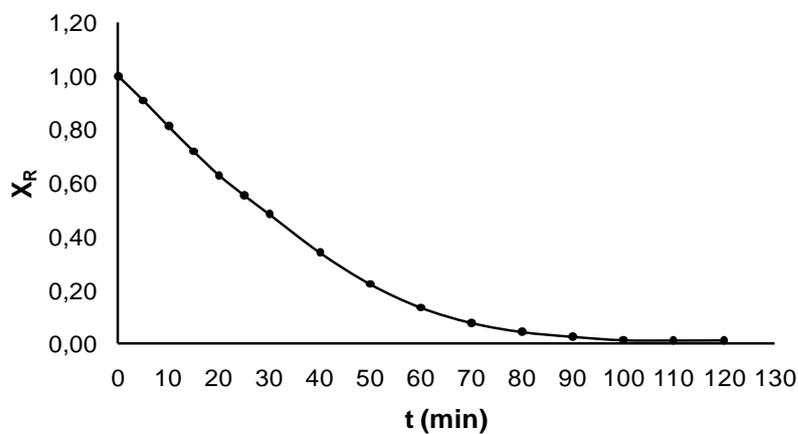
**Gráfico 18** – Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 7 (60 °C, 90 min, 400 g).



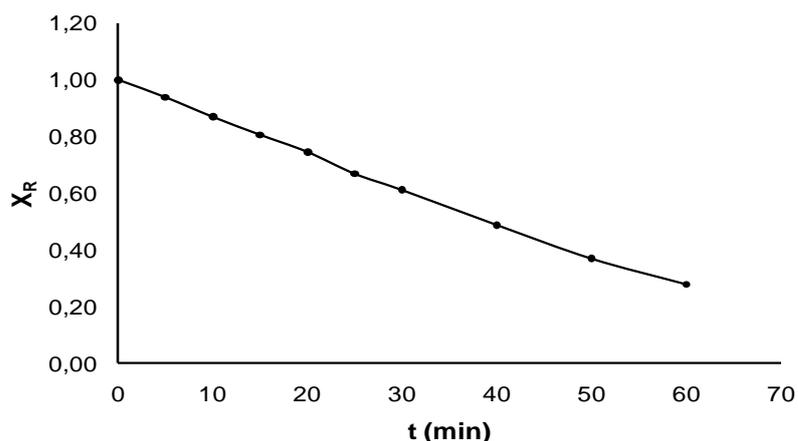
**Gráfico 19** – Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 8 (80 °C, 90 min, 400 g).



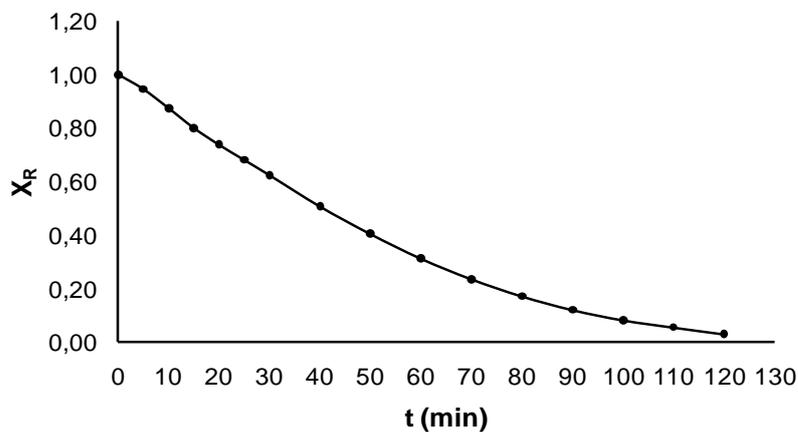
**Gráfico 20** – Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 9 (70 °C, 60 min, 200 g).



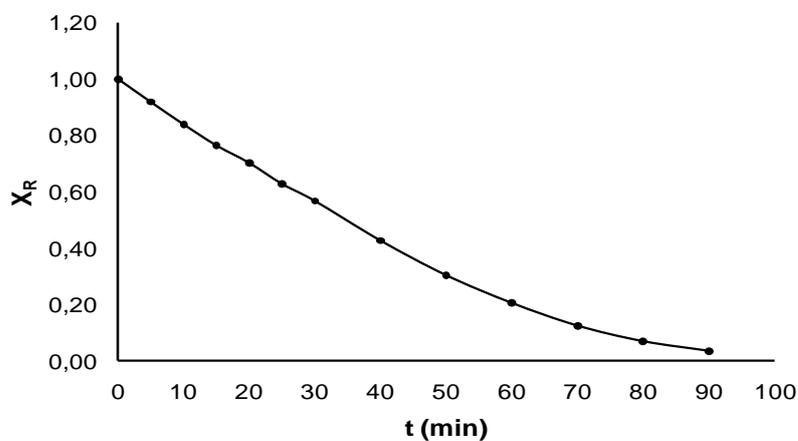
**Gráfico 21** – Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 10 (70 °C, 120 min, 200 g).



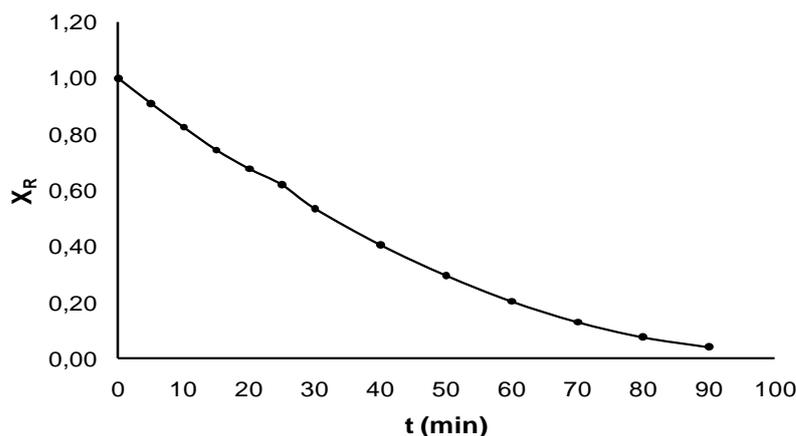
**Gráfico 22** – Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 11 (70 °C, 60 min, 400 g).



**Gráfico 23** – Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 12 (70 °C, 120 min, 400 g).



**Gráfico 24** – Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 13 (70 °C, 90 min, 300 g).



**Gráfico 25** – Curva de secagem dos dados experimentais da Corrida 14 (70 °C, 90 min, 300 g).

### 5.3.3.2. Ajuste da curva de secagem aos modelos cinéticos

Com base em estatísticas apropriadas o modelo logarítmico foi o que melhor representou o comportamento da secagem convectiva da pataqueira em leito fixo e na Tabela 5.16 constam as estatísticas obtidas para a escolha desse modelo.

**Tabela 5.16:** Ajustes dos pontos experimentais ao modelo logarítmico

Corridas*	R <sup>2</sup>	Gráfico 2D	Resíduos			Avaliação
			Distribuição	Faixa		
01	-	-	-	-	-	-
02	0,9999	PTP	Aleatória	- 0,0008	+ 0,0007	Adequado
03	0,9996	PMP	Aleatória	- 0,0051	+ 0,0047	Adequado
04	0,9987	PMP	Aleatória	- 0,0046	+ 0,0048	Adequado
05	0,9998	PMP	Aleatória	- 0,0014	+ 0,0013	Adequado
06	0,9972	TMP	Aleatória	- 0,0107	+ 0,0096	Adequado
07	0,9999	PMP	Aleatória	- 0,0017	+ 0,0015	Adequado
08	0,9997	PMP	Aleatória	- 0,0041	+ 0,0041	Adequado
09	0,9999	PTP	Aleatória	- 0,00004	+ 0,00002	Adequado
10	0,9983	TMP	Aleatória	- 0,0043	+ 0,0047	Adequado
11	-	-	-	--	-	-
12	0,9998	PMP	Aleatória	- 0,0015	+ 0,0019	Adequado
13	0,9999	PMP	Aleatória	- 0,0009	+ 0,0007	Adequado
14	0,9997	PMP	Aleatória	- 0,0023	+ 0,0021	Adequado

\*Nas corridas 1 e 11, todos os pontos experimentais se ajustam ao modelo linear.

Na Tabela 5.17 são apresentados os coeficientes de determinação e os parâmetros obtidos a partir do ajustes das curvas de secagem ao modelo linear, e ao modelo logarítmico.

**Tabela 5.17:** Ajuste do conteúdo de umidade das plantas de pataqueira com o tempo, para os períodos à taxa de secagem constante e decrescente, utilizando as equações da reta e logarítmica, para a segunda fase dos experimentos.

Corridas	Modelo Linear $X_R = a - bt$			Modelo Logarítmico $X_R = a.exp(-kt)+b$			
	a	b	R <sup>2</sup> (%)	a	b	k	R <sup>2</sup> (%)
01	0,9866	0,0098	99,8999	-	-	-	-
02	1,0048	0,0202	99,7433	1,6227	- 0,2155	0,0318	99,9986
03	0,9966	0,0118	99,9571	1,2744	- 0,1401	0,0161	99,9653
04	0,9842	0,0142	99,8188	2,6560	- 0,0133	0,0433	99,8706
05	0,9728	0,0119	99,3373	1,6496	- 0,0826	0,0249	99,9820
06	0,9916	0,0222	99,7810	1,4750	- 0,0211	0,0450	99,7188
07	0,9869	0,0124	99,2075	1,3560	- 0,1986	0,0169	99,9964
08	0,9974	0,0121	99,9015	1,4027	- 0,2862	0,0137	99,9682
09	0,9700	0,0177	98,8185	1,3806	- 0,0730	0,0327	99,9999
10	0,9695	0,0157	99,1851	3,3714	- 0,0031	0,0546	99,8291
11	0,9904	0,0123	99,7435	-	-	-	-
12	0,9852	0,0116	99,5672	1,5936	- 0,0549	0,0244	99,9815
13	0,9750	0,0133	99,6245	2,8914	- 0,0352	0,0415	99,9911
14	0,9722	0,0141	99,4371	1,6483	- 0,0733	0,0299	99,9692

### 5.3.3.3. Curvas de taxa de secagem

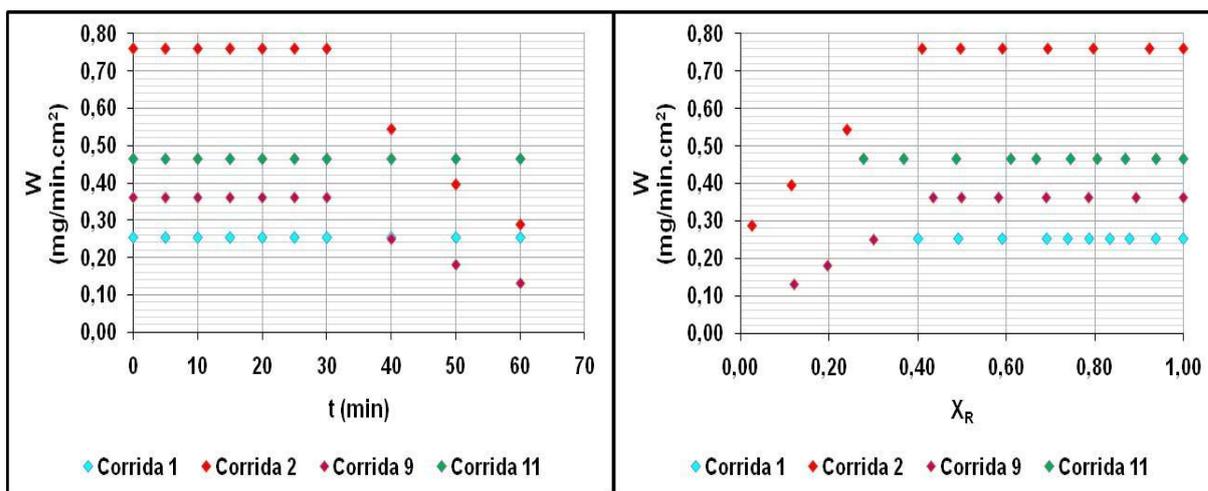
Para a obtenção das curvas de taxa de secagem (W), o modelo linear e o logarítmico foram derivados, obtendo-se as Equação 5.4 e 5.5, com as quais foram realizados os cálculos de W.

$$W_L = \frac{m_{ss}}{A} \cdot [b] \quad (5.4)$$

$$W_{NL} = \frac{m_{ss}}{A} \cdot [a.k.exp(-k.t)] \quad (5.5)$$

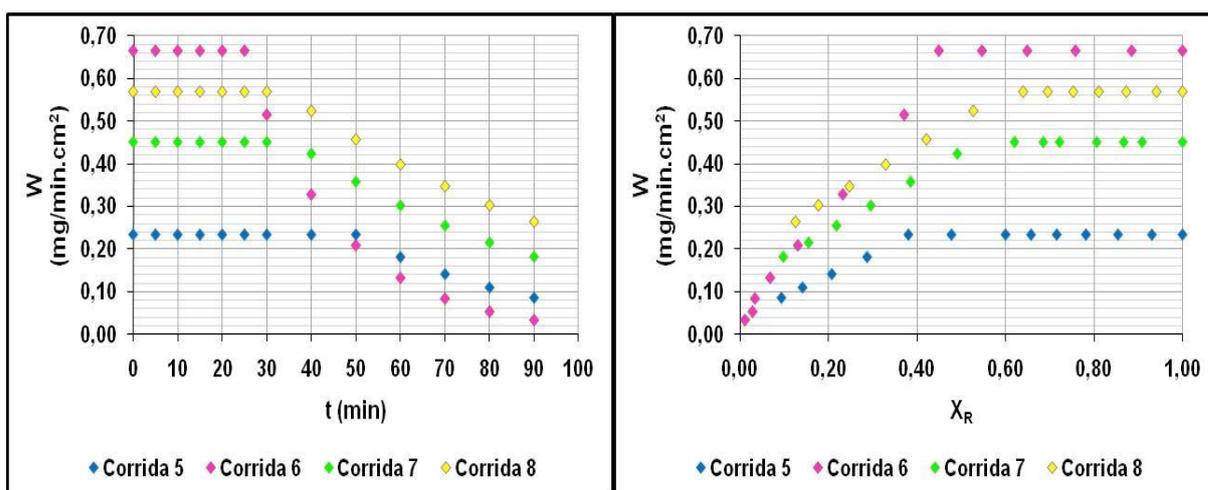
em que  $W_L$  representa a taxa de secagem calculada para os pontos lineares e  $W_{NL}$  para os pontos não lineares (modelo logarítmico),  $m_{ss}$  é a massa de sólido seco,  $A$  é a área submetida à secagem,  $t$  o tempo de secagem em minutos e  $a$ ,  $b$  e  $k$  os parâmetros dos modelos, que podem ser observados na Tabela 5.15.

Então foram construídos gráficos múltiplos das taxas de secagem em função do tempo de secagem e do teor de umidade adimensional (Gráficos 26 a 29), esses gráficos foram montados para as corridas experimentais com um mesmo tempo de secagem.



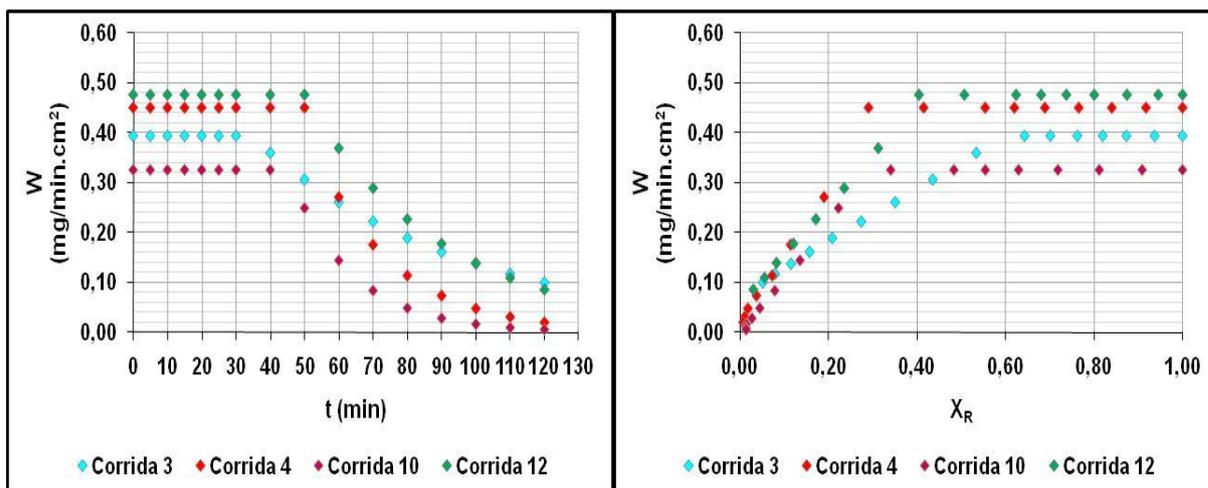
**Gráfico 26** – Curvas de taxa de secagem para as corridas com  $t = 60$  min.

**Corrida 1:**  $T = 60^\circ\text{C}$  e  $C = 300\text{g}$ ; **Corrida 2:**  $T = 80^\circ\text{C}$  e  $C = 300\text{g}$ , **Corrida 9:**  $T = 70^\circ\text{C}$  e  $C = 200\text{g}$ ,  
**Corrida 11:**  $T = 70^\circ\text{C}$  e  $C = 300\text{g}$



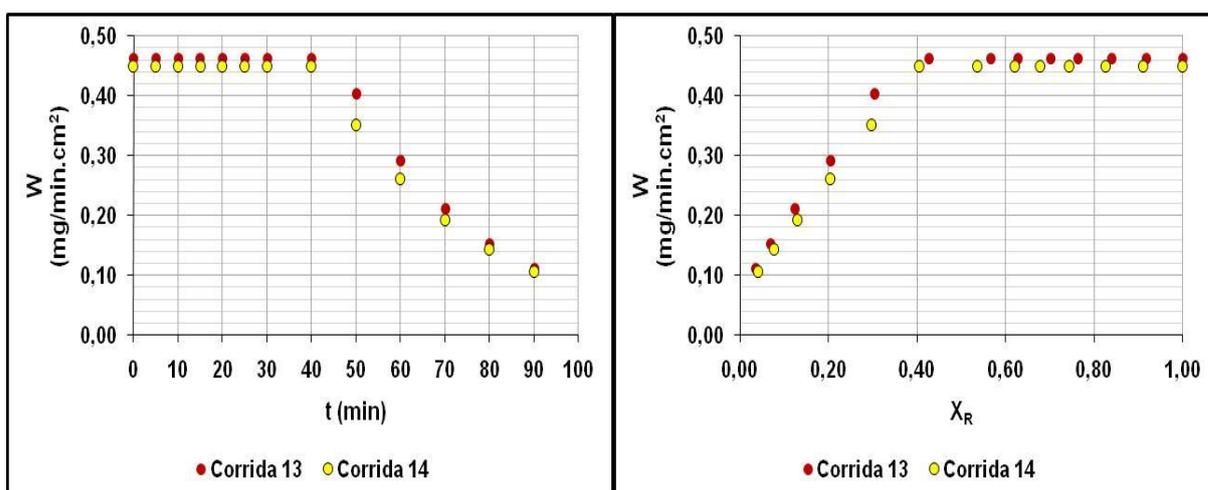
**Gráfico 27** – Curvas de taxa de secagem para as corridas com  $t = 90$  min.

**Corrida 5:**  $T = 60^\circ\text{C}$  e  $C = 200\text{g}$ ; **Corrida 6:**  $T = 80^\circ\text{C}$  e  $C = 200\text{g}$ , **Corrida 7:**  $T = 60^\circ\text{C}$  e  $C = 400\text{g}$ ,  
**Corrida 8:**  $T = 80^\circ\text{C}$  e  $C = 400\text{g}$



**Gráfico 28** – Curvas de taxa de secagem para as corridas com  $t = 120$  min.

**Corrida 3:**  $T = 60^{\circ}\text{C}$  e  $C = 300\text{g}$ ; **Corrida 4:**  $T = 80^{\circ}\text{C}$  e  $C = 300\text{g}$ , **Corrida 10:**  $T = 70^{\circ}\text{C}$  e  $C = 200\text{g}$ ,  
**Corrida 12:**  $T = 70^{\circ}\text{C}$  e  $C = 300\text{g}$



**Gráfico 29** – Curvas de taxa de secagem para o ponto central.

**Corrida 13 = Corrida 14:**  $T = 70^{\circ}\text{C}$ ;  $t = 90$  min e  $C = 300\text{g}$

Nos Gráficos 26 e 28, é observado que para os tempos de secagem de 60 e 120 minutos, respectivamente, o aumento de carga de 200 g para 300 g aumenta a velocidade da secagem. O aumento de temperatura, também ocasiona aumento na velocidade da secagem.

No Gráfico 27, é observado que em um tempo de 90 minutos a uma temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$ , o aumento de massa de 200 g para a 400 g gera aumento na velocidade da secagem, enquanto que com esse mesmo tempo de secagem com temperatura de  $80^{\circ}\text{C}$  ocorre diminuição na velocidade de secagem. E que para

cargas constantes (200 g e 400 g), o aumento da temperatura de 60 para 80 °C gera aumento da velocidade da secagem.

Portanto, verifica-se que para uma mesma temperatura, exceto á 80°C, a velocidade de secagem é diretamente proporcional á carga. E para uma mesma carga, a velocidade de secagem é diretamente proporcional a temperatura.

No Gráfico 29, constam as curvas de taxa de secagem obtidas no ponto central, as quais apresentaram comportamento esperado, ou seja, similares, já que foram obtidas nas mesmas condições operacionais. Observa-se que as curvas possuem velocidades de secagem quase sobrepostas até o tempo de secagem de 40 minutos com teores de umidade superiores a 0,4.

#### **5.4. Secagem Convectiva de Pataqueira Hidropônica em Leito Fixo**

Foram realizadas cinco corridas experimentais aleatórias do planejamento de Box-Behnken, com amostras de pataqueira proveniente da horta hidropônica (PH), com a finalidade de comparar o comportamento da amostra PH com o da amostra PN, durante o processo de secagem em leito fixo. Os dados obtidos durante os experimentos podem ser observados no Apêndice C.

As amostras PH foram utilizadas *in natura*, ou seja, sem as etapas de armazenamento e preparo da amostra citadas no Fluxograma 1. As corridas experimentais escolhidas, com as suas variáveis de entrada originais e as variáveis de resposta, constam na Tabela 5.18. É válido ressaltar que foram apresentadas apenas as variáveis respostas REND e XF, já que as variáveis de processo escolhidas não apresentaram efeitos estatisticamente significativos nas respostas TI e MT.

**Tabela 5.18:** Experimentos de secagem adicionais com amostras PH

Corridas	Variáveis Codificadas			Variáveis Originais			Variáveis Respostas	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	T (°C)	t (min)	C (g)	REND (%)	XF (%)
01	-1	-1	0	60	60	300	1,07	68,59
02	+1	-1	0	80	60	300	0,50	60,54
04	+1	+1	0	80	120	300	0,48	5,29
09	0	-1	-1	70	60	200	1,13	61,26
14	0	0	0	70	90	300	1,41	72,48

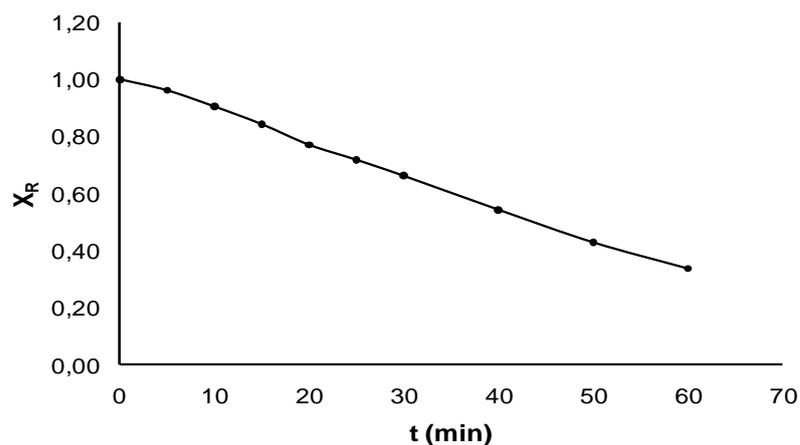
T = X<sub>1</sub> = Temperatura; t = X<sub>2</sub> = tempo; C = X<sub>3</sub> = carga, REND: rendimento em óleo essencial; XF: teor de umidade final da amostra seca em leito fixo, em base úmida.

Nesses ensaios adicionais, o rendimento em óleo essencial variou de 0,48 a 1,43 % (v/m). Verifica-se que os rendimentos obtidos foram menores do que os obtidos com a amostra natural (PN) secada nas mesmas condições, não obstante o teor de umidade final foi muito maior, o que provavelmente provocou a diminuição dos rendimentos em óleo essencial.

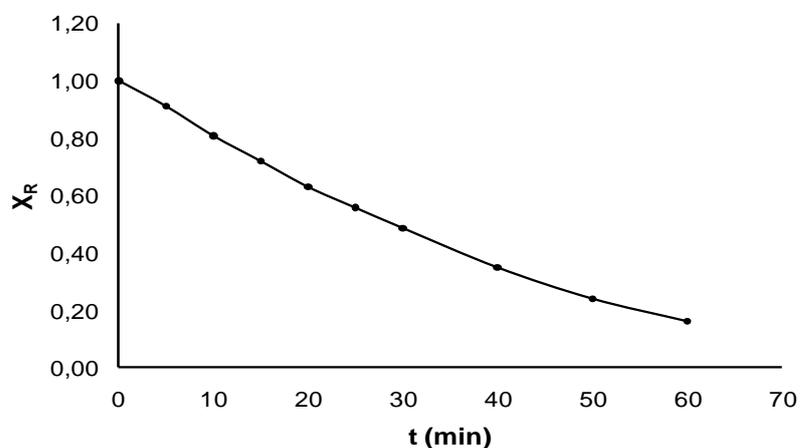
É provável que os maiores teores de umidade final das amostras PH seja devido ao fato da amostra estar *in natura*, ou seja, a secagem ocorreu logo após a coleta. No caso da amostra PN, a secagem foi efetuada após armazenamento em freezer, o que pode ter causado danos ao material, como fissuras, que pode ter contribuído para aumentar a velocidade e eficiência da secagem significativamente, facilitando a migração da umidade por caminhos preferenciais, minimizando a resistência da passagem da água do interior da planta.

#### 5.4.1 Análise da cinética de secagem

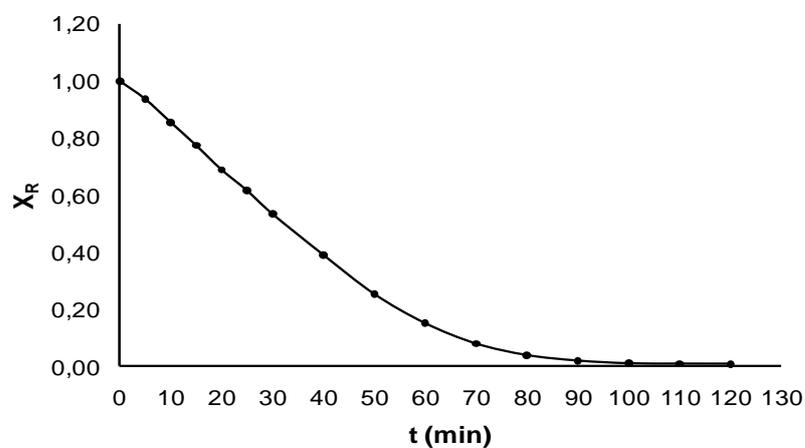
As curvas de secagem obtidas a partir das repetições das corridas 1, 2, 4, 9 e 14, com a utilização da amostra de pataqueira hidropônica (PH), podem ser observadas a seguir nos Gráficos 30 a 34.



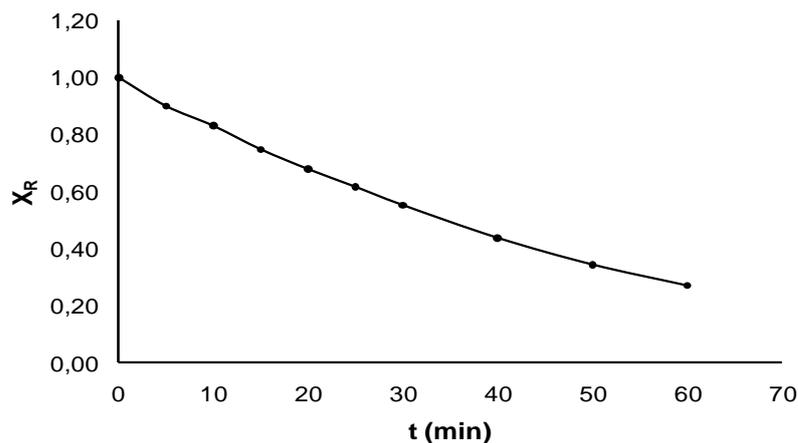
**Gráfico 30** – Curva de secagem dos dados experimentais da repetição da Corrida 1 com a amostra hidropônica.



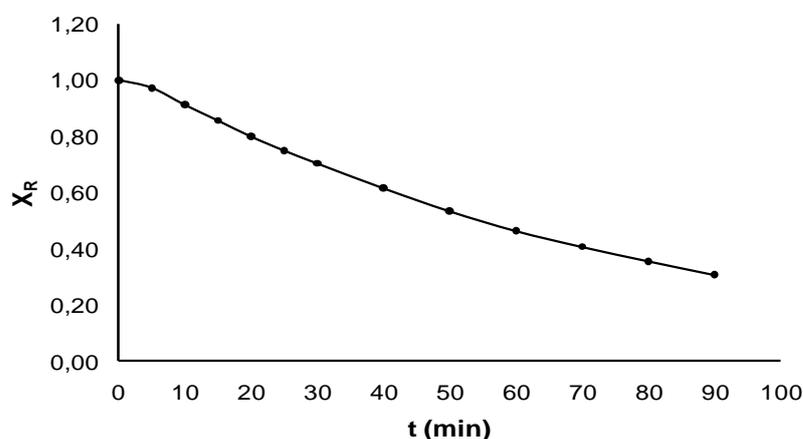
**Gráfico 31** – Curva de secagem dos dados experimentais da repetição da Corrida 2 com a amostra hidropônica.



**Gráfico 32** – Curva de secagem dos dados experimentais da repetição da Corrida 4 com a amostra hidropônica.



**Gráfico 33** – Curva de secagem dos dados experimentais da repetição da Corrida 9 com a amostra hidropônica.



**Gráfico 34** – Curva de secagem dos dados experimentais da repetição da corrida no ponto central (Corrida 14) com a amostra hidropônica.

#### 5.4.1.1. Ajuste da curva de secagem aos modelos cinéticos

O modelo logarítmico foi o que representou melhor o comportamento da secagem da amostra PH assim como o da amostra PN. Na Tabela 5.19 são apresentadas as estatísticas que confirmam a qualidade desse modelo, e no Apêndice C são encontradas as estatísticas para os outros modelos cinéticos.

Na Tabela 5.20 constam os coeficientes de determinação e os parâmetros obtidos a partir do ajustes ao modelo linear, e ao modelo logarítmico, conforme foi realizado com a amostra PN.

**Tabela 5.19:** Ajustes dos pontos experimentais ao modelo logarítmico

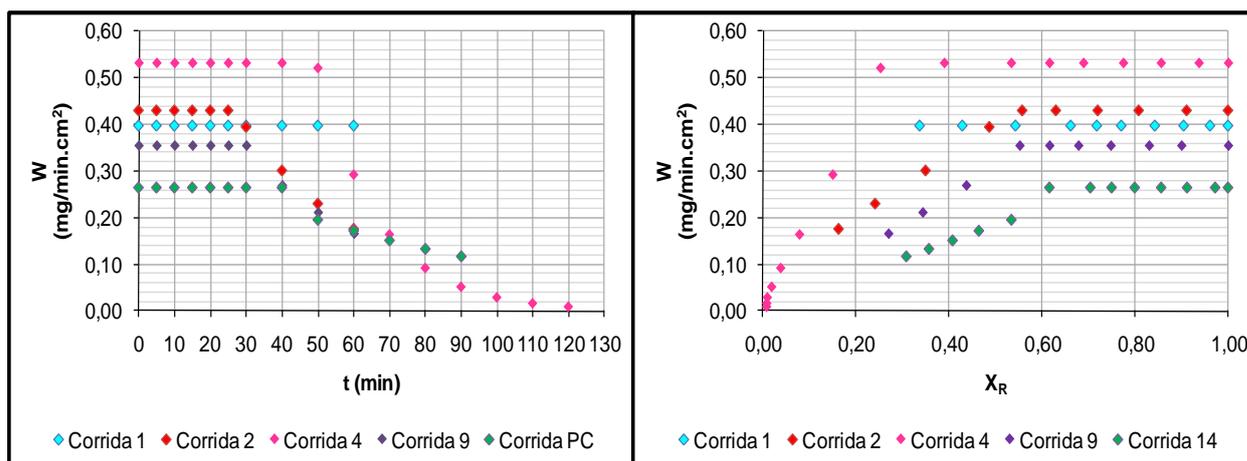
Corridas	R <sup>2</sup> (%)	Gráfico 2D	Resíduos		Avaliação
			Distribuição	Faixa	
01	-	-	-	-	-
02	0,9999	PMP	Aleatória	- 0,0014 + 0,0012	Adequado
04	0,9971	PMP	Aleatória	- 0,0051 + 0,0077	Adequado
09	1,0000	PTP	Aleatória	- 0,00006 + 0,000005	Adequado
14	0,9999	PMP	Aleatória	- 0,0008 + 0,0009	Adequado

**Tabela 5.20:** Ajuste do conteúdo de umidade das amostras PH com o tempo, para os períodos à taxa de secagem constante e decrescente, utilizando as equações da reta e logarítmica, para a segunda fase dos experimentos

Corridas	Modelo Linear XR = a – b.t			Modelo Logarítmico XR = a.exp (- kt) + b			
	a	b	R <sup>2</sup> (%)	a	b	K	R <sup>2</sup> (%)
01	1,0083	0,0114	99,8288	-	-	-	-
02	0,9902	0,0173	99,6214	1,3187	- 0,0975	0,0271	99,9930
04	1,0022	0,0152	99,8900	4,6419	- 0,0013	0,0578	99,7060
09	0,9728	0,0139	99,2499	1,1473	0,0032	0,0243	99,9999
14	1,0030	0,0097	99,5563	1,0623	- 0,0261	0,0128	99,9697

#### 5.4.1.2. Curvas de taxa de secagem da amostra PH

Para por em gráfico as taxas de secagem referentes às corridas experimentais com as amostras PH, foi utilizado um gráfico múltiplo (Gráfico 35), onde constam todas as corridas experimentais realizadas (Corridas 01, 02, 04, 09 e 14). Verifica-se que a amostra PH tende a um comportamento semelhante ao da amostra PN, sendo a velocidade de secagem diretamente proporcional à temperatura e inversamente proporcional a carga de amostra. As diferenças no comportamento da secagem em leito fixo das amostras PH e PN será discutida no tópico 5.4.2.

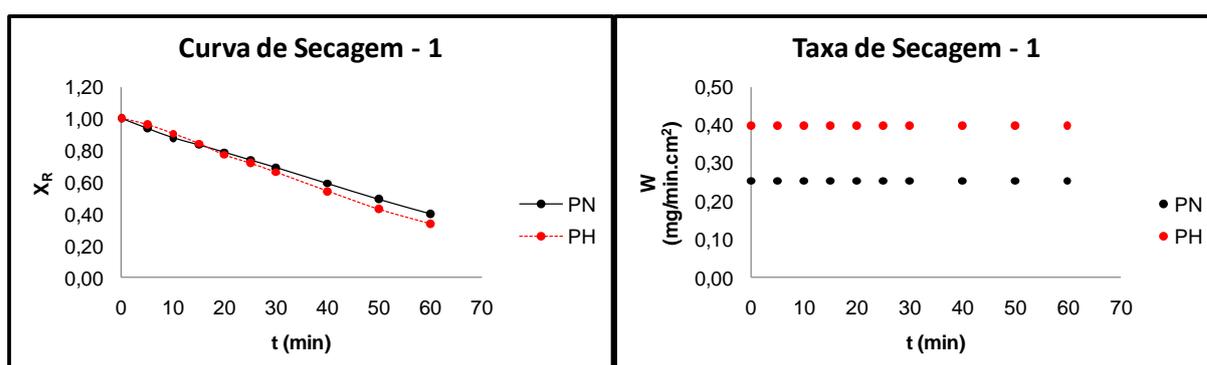


**Gráfico 35** – Curva de taxa de secagem para as corridas com amostra PH.

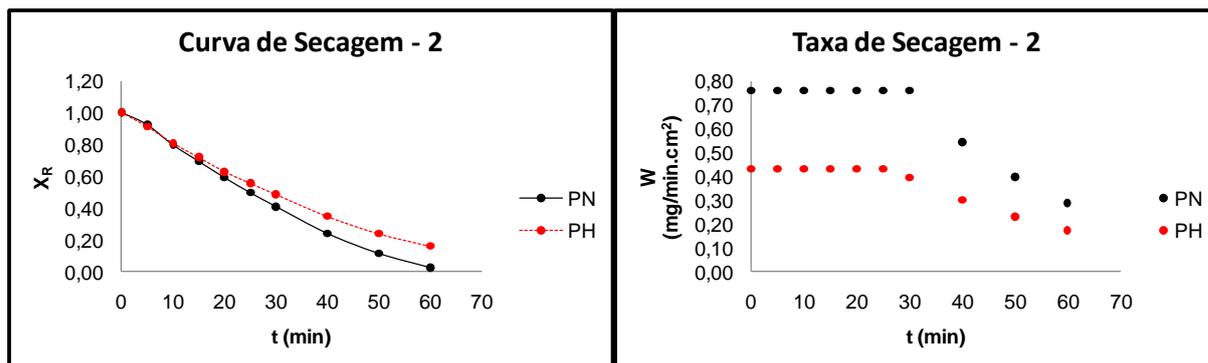
**Corrida 1:**  $T=60^\circ\text{C}$ ,  $t=60\text{min}$  e  $C=300\text{g}$ ; **Corrida 2:**  $T=80^\circ\text{C}$ ,  $t=60\text{min}$  e  $C=300\text{g}$ , **Corrida 4:**  $T=80^\circ\text{C}$ ,  $t=120\text{min}$  e  $C=300\text{g}$ ; **Corrida 9:**  $T=70^\circ\text{C}$ ,  $t=60\text{min}$  e  $C=200\text{g}$ , **Corrida 14:**  $T=70^\circ\text{C}$ ,  $t=90\text{min}$  e  $C=300\text{g}$

#### 5.4.2. Comparação do comportamento da amostra PH e PN durante a secagem em leito fixo

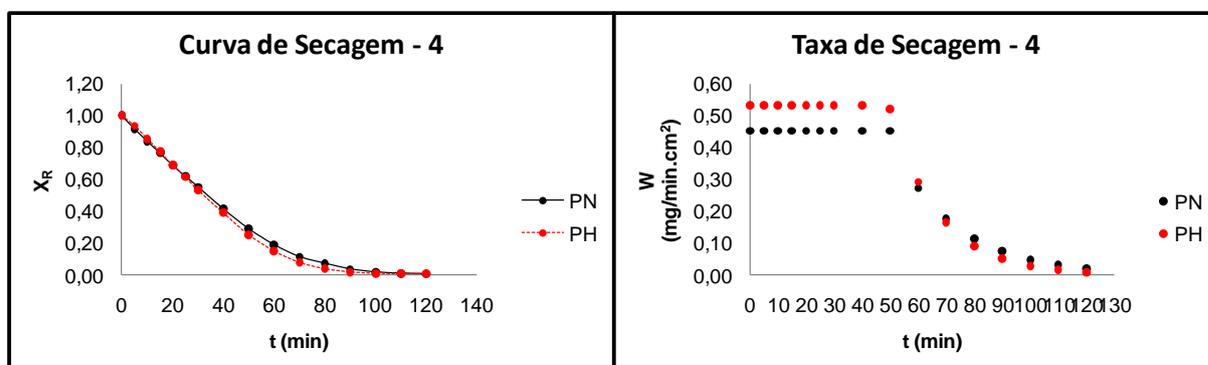
Nos Gráficos 36, 37, 38, 39 e 40, são apresentadas as curvas de secagem e de taxa de secagem obtidas durante as corridas experimentais com a amostra PN (curvas pretas) e com a amostra PH (curvas vermelhas).



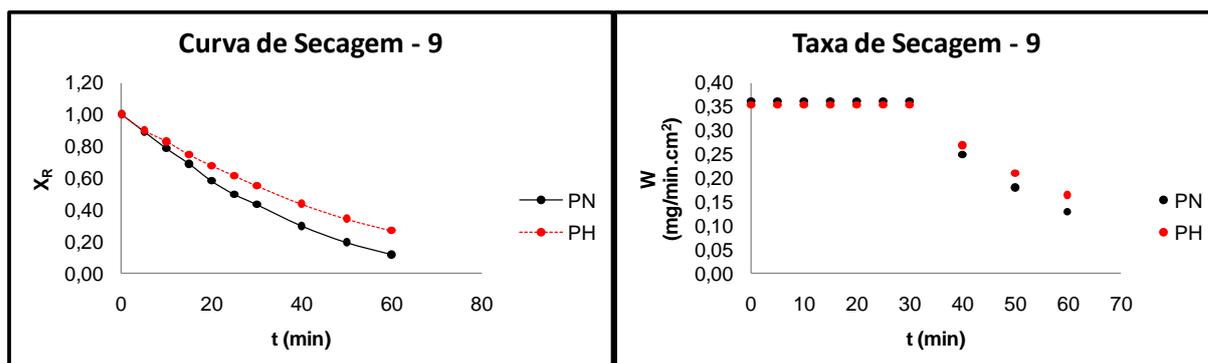
**Gráfico 36** – Comparação das curvas de secagem e de taxa de secagem obtidas com a amostra PN e PH, a partir da Corrida 1 ( $60^\circ\text{C}$ ,  $60\text{min}$ ,  $300\text{g}$ ).



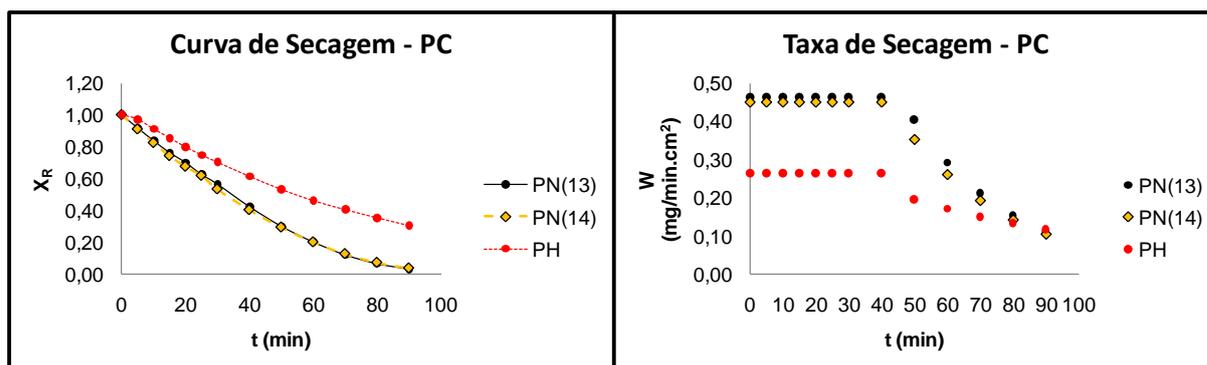
**Gráfico 37** – Comparação das curvas de secagem e de taxa de secagem obtidas com a amostra PN e PH, a parti da Corrida 2 (80°C, 60min, 300g).



**Gráfico 38** – Comparação das curvas de secagem e de taxa de secagem obtidas com a amostra PN e PH, a partir da Corrida 4 (80°C, 120min, 300g).



**Gráfico 39** – Comparação das curvas de secagem e de taxa de secagem obtidas com a amostra PN e PH, a partir da Corrida 9 (70°C, 60min, 200g).



**Gráfico 40** – Comparação das curvas de secagem e de taxa de secagem obtidas com as amostras PN e PH, a partir das corridas no ponto central (PC - 70°C, 90min, 300g).

No Gráfico 36, verifica-se que com os menores valores de temperaturas e tempo de secagem (60°C e 60 minutos), só ocorre perda da umidade superficial do material, tanto na amostra PN quanto na amostra PH. Com o aumento da temperatura de secagem para 80°C (Gráfico 37), a retirada da umidade superficial ocorre em um tempo menor, de aproximadamente 30 minutos, sendo que é observado que o teor de umidade final é menor para a amostra PH.

No Gráfico 38, verifica-se que com uma carga de 300 g e os maiores valores de temperatura e tempo de secagem (80°C e 120 minutos), a perda de umidade superficial das amostras PN e PH ocorrem até cerca de 50 minutos da secagem, ou seja, nessas condições a velocidade ou taxa de secagem é constante. Pode ser observado também que no período de taxa decrescente, as amostras apresentam um comportamento semelhante, o que também é observado nas suas curvas de secagem.

No Gráfico 39, consta os dados da corrida 9, cuja carga da amostra foi 200 g, a temperatura 70°C e o tempo de secagem de 60 minutos, verifica-se que nessas condições a taxa de secagem é constante até 30 minutos de secagem, e que o teor de umidade final da amostra PH é menor do que o da amostra PN. O aumento da carga para 300 g e do tempo de secagem para 90 minutos, mantendo a temperatura em 70°C (Gráfico 40), ocasiona um aumento no tempo para retirada de umidade superficial, sendo que a taxa de secagem é constante até um tempo de aproximadamente 50 minutos, e o teor de umidade final das amostras PH continuam sendo menores do que os da amostra PN, o que pode estar relacionado com o fato

da amostra PH ter sido utilizada *in natura* no processo de secagem, enquanto a amostra PN passou por uma etapa de armazenamento em freezer, que pode ter ocasionado fissuras no tecido das plântulas, além de aumentar a umidade livre da amostra, o que aumenta significativamente a velocidade da secagem.

#### 5.4.3 Comparação da composição química da amostra PH secada em temperatura ambiente e secada em leito fixo

Na Tabela 5.21 é realizada a comparação da composição química dos óleos essenciais obtidos da hidrodestilação das amostras de pataqueira hidropônicas que passaram por um processo de secagem em temperatura (em média 30 °C), por aproximadamente 5 dias (amostra **PH<sub>STA</sub>**), e um processo de secagem em secador convectivo de leito fixo a 60°C por 60 minutos, com uma carga de 300 g (**PH<sub>SLF</sub>**).

**Tabela 5.21:** Comparação da composição química dos óleos essenciais de amostras de pataqueira PH seca naturalmente e em leito fixo.

Componentes	PH <sub>STA</sub> (%)	PH <sub>SLF</sub> (%)
α-pineno	0,2	0,2
3-octanona	1,8	1,8
<b>α-felandreno</b>	<b>20,0</b>	<b>17,7</b>
p-cimeno	1,2	1,2
γ -terpineno	0,4	0,4
p-cimeno	0,2	0,1
linalol	0,3	0,3
p-cimen-8-ol	0,6	0,7
α-terpineol	0,1	0,1
<b>metiltimol</b>	<b>27,2</b>	<b>27,4</b>
<b>timol</b>	<b>43,8</b>	<b>45,2</b>
carvacrol	0,3	-
timol acetato	0,5	0,4
eugenol	0,4	0,5
α-zingibereno	0,1	0,5
(E,E)α-farneseno	0,1	-
E-nerolidol	0,1	0,1
<b>Total</b>	<b>97,3</b>	<b>96,6</b>

PH<sub>STA</sub>: Pataqueira hidropônica secada naturalmente;

PH<sub>SLF</sub>: Pataqueira hidropônica secada em leito fixo.

É observado na Tabela 5.20, que os componentes em menor percentual na amostra, não apresentaram mudanças significativas de concentração devido à mudança do tipo de secagem, e os componentes majoritários apresentaram sensíveis modificações, como um decréscimo da concentração de  $\alpha$ -felandreno e acréscimo da concentração de timol, sendo que para o componente metiltimol a alteração foi muito pequena.

Foi verificada, na secagem em leito fixo, a mesma correlação entre os componentes majoritários observada no Tópico 5.2.1 (Comparação da composição química das amostras PN e PH), pois o somatório das concentrações de  $\alpha$ -felandreno, metiltimol e timol, representou 90,3 % do óleo essencial, ou seja, está em torno de 90 %.

Portanto é observado que o óleo essencial de pataqueira, tanto colhida no seu habitat natural ou cultivada em hidroponia, possui uma concentração de aproximadamente 90 % de  $\alpha$ -felandreno, metiltimol e timol, de forma que a concentração de cada um desses componentes oscila entre si, de acordo com o estado da amostra vegetal.

## CAPITULO 6

---

---

### CONCLUSÃO

A espécie herbácea *Conocarpus scoparioides* Cham. & Schltdl. pode ser cultivada em sistema hidropônico (do tipo NFT), com a obtenção de bons resultados: com (1) aumento do rendimento em óleo essencial (corte da planta aos 6 meses) e (2) sem alteração qualitativa da composição química. do óleo. O balanço dos três principais componentes ( $\alpha$ -felandreno, metiltimol e timol) é mantido no cultivo hidropônico, com pequena alteração nas suas proporções.

O cultivo de pataqueira em meio hidropônico pode ser realizado de forma contínua, promovendo-se cortes sucessivos a 4-6 meses, sem necessidade de replantio. O teor de umidade da planta não é alterado no processo hidropônico, permanecendo em torno de 90 %.

Prévia secagem da planta é muito importante para alcançar maiores rendimentos em óleo. No estudo da secagem de pataqueira em leito fixo, verificou-se que as condições ótimas de secagem são temperatura de 60 °C, tempo de 120 minutos e carga de 200 g. Não houve mudanças significativas na cinética de secagem das amostras PN e PH, sendo que ambas podem ser adequadamente representadas pelo modelo logarítmico usado. O comportamento das curvas de secagem apontou para a existência de períodos de velocidade de secagem à taxa constante e decrescente.

A secagem em leito fixo, comparada à secagem em temperatura ambiente, não gerou mudança significativa indicando que este processo pode ser utilizado para a obtenção do óleo essencial da pataqueira previamente obtida por meio hidropônico.

## REFERÊNCIAS

ADAMS, R. P. **Identification of essential oil components by gas chromatography/Quadrupole mass spectroscopy.** Carol Stream: Allured Publishing Corporation, 2001.

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

ANDRADE, E. L.; FARIA, L. J. G.; FARIA JÚNIOR, L. J. G. **Cinética da secagem de pimenta-de-macaco (*Piper aduncum* L.) em secador de bandejas.** Anais do XI Encontro de Profissionais de Química da Amazônia, Belém: CRQ-VI Região, 2009.

BANDONI, A.L; CZEPAK, M. P. **Os recursos vegetais aromáticos no Brasil: seu aproveitamento industrial para a produção de aromas e sabores.** Vitória: edufes, 2008.

BARBOSA, et al. Influência da temperatura do ar de secagem sobre o teor e a composição química do óleo essencial de *Lippia alba* (Mill) N. E. BROWN. **Química Nova**, Vol. 29, No. 6, 1221-1225, 2006

BARBOSA-CÁNOVAS, G.; VEGA-MERCADO, H. **Dehydration of foods.** New York: Champman & Hall., 1996.

BEGAN, G. et. al. **Response surfaces of total oil yield of turmeric (*Curcuma longa*) in supercritical carbon dioxide.** Food Research International, 341-345, 2000.

BLISKA JÚNIOR, A.; SCOTTI, C. A.; ARAÚJO, J. A. C. de.; LIMA, J. de A.; ZOCCAL, J. C.; SILVA, M. L. J. da. **Dimensionamento do projeto hidropônico.** Brasília, LK Editora e Comunicação LTDA. 1998. p. 64.

BRAGA, Nazareno de Pina. **Influência da secagem no rendimento e na composição química do óleo essencial das folhas de *Eucalyptus citriodora*.** Dissertação de Mestrado – UNICAMP. Campinas, 2002.

BOX, G. E. P.; BEHNKEN, D. W. **Some new three level designs for the study of quantitative variables**. University of Wisconsin and the American Cyanamid Company. *Technometrics*, Vol. 2, N. 4. Novembro, 1960

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

DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous optimization of several response variables. **J. Qual. Technol.** 12, p. 214-219, 1980.

DOUGLAS, James Sholto. **Hidroponia: cultura sem terra**. 6 Ed. São Paulo: Nobel, 1987.

ECONOMAKIS, C. et al. Effect of phosphorus concentration of the nutrient solution on the volatile constituents of leaves and bracts of *Origanum dictamnus*. **Journal of Agricultural and food chemistry.**, v. 50, n. 22, 2002.

FARIA, Lênio José Guerreiro de. **Análise experimental do processo de secagem de urucum (*Bixa orellana* L.) em leito fixo**. Tese de doutorado – UNICAMP. Campinas, 1998

FAQUIN, V.; FURLANI, P. R. Cultivo de hortaliças de folhas em hidroponia em ambiente protegido. **Informe Agropecuário**, v. 20, n. 200/201, p. 99-104, 1999.

FERNANDES, P. C. et al. Cultivo de manjeriço em hidroponia e em diferentes substratos sob ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.22, n.2, p.260-264, 2004.

FERREIRA, S. L. C. et al. **Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods**. *Analytica Chimica Acta* 597. p.179-186, 2007

FURLAN, Marcos Roberto. **Ervas e Temperos: cultivo e comercialização**. Coleção Agroindústria, v. 15. Cuiabá: SEBRAE/MT, 1998.

FURLANI, P.R.; SILVEIRA, L.C.P.; BOLONHEZI, D.; FAQUIN, V. **Cultivo hidropônico de plantas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1999. 52p. Boletim Técnico IAC, 180.

GARLET, Tânea Maria Bisognin. **Produtividade, teor e composição do óleo essencial de espécies de *Mentha* L. (LAMIACEAE) cultivadas em hidroponia com variação de potássio.** Tese de doutorado – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 2007.

HABER, L. L. et. al. Diferentes concentrações de solução nutritiva para o cultivo de *Mentha Piperita* e *Melissa Officinalis*. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.23, n.4, p.1006-1009, 2005.

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.

JONES JUNIOR, J. B. **Hidroponics: A practical guide for the soiless grower.** London: CRC Press. 2005. p. 423.

MAIA, J. G. S.; ZOGHBI, M. G. B. Óleos essenciais: o inventario da flora amazônica, In: **Tópicos especiais em tecnologia de produtos naturais.** Organizadores FARIA, L. J. G.; COSTA, C. M. L., NUMA/POEMA/UFPA, Série POEMA nº7, p. 302, Belém, 1998.

MAIA, J. G. S.; ZOGHBI, M. G. B.; ANDRADE, E. H. A; SILVA, M. M. L. da. Óleos essenciais da vassorinha-do-brejo. **Horticultura Brasileira**, v. 18, p. 942, 2000

MAIA, J. G. S.; ZOGHBI, M. G. B.; ANDRADE, E. H. A; Plantas aromáticas na Amazônia e seus óleos essenciais. **Coleção Adolpho Ducke**, Museu Paraense Emilio Goeldi, Belém, 2001.

MAIA, J. G. S. **Química e atividade biológica dos óleos essenciais da Amazônia.** In: IV Simpósio Brasileiro de Óleos Essenciais, 2007, Ceará.

MAIA, J. G. S. Plantas aromáticas da região amazônica. In: BANDONI, A. L; CZEPAK, M. P. **Os recursos vegetais aromáticos no Brasil: seu aproveitamento industrial para a produção de aromas e sabores.** Vitória: edufes, 2008.

MARTINEZ, Hermínia E. P. **O uso do cultivo hidropônico de plantas em pesquisa.** 3 Ed. Viçosa: UFV, 2002.

MASON, R. L.; GUNST, R. G.; HESS, J. L. **Statistical design and analysis of experiments**. New York: Wiley, 1989.

MAY, A. et. al. ***Basil plants growth and essential oil yield in a production system with successive cuts***. *Bragantia*, Campinas, v.67, n.2, p.385-389, 2008

MOCHI, Vanessa Trevizan. **Efeitos da temperatura de secagem no rendimento do óleo essencial e teor de 1,8 – cineol presentes nas folhas de *Eucalyptus camaldulensis***. Dissertação de Mestrado – UNICAMP. Campinas, 2005.

MONTGOMERY, D. C. **Diseño y análisis de experimentos**. Traduzido por Jaime Delgado Saldivar. México: Iberoamérica, 1991.

MUJUMDAR, A. S. Preface. In: (Ed.) **Handbook of Industrial Drying**. New York, Marcel Dekker, 1987. p. v - vi.

MUJUMDAR, A. S. Innovative industrial drying technologies of the future In: (Ed.) **Drying of solids**. New York, International Science Publisher, 1992. p. 3-20.

NASCIMENTO, S. K. **Trace elements and in particular manganese in three Brazilian medicinal plants studied in tea and in hydropony grown plants**. Tese de doutorado – Universidade Johannes Gutenberg. Mainz, 2006.

OLIVEIRA, Sergio Francisco Ferreira de. **Influência de variáveis operacionais da secagem em leito fixo na umidade final de rizomas de priprioca (*Cyperus articulatus* L.) e no rendimento e concentração de constituintes majoritários de seu óleo essencial**. Dissertação de Mestrado – UFPA. Belém, 2007.

ÖZTEKIN, Serdar; MARTINOV, Milan. **Medicinal and Aromatic Crops: harvesting, drying, and processing**. New York, The Haworth Press, Inc, 2007

PAGE, G. E. ***Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin-layer***. Indiana, 1949. Dissertation (M. Sc), Purde University Indiana, USA, 1949.

PAULUS, D. et. al. Substratos na produção hidropônica de mudas de hortelã. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.23, n.1, p.48-50, 2005.

PAULUS, D. et. al. **Teor e qualidade do óleo essencial de menta (*Mentha arvensis L.*) produzida sob cultivo hidropônico e em solo.** Rev. Bras. Pl. Med., Botucatu, v.9, n.2, p.80-87, 2007

PAULUS D. et. al. Solução nutritiva para produção de menta em hidroponia. **Horticultura Brasileira**, v. 26, n. 1, p. 061-067, 2008.

REBELO, Monaliza Maia. **Capacidade antioxidante e toxicidade dos óleos essenciais e extratos metanólicos de *Conohea scoparioides* e *Hyptis crenata*.** Dissertação de mestrado – UFPA. Belém, 2008.

REBELO, M. M.et. al.; **Antioxidant Capacity and Biological Activity of Essential Oil and Methanol Extract of *Conohea scoparioides* (Cham. & Schlttdl.) Benth.** J. Braz. Chem. Soc., Vol. 20, No. 6, 2009.

RESH, H. M. **Cultivos hidropônicos.** Madrid: Ed. Mundi-Prensa, p. 509, 1997.

SOUZA M. A. A. et. al. Produção de biomassa e óleo essencial de hortelã em hidroponia em função de nitrogênio e fósforo. **Horticultura Brasileira**, 2007.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design.** New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986. (Topics in chemical engineering, v. 3)

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. Transactions of the ASAE, v. 78, n. 6, p. 6505, 1978.

WITTEWER, S. H.; CASTILLA, N. Protected cultivation of horticultural crops worldwide. **HortTechnology**, v. 5, n. 1, p. 6-23, 1995.

## **APÊNDICE A**

DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NA SECAGEM DA PATAQUEIRA EM  
SECADOR CONVECTIVO DE LEITO FIXO

**Tabela A. 1:** Dados experimentais obtidos a partir da corrida experimental 1

t	T <sub>S</sub>	T <sub>BU</sub>	T <sub>BS</sub>	UR	T <sub>AMB</sub>	m (t)	X <sub>BS</sub>	X <sub>BU</sub>	X <sub>R</sub>	W
0	59	35,50	69,00	56	29,00	300,00	911,14	90,11	1,00	0,25
5	60	35,00	71,00	55	28,90	283,15	854,35	89,52	0,94	0,25
10	61	36,00	72,00	53	28,60	267,17	800,49	88,89	0,88	0,25
15	61	35,70	72,50	52	27,80	255,13	759,91	88,37	0,83	0,25
20	62	36,00	73,00	52	27,80	242,56	717,54	87,77	0,79	0,25
25	62	36,40	73,50	52	27,80	229,50	673,52	87,07	0,74	0,25
30	62	36,80	74,00	52	27,70	216,66	630,25	86,31	0,69	0,25
40	62	37,00	75,00	52	27,70	189,56	538,91	84,35	0,59	0,25
50	63	37,20	76,00	52	27,80	162,72	448,44	81,77	0,49	0,25
60	63	37,20	76,00	51	27,70	148,15	399,34	79,97	0,44	0,25

**Tabela A. 2:** Dados experimentais obtidos a partir da corrida experimental 2

t	T <sub>S</sub>	T <sub>BU</sub>	T <sub>BS</sub>	UR	T <sub>AMB</sub>	m (t)	X <sub>BS</sub>	X <sub>BU</sub>	X <sub>R</sub>	W
0	75	37,80	84,00	54	28,50	300,00	594,69	85,61	1,00	0,76
5	80	38,50	89,00	54	28,70	280,37	549,23	84,60	0,92	0,76
10	81	39,40	90,00	55	29,00	247,77	473,74	82,57	0,80	0,76
15	81	39,80	90,00	55	29,40	221,35	412,56	80,49	0,69	0,76
20	82	40,50	91,00	55	29,40	195,09	351,75	77,86	0,59	0,76
25	82	41,00	92,00	55	29,50	170,81	295,53	74,72	0,50	0,76
30	83	41,30	93,00	55	29,70	148,46	243,78	70,91	0,41	0,76
40	80	40,50	91,00	55	29,50	104,95	143,02	58,85	0,24	0,54
50	80	40,70	91,00	54	29,50	72,75	68,46	40,64	0,12	0,40
60	80	40,70	91,00	53	29,70	49,86	15,46	13,39	0,03	0,29

**Tabela A. 3:** Dados experimentais obtidos a partir da corrida experimental 3

t	T <sub>S</sub>	T <sub>BU</sub>	T <sub>BS</sub>	UR	T <sub>AMB</sub>	m (t)	X <sub>BS</sub>	X <sub>BU</sub>	X <sub>R</sub>	W
0	60	35,00	68,00	59	29,20	300,00	681,10	87,20	1,00	0,39
5	61	36,00	71,00	59	29,30	283,50	638,14	86,45	0,94	0,39
10	62	37,20	73,00	60	30,10	266,82	594,71	85,61	0,87	0,39
15	62	37,40	74,00	62	30,30	252,73	558,03	84,80	0,82	0,39
20	62	37,40	74,00	62	30,00	237,68	518,84	83,84	0,76	0,39
25	62	37,50	74,00	61	29,80	221,72	477,29	82,68	0,70	0,39
30	62	37,70	75,00	60	29,80	206,48	437,61	81,40	0,64	0,39
40	62	37,90	75,50	59	29,70	177,89	363,17	78,41	0,53	0,36
50	64	38,40	77,00	58	29,70	152,08	295,97	74,75	0,43	0,31
60	63	38,30	77,00	57	29,60	129,90	238,22	70,43	0,35	0,26
70	63	38,00	76,00	57	29,80	109,80	185,88	65,02	0,27	0,22
80	63	38,00	76,50	61	30,40	92,61	141,13	58,53	0,21	0,19
90	63	38,10	76,00	62	30,40	79,20	106,21	51,51	0,16	0,16
100	63	38,00	76,00	61	30,40	68,19	77,54	43,68	0,11	0,14
110	63	38,10	76,50	60	30,10	58,74	52,94	34,61	0,08	0,12
120	64	38,40	77,00	62	30,90	51,45	33,96	25,35	0,05	0,10

**Tabela A. 4:** Dados experimentais obtidos a partir da corrida experimental 4

t	T <sub>S</sub>	T <sub>BU</sub>	T <sub>BS</sub>	UR	T <sub>AMB</sub>	m (t)	X <sub>BS</sub>	X <sub>BU</sub>	X <sub>R</sub>	W
0	71	35,80	80,00	49	27,50	300,00	721,16	87,82	1,00	0,45
5	76	36,40	85,00	50	27,90	278,27	661,68	86,87	0,92	0,45
10	79	38,50	88,00	50	28,10	257,91	605,95	85,83	0,84	0,45
15	80	38,90	89,00	50	28,50	238,24	552,11	84,67	0,77	0,45
20	81	39,40	89,00	50	28,70	218,04	496,82	83,24	0,69	0,45
25	81	39,40	90,00	50	28,80	199,86	447,06	81,72	0,62	0,45
30	82	39,80	91,00	50	29,00	182,47	399,46	79,98	0,55	0,45
40	81	39,40	91,00	50	29,20	145,78	299,03	74,94	0,41	0,45
50	81	39,40	91,00	50	29,30	112,93	209,11	67,65	0,29	0,45
60	81	39,20	91,00	50	29,30	86,45	136,63	57,74	0,19	0,27
70	80	38,80	90,00	50	29,40	66,58	82,24	45,13	0,11	0,18
80	80	38,80	90,00	50	29,50	55,58	52,13	34,27	0,07	0,11
90	81	39,00	91,00	52	29,50	46,20	26,46	20,92	0,04	0,07
100	81	39,20	91,00	51	29,50	41,08	12,44	11,07	0,02	0,05
110	81	39,30	91,00	51	29,60	39,14	7,13	6,66	0,01	0,03
120	81	39,30	91,00	51	29,70	38,20	4,56	4,36	0,01	0,02

**Tabela A. 5:** Dados experimentais obtidos a partir da corrida experimental 5

t	T <sub>S</sub>	T <sub>BU</sub>	T <sub>BS</sub>	UR	T <sub>AMB</sub>	m (t)	X <sub>BS</sub>	X <sub>BU</sub>	X <sub>R</sub>	W
0	59	34,00	68,00	58	27,90	200,00	788,83	88,75	1,00	0,23
5	60	34,40	70,00	58	27,90	187,72	734,26	88,01	0,93	0,23
10	61	35,40	71,00	58	28,00	174,10	673,73	87,08	0,85	0,23
15	61	36,00	71,50	58	28,00	161,22	616,49	86,04	0,78	0,23
20	62	36,40	72,00	58	28,00	149,52	564,49	84,95	0,72	0,23
25	62	36,40	72,00	58	28,10	139,21	518,67	83,84	0,66	0,23
30	62	36,40	72,00	59	28,60	128,98	473,21	82,55	0,60	0,23
40	63	36,80	72,50	59	29,30	107,26	376,68	79,02	0,48	0,23
50	61	36,20	70,50	59	29,50	89,96	299,80	74,99	0,38	0,23
60	62	36,40	71,00	59	29,80	73,43	226,34	69,36	0,29	0,18
70	62	36,40	72,00	58	29,40	59,23	163,23	62,01	0,21	0,14
80	62	36,50	72,00	58	29,70	47,48	111,01	52,61	0,14	0,11
90	62	36,50	72,00	59	29,70	39,02	73,41	42,33	0,09	0,09

**Tabela A. 6:** Dados experimentais obtidos a partir da corrida experimental 6

t	T <sub>S</sub>	T <sub>BU</sub>	T <sub>BS</sub>	UR	T <sub>AMB</sub>	m (t)	X <sub>BS</sub>	X <sub>BU</sub>	X <sub>R</sub>	W
0	72	36,20	81,00	45	27,30	200,00	481,44	82,80	1,00	0,66
5	77	37,90	85,00	45	27,60	180,94	426,03	80,99	0,88	0,66
10	80	38,30	89,00	45	28,00	159,90	364,86	78,49	0,76	0,66
15	80	38,50	89,00	45	28,30	141,82	312,30	75,75	0,65	0,66
20	80	38,50	89,00	46	28,60	124,86	262,99	72,45	0,55	0,66
25	81	39,20	90,00	46	28,80	108,70	216,01	68,36	0,45	0,66
30	81	39,20	90,00	46	28,90	95,73	178,30	64,07	0,37	0,52
40	81	39,60	91,00	46	29,10	72,70	111,35	52,69	0,23	0,33
50	82	40,00	92,00	46	29,00	55,90	62,51	38,47	0,13	0,21
60	82	40,00	92,00	45	29,10	45,50	32,28	24,40	0,07	0,13
70	81	39,60	91,00	45	29,20	39,84	15,82	13,66	0,03	0,09
80	80	39,40	90,00	44	29,10	38,91	13,12	11,60	0,03	0,05
90	80	39,50	90,00	44	29,00	36,05	4,80	4,58	0,01	0,03

**Tabela A. 7:** Dados experimentais obtidos a partir da corrida experimental 7

t	T <sub>S</sub>	T <sub>BU</sub>	T <sub>BS</sub>	UR	T <sub>AMB</sub>	m (t)	X <sub>BS</sub>	X <sub>BU</sub>	X <sub>R</sub>	W
0	59	33,40	68,00	53	28,00	400,00	857,10	89,55	1,00	0,45
5	61	34,30	71,00	53	28,20	367,30	778,86	88,62	0,91	0,45
10	62	35,70	73,00	53	28,40	352,45	743,33	88,14	0,87	0,45
15	62	35,80	73,00	53	28,50	330,52	690,85	87,36	0,81	0,45
20	62	35,50	73,00	54	28,60	300,49	619,00	86,09	0,72	0,45
25	62	35,80	73,00	54	28,60	287,29	587,42	85,45	0,69	0,45
30	62	35,80	73,00	54	28,60	263,96	531,59	84,17	0,62	0,45
40	62	35,60	72,00	54	28,50	217,60	420,66	80,79	0,49	0,42
50	61	35,00	71,50	54	28,70	179,84	330,31	76,76	0,39	0,36
60	61	34,90	71,00	54	28,60	147,59	253,15	71,68	0,30	0,30
70	61	34,90	72,00	53	28,60	119,95	187,01	65,16	0,22	0,26
80	62	35,20	72,00	53	28,70	97,35	132,93	57,07	0,16	0,22
90	61	34,50	71,00	53	28,90	76,82	83,81	45,60	0,10	0,18

**Tabela A. 8:** Dados experimentais obtidos a partir da corrida experimental 8

t	T <sub>S</sub>	T <sub>BU</sub>	T <sub>BS</sub>	UR	T <sub>AMB</sub>	m (t)	X <sub>BS</sub>	X <sub>BU</sub>	X <sub>R</sub>	W
0	73	36,80	81,00	43	28,00	400,00	639,36	86,47	1,00	0,57
5	78	37,50	85,00	43	28,20	379,70	601,84	85,75	0,94	0,57
10	80	38,20	89,00	43	28,40	355,94	557,92	84,80	0,87	0,57
15	80	38,20	89,00	43	28,60	334,54	518,37	83,83	0,81	0,57
20	80	38,40	89,00	43	28,80	314,58	481,47	82,80	0,75	0,57
25	81	38,80	90,00	44	29,00	294,60	444,54	81,64	0,70	0,57
30	80	38,50	90,00	44	29,10	275,39	409,03	80,35	0,64	0,57
40	80	38,50	89,00	44	29,10	236,42	337,00	77,12	0,53	0,52
50	80	38,50	89,00	44	29,00	199,75	269,22	72,92	0,42	0,46
60	81	38,80	90,00	44	29,20	167,87	210,29	67,77	0,33	0,40
70	81	38,90	90,00	45	29,70	139,46	157,78	61,21	0,25	0,35
80	82	40,00	91,00	45	29,70	115,29	113,10	53,07	0,18	0,30
90	80	38,80	90,00	44	29,40	97,35	79,94	44,43	0,13	0,26

**Tabela A. 9:** Dados experimentais obtidos a partir da corrida experimental 9

t	T <sub>S</sub>	T <sub>BU</sub>	T <sub>BS</sub>	UR	T <sub>AMB</sub>	m (t)	X <sub>BS</sub>	X <sub>BU</sub>	X <sub>R</sub>	W
0	70	37,00	78,00	53	28,20	200,00	753,15	88,28	1,00	0,36
5	69	36,80	78,00	53	28,40	181,15	672,74	87,06	0,89	0,36
10	70	37,20	80,00	53	28,40	162,24	592,08	85,55	0,79	0,36
15	71	37,80	81,00	53	28,50	145,35	520,03	83,87	0,69	0,36
20	71	38,00	82,00	53	28,90	126,35	438,98	81,45	0,58	0,36
25	71	38,20	82,00	53	28,80	111,57	375,93	78,99	0,50	0,36
30	71	38,20	82,00	53	28,90	100,30	327,86	76,63	0,44	0,36
40	71	38,20	82,00	54	29,00	76,54	226,50	69,37	0,30	0,25
50	71	38,10	83,00	53	29,00	58,17	148,14	59,70	0,20	0,18
60	71	38,10	82,00	53	29,10	44,90	91,53	47,79	0,12	0,13

**Tabela A. 10:** Dados experimentais obtidos a partir da corrida experimental 10

t	T <sub>S</sub>	T <sub>BU</sub>	T <sub>BS</sub>	UR	T <sub>AMB</sub>	m (t)	X <sub>BS</sub>	X <sub>BU</sub>	X <sub>R</sub>	W
0	68	36,20	76,00	59	29,10	200,00	736,88	88,05	1,00	0,33
5	69	36,60	77,00	58	28,90	183,93	669,64	87,01	0,91	0,33
10	71	37,60	80,00	58	28,90	166,84	598,13	85,68	0,81	0,33
15	72	38,00	81,00	58	28,90	150,37	529,21	84,11	0,72	0,33
20	71	37,80	81,50	58	28,90	134,72	463,72	82,26	0,63	0,33
25	71	37,80	82,00	57	28,90	121,46	408,24	80,32	0,55	0,33
30	71	38,00	82,00	57	29,00	108,94	355,85	78,06	0,48	0,33
40	71	38,40	83,00	57	29,30	83,75	250,44	71,46	0,34	0,33
50	72	38,80	83,00	57	29,10	62,96	163,45	62,04	0,22	0,25
60	72	38,80	83,00	57	29,30	47,61	99,22	49,80	0,13	0,14
70	72	38,90	83,00	56	29,30	37,58	57,25	36,41	0,08	0,08
80	72	38,90	83,00	55	29,30	31,61	32,27	24,40	0,04	0,05
90	72	38,90	83,00	57	29,50	28,50	19,26	16,15	0,03	0,03
100	72	38,90	83,00	56	29,40	26,23	9,76	8,89	0,01	0,02
110	72	38,60	83,00	55	29,40	26,06	9,05	8,30	0,01	0,01
120	72	38,70	83,00	58	29,90	26,14	9,38	8,58	0,01	0,01

**Tabela A. 11:** Dados experimentais obtidos a partir da corrida experimental 11

t	T <sub>S</sub>	T <sub>BU</sub>	T <sub>BS</sub>	UR	T <sub>AMB</sub>	m (t)	X <sub>BS</sub>	X <sub>BU</sub>	X <sub>R</sub>	W
0	69	37,40	77,00	50	28,30	400,00	820,10	89,13	1,00	0,47
5	69	37,40	79,00	51	28,40	378,01	769,52	88,50	0,94	0,47
10	70	37,70	80,00	51	28,50	353,32	712,72	87,70	0,87	0,47
15	72	37,80	82,00	51	28,60	330,70	660,69	86,85	0,81	0,47
20	71	37,80	82,00	51	28,80	309,16	611,15	85,94	0,75	0,47
25	71	37,80	81,00	51	29,10	281,60	547,75	84,56	0,67	0,47
30	71	37,90	82,00	51	29,10	261,13	500,66	83,35	0,61	0,47
40	72	38,30	83,00	51	29,10	217,16	399,52	79,98	0,49	0,47
50	71	37,80	82,00	51	29,00	174,84	302,18	75,14	0,37	0,47
60	71	37,70	82,00	52	29,30	142,53	227,85	69,50	0,28	0,47

**Tabela A. 12:** Dados experimentais obtidos a partir da corrida experimental 12

t	T <sub>S</sub>	T <sub>BU</sub>	T <sub>BS</sub>	UR	T <sub>AMB</sub>	m (t)	X <sub>BS</sub>	X <sub>BU</sub>	X <sub>R</sub>	W
0	65	35,00	74,00	52	27,10	400,00	747,29	88,20	1,00	0,48
5	71	35,90	78,00	52	27,30	380,68	706,36	87,60	0,95	0,48
10	70	35,70	78,50	52	27,60	355,71	653,47	86,73	0,87	0,48
15	71	35,90	81,00	53	27,90	329,57	598,10	85,68	0,80	0,48
20	71	36,00	81,00	55	28,20	307,42	551,18	84,64	0,74	0,48
25	71	36,00	82,00	55	28,20	287,36	508,69	83,57	0,68	0,48
30	71	36,00	82,00	56	28,10	267,36	466,33	82,34	0,62	0,48
40	71	36,00	82,00	56	28,20	226,06	378,84	79,12	0,51	0,48
50	72	36,60	83,00	56	28,50	189,81	302,06	75,13	0,40	0,48
60	71	36,40	82,00	55	28,60	157,38	233,36	70,00	0,31	0,37
70	71	36,20	82,00	55	28,70	130,26	175,92	63,76	0,24	0,29
80	71	36,20	82,00	54	28,80	107,71	128,15	56,17	0,17	0,23
90	71	36,20	82,00	56	29,00	89,76	90,13	47,40	0,12	0,18
100	71	36,30	82,00	55	28,90	76,25	61,51	38,09	0,08	0,14
110	71	36,30	82,50	54	28,80	66,72	41,33	29,24	0,06	0,11
120	71	36,10	82,00	54	28,70	57,82	22,48	18,35	0,03	0,09

**Tabela A. 13:** Dados experimentais obtidos a partir da corrida experimental 13

t	T <sub>S</sub>	T <sub>BU</sub>	T <sub>BS</sub>	UR	T <sub>AMB</sub>	m (t)	X <sub>BS</sub>	X <sub>BU</sub>	X <sub>R</sub>	W
0	63	34,90	71,00	54	72,60	300,00	684,13	87,25	1,00	0,46
5	69	35,50	77,00	54	28,00	278,59	628,17	86,27	0,92	0,46
10	70	36,00	78,00	55	28,30	257,78	573,78	85,16	0,84	0,46
15	71	36,60	80,00	55	28,50	238,19	522,57	83,94	0,76	0,46
20	71	36,80	81,00	55	28,70	221,93	480,07	82,76	0,70	0,46
25	71	36,80	81,00	55	28,80	202,42	429,08	81,10	0,63	0,46
30	72	37,00	82,00	55	29,00	186,61	387,76	79,50	0,57	0,46
40	71	36,80	82,00	55	29,10	149,78	291,49	74,46	0,43	0,46
50	72	37,00	83,00	55	29,10	117,61	207,41	67,47	0,30	0,40
60	71	36,90	82,00	55	29,20	91,83	140,02	58,34	0,20	0,29
70	71	36,80	82,00	55	29,40	70,73	84,87	45,91	0,12	0,21
80	71	36,80	82,00	55	29,50	56,22	46,95	31,95	0,07	0,15
90	71	36,90	82,50	55	29,50	47,24	23,47	19,01	0,03	0,10

**Tabela A. 14:** Dados experimentais obtidos a partir da corrida experimental 14

t	T <sub>S</sub>	T <sub>BU</sub>	T <sub>BS</sub>	UR	T <sub>AMB</sub>	m (t)	X <sub>BS</sub>	X <sub>BU</sub>	X <sub>R</sub>	W
0	62	33,50	74,00	47	26,50	300,00	720,74	87,82	1,00	0,45
5	69	35,10	79,00	47	26,50	276,31	655,92	86,77	0,91	0,45
10	70	35,80	80,00	47	27,10	253,85	594,48	85,60	0,82	0,45
15	71	36,00	81,00	47	27,30	232,36	535,69	84,27	0,74	0,45
20	72	36,40	82,00	48	27,40	214,72	487,43	82,98	0,68	0,45
25	70	36,00	82,00	48	27,50	199,69	446,31	81,70	0,62	0,45
30	70	36,10	82,00	48	27,50	177,39	385,30	79,39	0,53	0,45
40	70	36,10	83,00	50	28,00	143,17	291,68	74,47	0,40	0,45
50	70	36,00	83,00	50	28,00	114,44	213,08	68,06	0,30	0,35
60	70	36,10	83,00	50	28,00	90,04	146,33	59,40	0,20	0,26
70	71	36,50	83,00	50	28,10	70,70	93,42	48,30	0,13	0,19
80	71	36,80	84,00	50	28,30	56,36	54,19	35,14	0,08	0,14
90	71	36,50	83,00	50	28,30	47,10	28,86	22,39	0,04	0,11

## **APÊNDICE B**

DADOS DOS AJUSTES À CINÉTICA DE SECAGEM

**Tabela B.1:** Qualidade do modelo Andrade e Faria para a secagem de pataqueira (PN) em secador de leito fixo.

Corridas	R <sup>2</sup> (%)	Parâmetros	Gráfico 2D	Resíduos		Avaliação
				Distribuição	Faixa	
01	-	-	-	-	-	-
02	0,9938	k = 0,0229 n = 1,0003 b = - 2,1310 c = 2,1294	PMP	Tendencioso	- 0,0198 + 0,0134	Adequado
03	0,9993	k = 0,0189 n = - 0,3391 b = 0,3615 c = - 0,0011	PMP	Sistemático	- 0,0067 + 0,0070	Inadequado
04	0,9938	k = - 0,0076 n = 0,9975 b = - 1,3904 c = 1,3520	TMP	Sistemático	- 0,0126 + 0,0113	Inadequado
05	0,9998	k = 0,0265 n = - 1,3735 b = 37,2181 c = - 0,0009	PMP	Aleatório	- 0,0017 + 0014	Adequado
06	0,9821	k = 0,0193 n = 0,9997 b = - 15,0175 c = 14,9953	NPMP	Sistemático	- 0,0198 + 0245	Inadequado
07	0,9993	k = - 0,0093 n = 1,0049 b = - 0,1654 c = 0,1446	PMP	Sistemático	- 0,0057 + 0069	Inadequado
08	0,9999	k = - 0,0088 n = 0,6665 b = 0,0107 c = - 0,0255	PMP	Aleatório	- 0,0011 + 0008	Adequado
09	1,0000	k = 0,0425 n = - 0,6526 b = 2,0227 c = - 0,0016	PTP	Aleatório	- 0,0000 + 0,0000	Adequado
10	0,9909	k = - 0,0056 n = 0,9968 b = - 2,1685 c = 2,1189	TMP	Sistemático	- 0,0092 + 0,0104	Inadequado
11	-	-	-	-	-	-
12	0,9942	k = 0,0115 n = 0,9998 b = - 8,6989 c = 8,6870	TMP	Sistemático	- 0,0090 + 0,0121	Inadequado
13	0,9901	k = 0,0137 n = 0,9833 b = - 0,1767 c = 0,1610	NPMP	Sistemático	- 0,0065 + 0,0071	Inadequado
14	0,9943	k = 0,0145 n = 0,9994 b = - 3,6926 c = 3,6801	TMP	Sistemático	- 0,0081 + 0,0089	Inadequado

**Tabela B.2:** Qualidade do modelo Page para a secagem de pataqueira (PN) em secador de leito fixo.

Corridas	R <sup>2</sup> (%)	Parâmetros		Gráfico 2D	Resíduos		Avaliação
					Distribuição	Faixa	
01	-	-	-	-	-	-	-
02	0,9926	k = 0,0018	n = 1,8144	TMP	Tendencioso	- 0,0199 + 0,0121	Inadequado
03	0,9983	k = 0,0043	n = 1,3477	TMP	Sistemático	- 0,0144 + 0,0097	Inadequado
04	0,9991	k = 0,0022	n = 1,6161	TMP	Aleatório	- 0,0049 + 0,0018	Adequado
05	0,9996	k = 0,0019	n = 1,5807	TMP	Sistemático	- 0,0013 + 0,0024	Inadequado
06	0,9986	k = 0,0094	n = 1,3730	TMP	Tendencioso	- 0,0074 + 0,0074	Inadequado
07	0,9986	k = 0,0040	n = 1,4018	TMP	Sistemático	- 0,0134 + 0,0071	Inadequado
08	0,9983	k = 0,0037	n = 1,4004	TMP	Sistemática	- 0,0101 + 0,0084	Inadequado
09	0,9998	k = 0,0074	n = 1,3787	PMP	Aleatória	- 0,0010 + 0,0013	Adequado
10	0,9966	k = 0,0041	n = 1,5142	TMP	Sistemático	- 0,0027 + 0,0094	Inadequado
11	-	-	-	-	-	-	-
12	0,9987	k = 0,0023	n = 1,5169	PMP	Sistemático	- 0,0069 + 0,0032	Inadequado
13	0,9997	k = 0,0009	n = 1,8344	PMP	Sistemático	- 0,0015 + 0,0016	Inadequado
14	0,9983	k = 0,0022	n = 1,6055	TMP	Sistemático	- 0,0036 + 0,0044	Inadequado

**Tabela B.3:** Qualidade do modelo Polinomial para a secagem de pataqueira (PN) em secador de leito fixo.

Corridas	R <sup>2</sup> (%)	Parâmetros	Gráfico 2D	Resíduos		Avaliação
				Distribuição	Faixa	
01	-	-	-	-		-
02	0,9999	a = 1,1538 b = - 0,0308 c = 0,00020	PTP	Aleatório	- 0,0011 + 0,0011	Adequado
03	0,9999	a = 1,0261 b = - 0,0144 c = 0,00005	PMP	Aleatório	- 0,0033 + 0,0039	Adequado
04	0,9947	a = 0,9491 b = - 0,0173 c = 0,00008	TMP	Sistemático	- 0,0114 + 0,0086	Inadequado
05	0,9999	a = 1,1118 b = - 0,0186 c = 0,00008	PTP	Aleatório	- 0,0007 + 0,0007	Adequado
06	0,9962	a = 0,9237 b = - 0,0228 c = 0,00014	TMP	Sistemático	- 0,0138 + 0,0171	Inadequado
07	0,9997	a = 1,0667 b = - 0,0171 c = 0,00007	PMP	Sistemático	- 0,0043 + 0,0037	Inadequado
08	0,9999	a = 1,0628 b = - 0,0158 c = 0,00006	PMP	Aleatório	- 0,0025 + 0,0021	Adequado
09	1,0000	a = 1,0063 b = - 0,0234 c = 0,00014	PTP	Aleatório	- 0,0000 + 0,0000	Adequado
10	0,9880	a = 0,7644 b = - 0,0145 c = 0,00007	NPMP	Sistemático	- 0,0101 + 0,0102	Inadequado
11	-	-	-	-		-
12	0,9994	a = 0,9895 b = - 0,0146 c = 0,00006	TMP	Sistemático	- 0,0028 + 0,0039	Inadequado
13	0,9999	a = 1,1693 b = - 0,0230 c = 0,00012	TMP	Aleatório	- 0,0006 + 0,0006	Adequado
14	1,0000	a = 1,0457 b = - 0,0198 c = 0,00010	PMP	Aleatório	- 0,0001 + 0,0001	Adequado

**Tabela B.4:** Qualidade do modelo Wang e Singh para a secagem de pataqueira (PN) em secador de leito fixo.

Corridas	R <sup>2</sup> (%)	Parâmetros	Gráfico 2D	Resíduos		Avaliação
				Distribuição	Faixa	
01	-	-	-	-	-	-
02	0,9969	a = - 0,0237    b = 0,00010	TMP	Tendencioso	- 0,0077    + 0,0107	Adequado
03	0,9995	a = - 0,0137    b = 0,00005	PMP	Sistemático	- 0,0052    + 0,0099	Inadequado
04	0,9934	a = - 0,0186    b = 0,00009	TMP	Tendencioso	- 0,0114    + 0,0088	Inadequado
05	0,9992	a = - 0,0156    b = 0,00006	TMP	Sistemático	- 0,0028    + 0,0021	Inadequado
06	0,9919	a = - 0,0257    b = 0,00017	TMP	Sistemático	- 0,0247    + 0,0182	Inadequado
07	0,9981	a = - 0,0148    b = 0,00005	TMP	Sistemático	- 0,0063    + 0,0168	Inadequado
08	0,9985	a = - 0,0136    b = 0,00004	TMP	Sistemático	- 0,0066    + 0,0107	Inadequado
09	0,9999	a = - 0,0232    b = 0,00014	PMP	Aleatório	- 0,0002    + 0,0001	Adequado
10	0,9390	a = - 0,0203    b = 0,00001	NPMP	Sistemático	- 0,0266    + 0,0229	Inadequado
11	-	-	-	-	-	-
12	0,9994	a = - 0,0149    b = 0,00006	PMP	Sistemático	- 0,0034    + 0,0040	Inadequado
13	0,9977	a = - 0,0184    b = 0,00008	TMP	Sistemático	- 0,0034    + 0,0038	Inadequado
14	0,9997	a = - 0,0184    b = 0,00008	TMP	Sistemático	- 0,0018    + 0,0023	Inadequado

## **APÊNDICE C**

DADOS EXPERIMENTAIS E DE AJUSTES A MODELOS CINÉTICOS OBTIDOS NA  
SECAGEM DA PATAQUEIRA HIDROPÔNICA EM SECADOR CONVECTIVO DE  
LEITO FIXO

**Tabela C. 1:** Dados experimentais obtidos a partir da corrida experimental 1

t	T <sub>S</sub>	T <sub>BU</sub>	T <sub>BS</sub>	UR	T <sub>AMB</sub>	m (t)	X <sub>BS</sub>	X <sub>BU</sub>	X <sub>R</sub>	W
0	55	30,50	62,0	51	26,90	300,00	647,01	86,61	1,00	0,40
5	58	31,70	68,0	51	27,00	289,97	622,04	86,15	0,96	0,40
10	61	33,50	68,0	51	27,20	275,25	585,38	85,41	0,90	0,40
15	61	32,50	68,0	52	27,40	259,17	545,34	84,50	0,84	0,40
20	62	35,00	70,0	52	27,50	240,43	498,68	83,30	0,77	0,40
25	62	34,40	71,0	52	27,60	226,78	464,69	82,29	0,72	0,40
30	63	36,20	71,0	52	27,70	212,19	428,36	81,07	0,66	0,40
40	63	36,50	72,0	53	28,00	181,37	351,62	77,86	0,54	0,40
50	62	37,40	72,0	55	28,20	151,70	277,74	73,53	0,43	0,40
60	63	37,80	74,0	56	28,40	127,87	218,40	68,59	0,34	0,40

**Tabela C. 2:** Dados experimentais obtidos a partir da corrida experimental 2

t	T <sub>S</sub>	T <sub>BU</sub>	T <sub>BS</sub>	UR	T <sub>AMB</sub>	m (t)	X <sub>BS</sub>	X <sub>BU</sub>	X <sub>R</sub>	W
0	73	36,00	77,0	58	29,60	300,00	948,73	90,46	1,00	0,43
5	80	37,80	83,5	58	29,80	275,84	864,28	89,63	0,91	0,43
10	81	39,00	86,5	58	30,30	247,82	766,32	88,46	0,81	0,43
15	81	39,60	86,0	59	30,30	223,89	682,67	87,22	0,72	0,43
20	82	40,00	87,0	59	30,50	199,45	597,23	85,66	0,63	0,43
25	80	40,60	87,0	59	30,50	179,76	528,40	84,09	0,56	0,43
30	80	40,70	87,0	59	30,60	160,55	461,25	82,18	0,49	0,40
40	81	40,80	87,0	58	30,70	123,30	331,03	76,80	0,35	0,30
50	81	41,00	88,5	58	30,90	93,84	228,04	69,52	0,24	0,23
60	81	41,60	89,0	57	31,00	72,50	153,44	60,54	0,16	0,17

**Tabela C. 3:** Dados experimentais obtidos a partir da corrida experimental 4

t	T <sub>S</sub>	T <sub>BU</sub>	T <sub>BS</sub>	UR	T <sub>AMB</sub>	m (t)	X <sub>BS</sub>	X <sub>BU</sub>	X <sub>R</sub>	W
0	59	34,50	67,0	56	27,80	300,00	641,66	86,52	1,00	0,53
5	70	35,80	76,0	55	28,30	283,64	601,21	85,74	0,94	0,53
10	78	37,50	81,0	56	28,30	262,56	549,10	84,59	0,86	0,53
15	81	38,40	85,0	56	28,50	241,53	497,11	83,25	0,77	0,53
20	80	38,00	85,0	55	28,70	219,33	442,24	81,56	0,69	0,53
25	81	39,50	86,0	55	28,80	200,39	395,40	79,81	0,62	0,53
30	81	40,00	87,0	55	29,00	179,08	342,73	77,41	0,53	0,53
40	81	41,00	87,0	55	29,20	141,79	250,54	71,47	0,39	0,53
50	80	41,00	87,0	54	29,30	106,22	162,59	61,92	0,25	0,52
60	80	41,20	87,0	54	29,40	79,63	96,87	49,21	0,15	0,29
70	80	41,70	87,5	58	30,20	61,07	50,98	33,77	0,08	0,16
80	80	42,00	87,5	59	30,50	50,56	24,98	19,99	0,04	0,09
90	81	41,30	88,0	60	30,30	45,53	12,55	11,15	0,02	0,05
100	81	42,40	88,0	62	30,70	43,10	6,55	6,15	0,01	0,03
110	81	42,50	88,0	60	30,20	42,79	5,80	5,48	0,01	0,02
120	81	41,70	88,0	58	30,10	42,71	5,58	5,29	0,01	0,01

**Tabela C. 4:** Dados experimentais obtidos a partir da corrida experimental 9

t	T <sub>S</sub>	T <sub>BU</sub>	T <sub>BS</sub>	UR	T <sub>AMB</sub>	m (t)	X <sub>BS</sub>	X <sub>BU</sub>	X <sub>R</sub>	W
0	63	36,20	68,0	58	30,40	200,00	584,95	85,40	1,00	0,35
5	69	37,80	74,0	59	30,80	182,86	526,25	84,03	0,90	0,35
10	71	37,50	76,0	59	31,00	170,98	485,56	82,92	0,83	0,35
15	72	39,00	79,0	59	31,20	156,91	437,38	81,39	0,75	0,35
20	71	38,80	78,0	60	31,30	145,06	396,79	79,87	0,68	0,35
25	71	38,70	78,0	59	31,40	134,45	360,46	78,28	0,62	0,35
30	71	39,20	79,0	59	31,50	123,52	323,02	76,36	0,55	0,35
40	72	39,80	80,0	58	31,50	103,92	255,90	71,90	0,44	0,27
50	71	39,60	80,0	58	31,60	87,94	201,17	66,80	0,34	0,21
60	71	39,00	80,0	57	31,40	75,38	158,16	61,26	0,27	0,17

**Tabela C. 5:** Dados experimentais obtidos a partir da corrida experimental no PC

t	T <sub>S</sub>	T <sub>BU</sub>	T <sub>BS</sub>	UR	T <sub>AMB</sub>	m (t)	X <sub>BS</sub>	X <sub>BU</sub>	X <sub>R</sub>	W
0	62	35,00	65,0	57	30,00	300,00	856,59	89,55	1,00	0,26
5	70	37,40	75,0	59	30,40	292,59	832,96	89,28	0,97	0,26
10	73	37,50	79,0	60	30,50	276,34	781,15	88,65	0,91	0,26
15	71	38,00	78,0	60	30,50	261,36	733,38	88,00	0,86	0,26
20	71	37,80	79,0	60	30,50	246,07	684,63	87,26	0,80	0,26
25	71	37,90	79,0	60	30,70	232,69	641,96	86,52	0,75	0,26
30	71	38,60	80,0	60	30,80	220,39	602,74	85,77	0,70	0,26
40	72	39,00	81,0	59	31,10	196,72	527,27	84,06	0,62	0,26
50	72	39,70	82,0	59	31,30	174,75	457,21	82,05	0,53	0,20
60	71	39,40	81,0	58	31,20	155,91	397,14	79,88	0,46	0,17
70	70	40,00	80,0	59	31,10	140,71	348,67	77,71	0,41	0,15
80	70	39,80	80,0	59	31,30	127,03	305,05	75,31	0,36	0,13
90	70	39,70	80,0	58	31,30	113,94	263,31	72,48	0,31	0,12

**Tabela C.6:** Qualidade dos modelos cinéticos (Andrade e Faria; Page) para a secagem de pataqueira (PH) em secador de leito fixo

MODELO DE ANDRADE E FARIA							
Corridas	R <sup>2</sup> (%)	Parâmetros		Gráfico 2D	Resíduos		Avaliação
					Distribuição	Faixa	
01	-	-		-	-		-
02	0,9999	k = 0,0380 n = - 0,0980	b = 0,3595 c = - 0,0030	PMP	Aleatório	- 0,0023 + 0,0012	Adequado
04	0,9943	k = 0,4813 n = - 3,4719	b = 137373,9 c = - 0,0000	PMP	Sistemático	- 0,0073 + 0,0109	Inadequado
09	0,9998	k = 0,0433 n = - 0,2150	b = 0,5247 c = - 0,0028	PMP	Aleatório	- 0,0015 + 0,0008	Adequado
14	0,9753	k = - 0,0006 n = 0,3383	b = - 0,1653 c = - 0,0030	PMP	Tendencioso	-0,0105 + 0,0107	Adequado

MODELO DE PAGE							
Corridas	R <sup>2</sup> (%)	Parâmetros		Gráfico 2D	Resíduos		Avaliação
					Distribuição	Faixa	
01	-	-		-	-		-
02	0,9999	k = 0,0076 n = 1,3363		PMP	Tendencioso	- 0,0007 + 0,0014	Adequado
04	0,9926	k = 0,0024 n = 1,6198		PMP	Sistemático	- 0,0073 + 0,0130	Inadequado
09	0,9998	k = 0,0074 n = 1,3787		PMP	Aleatório	- 0,0074 + 0,0012	Adequado
14	0,9929	k = 0,0018 n = 1,6653		NPMP	Sistemático	- 0,0078 + 0,0051	Inadequado

**Tabela C. 7:** Qualidade dos modelos cinéticos: Polinomial; Wang e Singh; na secagem de pataqueira (PH) em secador de leito fixo

MODELO POLINOMIAL							
Corridas	R <sup>2</sup> (%)	Parâmetros		Gráfico 2D	Resíduos		Avaliação
					Distribuição	Faixa	
01	-	-		-	-		-
02	1,0000	a = 1,0746 b = - 0,0240	c = 0,0001	PTP	Aleatório	- 0,0002 + 0,0002	Adequado
04	0,9852	a = 0,9116 b = - 0,0175	c = 0,0001	TMP	Tendenciosa	- 0,0134 + 0,0119	Inadequado
09	1,0000	a = 1,0063 b = - 0,0234	c = 0,0001	PTP	Aleatório	- 0,0000 + 0,0000	Adequado
14	0,9999	a = 1,1693 b = - 0,0230	c = 0,0001	PMP	Aleatório	- 0,0006 + 0,0006	Inadequado

MODELO DE WANG E SINGH							
Corridas	R <sup>2</sup> (%)	Parâmetros		Gráfico 2D	Resíduos		Avaliação
					Distribuição	Faixa	
01	-	-		-	-		-
02	0,9990	a = - 0,0206	b = 0,0001	PMP	Sistemático	- 0,0041 + 0,0049	Inadequada
04	0,9802	a = - 0,0197	b = 0,0001	NPMP	Sistemático	- 0,0186 + 0,0160	Inadequada
09	1,0000	a = - 0,0232	b = 0,0001	PMP	Aleatório	- 0,0002 + 0,0001	Adequada
14	0,9977	a = - 0,0184	b = 0,0001	PMP	Sistemático	0,0034 + 0,0038	Inadequada

## **APÊNDICE D**

CÁLCULO DA VAZÃO DO AR DE SECAGEM

O cálculo da velocidade média do ar de secagem  $v_s$  (m/s) em função da deflexão manométrica  $D_{fm}$ , constante, da vazão volumétrica  $Q_v$  (m<sup>3</sup>/s) e da vazão mássica  $Q_m$  (kg/s), em função da massa específica do ar de secagem, é realizado por meio das Equações D.1, D.2 e D.3. com auxílio do aplicativo PSI.BAS (PENA JÚNIOR, 1994) para estimativa de  $Y$ ,  $v_E$  e  $\rho$ . O cálculo da velocidade média do ar de secagem foi efetuado com auxílio da Equação D.4 (MOTT, 1994), em função da massa específica do ar ( $\rho$ ) e da massa específica do fluido manométrico, água destilada ( $\rho_m = 1000$  kg/m<sup>3</sup>). O valor da deflexão manométrica corrigida,  $h$ , é dado pela Equação D.5. Os resultados constam na Tabela D.1.

**Tabela D.1:** Cálculo das vazões do ar de secagem

Corridas	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>BS</sub> * (°C)	T <sub>BU</sub> * (°C)	Y (kg/kg a.s.)	v <sub>E</sub> (m <sup>3</sup> /kg)	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	v <sub>s</sub> (m/s)	Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>m</sub> (kg/s)
01	60	74,0	36,5	0,0236	1,0208	1,0028	18,4945	0,0817	0,0819
02	80	91,0	40,5	0,0281	1,0782	0,9535	18,9671	0,0838	0,0799
03	60	75,5	37,9	0,0268	1,0303	0,9966	18,5520	0,0820	0,0817
04	80	90,3	39,2	0,0244	1,0700	0,9574	18,9284	0,0836	0,0801
05	60	71,7	36,3	0,0240	1,0147	1,0092	18,4357	0,0814	0,0822
06	80	90,3	39,2	0,0244	1,0700	0,9574	18,9284	0,0836	0,0801
07	60	72,3	35,3	0,0212	1,0120	1,0091	18,4367	0,0814	0,0822
08	80	89,6	38,7	0,0232	1,0660	0,9599	18,9037	0,0835	0,0802
09	70	81,0	38,0	0,0248	1,0433	0,9823	18,6867	0,0826	0,0811
10	70	82,4	38,4	0,0253	1,0483	0,9781	18,7268	0,0827	0,0809
11	70	81,7	37,8	0,0239	1,0439	0,9808	18,7010	0,0826	0,0810
12	70	81,7	36,1	0,0193	1,0365	0,9834	18,6763	0,0825	0,0811
13	70	81,4	36,7	0,0210	1,0384	0,9833	18,6772	0,0825	0,0811
14	70	82,3	37,1	0,0217	1,0422	0,9804	18,7048	0,0826	0,0810
<b>Valores médios</b>								0,0826	0,0810

\* valores médios.

$$Qv = v.A \quad (D.1)$$

$$Qm = \rho.v_s.A = \rho.Qv \quad (D.2)$$

$$\rho = \frac{1+Y}{v_s} \quad (D.3)$$

$$v = \sqrt{2gh \left( \frac{\rho_m - \rho}{\rho} \right)} \quad (D.4)$$

$$h = Dfm.\text{sen}30^\circ \quad (D.5)$$

A área seção transversal do tubo de entrada do ar de secagem (**A**) foi 0,004418 m<sup>2</sup>, A deflexão manométrica (**Dfm**) lida no manômetro inclinado do secador de leito fixo foi 3,5 cm, sendo que o valor da deflexão manométrica corrigida (**h**) resulta 0,0175 m (Equação D.5).