

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**SECAGEM CONVECTIVA DE FOLHAS DE HORTELÃ: ANÁLISE BASEADA NO AJUSTE DE
CORRELAÇÕES EMPÍRICAS, SUPERFÍCIES DE RESPOSTAS E REDES NEURAIS**

Ariany Binda Silva Costa

SÃO CARLOS
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**SECAGEM CONVECTIVA DE FOLHAS DE HORTELÃ: ANÁLISE BASEADA NO AJUSTE DE
CORRELAÇÕES EMPÍRICAS, SUPERFÍCIES DE RESPOSTAS E REDES NEURAIS**

Ariany Binda Silva Costa

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientadora: Prof.^a Maria do Carmo Ferreira

Co-orientador: Prof.^o Fábio Bentes Freire

SÃO CARLOS
2013

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

C837sc Costa, Ariany Binda Silva.
Secagem convectiva de folhas de hortelã : análise baseada no ajuste de correlações empíricas, superfícies de respostas e redes neurais / Ariany Binda Silva Costa. -- São Carlos : UFSCar, 2013.
91 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2013.

1. Engenharia química. 2. Secagem. 3. Modelagem empírica. I. Título.

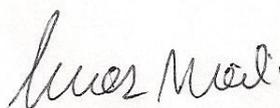
CDD: 660 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
ARIANY BINDA SILVA COSTA APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SÃO CARLOS, EM 15 DE MARÇO DE 2013.

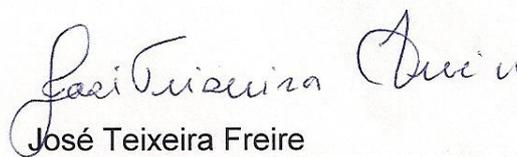
BANCA EXAMINADORA:



Maria do Carmo Ferreira
Orientadora, UFSCar



Lucas Meili
UFSM



José Teixeira Freire
UFSCar

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Wantuil Costa e Tânia Mara Silva Costa.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado força e perseverança para poder completar mais esta etapa.

Aos meus pais, Wantuil e Tânia, e minha irmã, Alana, pelo amor incondicional, confiança e apoio. Eles são tudo na minha vida.

Aos meus avós e familiares por compreenderem a minha ausência durante estes anos que estive em São Carlos.

Ao meu amor, Robson Costa de Sousa, pelo incentivo, paciência, companheirismo, amor e compreensão.

Aos meus orientadores, professora Maria do Carmo Ferreira e professor Fábio Bentes Freire, pela oportunidade, amizade, orientação e pelos ensinamentos. Serei eternamente grata a tudo que me foi proporcionado.

Ao professor José Teixeira Freire pelo carinho, amizade, incentivo e pelas sugestões dadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos demais professores do Centro de Secagem, Demerval José Mazzini Sartori e Ronaldo Guimarães Corrêa, pelas contribuições dadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Lucas Meili por ter aceitado o convite para participar da minha defesa.

Aos meus amigos Maisa e Hugo por me acolherem com muito carinho, durante as minhas primeiras semanas em São Carlos.

A minha amiga e companheira de apê, Isabela, pela amizade, bons conselhos e momentos de descontração.

Aos meus amigos do Centro de Secagem, Bruna, Renata, Maisa, Hugo, Giovana, Gustavo, Tiago e Aline, pela boa vontade em ajudar, pelos momentos agradáveis e boas gargalhadas.

Aos Técnicos, Edilson Milaré, Oscar da Silva e Adilson Mota pelo apoio prestado.

Aos amigos que fiz em São Carlos pelo companheirismo e amizade. Durante estes anos que passaram, se tornaram minha família.

Aos meus amigos capixabas pelo carinho e torcida. Pois mesmo com a distância se fizeram sempre presentes.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor,
mas lutei para que o melhor fosse feito.
Não sei o que deveria ser, mas graças a Deus,
não sou o que era antes.”*
(Marthin Luther King)

RESUMO

A *Mentha x villosa* H. é uma espécie de hortelã conhecida popularmente como hortelã comum. Além de ser uma folha muito utilizada na culinária, o seu óleo essencial apresenta muitos benefícios a saúde, sendo empregado na produção de medicamentos e também de cosméticos. Para conservar suas propriedades, a secagem é uma alternativa interessante, porém por apresentarem compostos aromáticos em sua composição e ser um material muito frágil, o aquecimento deve ser moderado e as técnicas de secagem adequadas. Desta forma, no presente trabalho foram estudadas a secagem em leitos rasos de folhas de hortelã em dois tipos de equipamento, uma estufa com convecção natural e um secador convectivo horizontal com convecção forçada. Primeiramente o material foi caracterizado, tendo-se determinado as dimensões das folhas, densidade aparente e umidade da folha *in natura*. Nos experimentos realizados em estufa analisou-se como a cinética de secagem das folhas é influenciada pela temperatura do ar, o tamanho das folhas e o estágio de crescimento das mesmas. No secador convectivo, analisou-se a cinética de secagem variando a temperatura, a velocidade do ar e a massa das folhas. Os resultados mostraram que o tamanho e o estágio de crescimento das folhas não influenciaram a secagem na estufa. Ao analisar a influência das condições investigadas no secador convectivo, a temperatura apresentou maior influência na redução de umidade. Em seguida seis modelos empíricos e semi-empíricos de secagem foram ajustados aos dados experimentais. Os modelos de Page e de Henderson Pabis foram os mais apropriados para representar as curvas de cinética, dependendo da massa da amostra. Para complementar a análise dos modelos, utilizou-se a técnica de regressão múltipla e construiu-se modelos identificando as variáveis que exercem mais influência sobre a MR e o tempo de secagem. Também foi construída uma rede neural para simular os dados experimentais. A rede construída necessitou de cinco neurônios para representar satisfatoriamente as curvas de cinética, visto que o material apresentou algumas peculiaridades durante os ensaios devido as suas características.

ABSTRACT

Mentha x villosa H. is a species of mint popularly known as regular mint. Besides being widely used as a spice, their leaves yield an essential oil with many healthy compounds that are commonly used in formulation of medicinal and cosmetic products. Convective drying is an interesting alternative to preserve such compounds, but because the oils are rich in aromatic constituents, and the leaves are fragile material, heating must be moderate and proper drying techniques have to be used. In the present work, the drying of mint leaves was investigated in two types of equipment, namely a natural convection oven and a forced convection horizontal dryer. The fresh leaves were initially characterized by measuring their dimensions, bulk density and moisture content. The influence of air temperature, size and growing stage of leaves on the drying kinetic curves was investigated initially for drying in the natural convection oven. The results showed that only the temperature affected the drying rates, while the size or growing stage had no significantly effect on the process. For forced convective drying, the influence of air temperature, air velocity and mass of the samples was investigated. The temperature was the variable with stronger influence on the drying curves. The mass of the sample affected the drying kinetics only at the highest temperature (60 °C), while the influence of air velocity was weak for most conditions. Empirical and semi-empirical models were fitted to experimental data of dimensionless moisture content versus time. The models from Page and Henderson-Pabis provided the best fittings to the experimental data, depending on the mass of the sample. To complement the analysis, multiple regression models based on surface responses were fitted to experimental data. Also, a neural network model was built to simulate experimental data. The resulting network needed seven neurons to represent satisfactorily the drying kinetic data, and provided excellent estimates of experimental results.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - HORTELÃ-COMUM.	5
FIGURA 2.2 - CURVAS DE (A) VARIAÇÃO DA UMIDADE EM BASE SECA EM FUNÇÃO DO TEMPO (S) E (B) TAXA DE SECAGEM DO MATERIAL EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE EM BASE SECA (X).	7
FIGURA 2.3 - REPRESENTAÇÃO DO DELINEAMENTO DO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL 2^2	15
FIGURA 2.4 - MODELO NÃO-LINEAR DE NEURÔNIOS.	18
FIGURA 3.1 - RAMO DE HORTELÃ OBTIDO DO FORNECEDOR.	22
FIGURA 3.2 – ILUSTRAÇÃO DOS DIÂMETROS MÁXIMO (A), MÍNIMO (B) E MÉDIO (C).	23
FIGURA 3.3 - REPRESENTAÇÃO DOS LOCAIS ONDE FORAM MEDIDOS AS ESPESSURAS DAS FOLHAS.	23
FIGURA 3.4 - ESTUFA.	24
FIGURA 3.5 - ILUSTRAÇÃO DAS FOLHAS CORTADAS EM (A) DUAS PARTES E (B) QUATRO PARTES.	25
FIGURA 3.6 - SECADOR CONVECTIVO. 1) SOPRADOR; 2) AQUECEDOR ELÉTRICO; 3) VARIAC; 4) SISTEMA DE HOMOGENEIZAÇÃO; 5) CÂMARA DE SECAGEM.	26
FIGURA 3.7 - LATERAL DA CÂMARA DE SECAGEM.	27
FIGURA 3.8 - CÉLULAS DE MEDIDAS UTILIZADAS NOS EXPERIMENTOS.	27
FIGURA 3.9 - ESQUEMA DA ESTRUTURA DA REDE NEURAL.	31
FIGURA 4.1 - FOTOS DAS FOLHAS NO (A) ESTÁGIO UM E (B) ESTÁGIO DOIS.	33
FIGURA 4.2 - UMIDADE ADIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS ENSAIOS REALIZADOS EM UMA ESTUFA A TEMPERATURA DE 40°C PARA FOLHAS INTEIRAS DO (A) PRIMEIRO E (B) SEGUNDO ESTÁGIO E SUAS RÉPLICAS.	34
FIGURA 4.3 - UMIDADE ADIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS ENSAIOS REALIZADOS EM UMA ESTUFA A TEMPERATURA DE 40°C PARA FOLHAS CORTADAS EM DUAS PARTES DO (A) PRIMEIRO E (B) SEGUNDO ESTÁGIO E SUAS RÉPLICAS;	35

FIGURA 4.4 - UMIDADE ADIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS ENSAIOS REALIZADOS EM UMA ESTUFA A TEMPERATURA DE 40°C PARA FOLHAS CORTADAS EM QUATRO PARTES DO (A) PRIMEIRO E (B) SEGUNDO ESTÁGIO E SUAS RÉPLICAS;	36
FIGURA 4.5 - GRÁFICOS (A) MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PRIMEIRO ESTÁGIO E (B) MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O SEGUNDO ESTÁGIO, AMBOS PARAMETRIZADOS NO TAMANHO DA FOLHA, RESULTANTE DA SECAGEM A 40°C.....	37
FIGURA 4.6 - GRÁFICOS DE (A) MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PRIMEIRO ESTÁGIO E (B) MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O SEGUNDO ESTÁGIO, AMBOS PARAMETRIZADOS NO TAMANHO DA FOLHA, RESULTANTE DA SECAGEM A 50°C.....	38
FIGURA 4.7 - UMIDADE ADIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS ENSAIOS REALIZADOS À TEMPERATURA DE 40°C, PARAMETRIZADO NO ESTÁGIO DA FOLHA.	39
FIGURA 4.8 - GRÁFICOS DE (A) MR EM FUNÇÃO DO TEMPO E (B) TAXA DE SECAGEM EM FUNÇÃO DE MR, AMBOS PARA O ENSAIO COM FOLHAS INTERIAS, PARAMETRIZADO NA TEMPERATURA.	40
FIGURA 4.9 - RAZÃO DE UMIDADE EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS ENSAIOS A TEMPERATURA DE 64°C E VELOCIDADE DE 1,5M/S.	41
FIGURA 4.10 - GRÁFICOS DE (A) MR EM FUNÇÃO DO TEMPO E (B) TAXA DE SECAGEM EM FUNÇÃO DE MR, AMBOS PARA O ENSAIO COM AMOSTRA DE 18 GRAMAS, TEMPERATURA DO AR 50°C E VELOCIDADE IGUAL A 1,0M/S.	42
FIGURA 4.11 - GRÁFICOS DE MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA AS AMOSTRAS COM 18 GRAMAS E VELOCIDADE DO AR DE (A) 1,0M/S E (B) 2,0 M/S, AMBOS PARAMETRIZADOS NA TEMPERATURA.	43
FIGURA 4.12 - GRÁFICOS DE MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA AS AMOSTRAS COM 30 GRAMAS E VELOCIDADE DO AR DE (A) 1,0 M/S E (B) 2,0M/S, AMBOS PARAMETRIZADOS NA TEMPERATURA.....	44
FIGURA 4.13 - GRÁFICOS DE MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA AS AMOSTRAS COM 18 GRAMAS E TEMPERATURA DO AR DE (A) 36°C E (B) 64°C, AMBOS PARAMETRIZADOS NA VELOCIDADE DO AR.....	45
FIGURA 4.14 - GRÁFICOS DE MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA AS AMOSTRAS COM 30 GRAMAS E TEMPERATURA DO AR DE (A) 36°C E (B) 64°C, AMBOS PARAMETRIZADO NA VELOCIDADE DO AR.	46
FIGURA 4.15 - GRÁFICOS DE MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS ENSAIOS REALIZADOS À TEMPERATURA DO AR DE 36°C E VELOCIDADE DO AR DE (A) 1,0M/S E (B) 2,0M/S, AMBOS PARAMETRIZADOS NA MASSA DA AMOSTRA.	47

FIGURA 4.16 - GRÁFICOS DE MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS ENSAIOS REALIZADOS A TEMPERATURA DO AR DE 50°C E VELOCIDADE DO AR DE (A) 1,0M/S E (B) 2,0 M/S, AMBOS PARAMETRIZADOS NA MASSA DA AMOSTRA.	48
FIGURA 4.17 - GRÁFICOS DE MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS ENSAIOS REALIZADOS A TEMPERATURA DO AR DE 64°C E VELOCIDADE DO AR DE (A) 1,0M/S (B) 2,0M/S, AMBOS PARAMETRIZADOS NA MASSA DA AMOSTRA.	49
FIGURA 4.18 – DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUO DOS MODELOS DE (A) DOIS TERMOS E DE (B) PAGE PARA TODAS AS CONDIÇÕES OBTIDAS NO PLANEJAMENTO EM AMOSTRAS COM 42 GRAMAS.	55
FIGURA 4.19 - DIAGRAMA DE PARETO PARA O MODELO DO MR.....	57
FIGURA 4.20 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DA RAZÃO DE UMIDADE EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DA VELOCIDADE DO AR PARA AMOSTRA COM 30 GRAMAS.....	59
FIGURA 4.21 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DA RAZÃO DE UMIDADE EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO AR E A MASSA DAS AMOSTRAS PARA VELOCIDADE DE 1,5M/S.....	59
FIGURA 4.22 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DA RAZÃO DE UMIDADE EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO AR E A MASSA DAS AMOSTRAS PARA TEMPERATURA DE 50°C.....	60
FIGURA 4.23 - DIAGRAMA DE PARETO PARA O MODELO DO TEMPO DE PROCESSO.....	61
FIGURA 4.24 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DO TEMPO DE SECAGEM EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DA VELOCIDADE DO AR PARA AMOSTRA COM 30 GRAMAS.....	63
FIGURA 4.25 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DO TEMPO DE SECAGEM EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E MASSA DA AMOSTRA, PARA VELOCIDADE DE 1,5M/S.....	63
FIGURA 4.26 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DO TEMPO DE SECAGEM EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO AR E DA MASSA DAS AMOSTRAS PARA TEMPERATURA DE 50°C.....	64
FIGURA 4.27 - GRÁFICO DAS SOMA DOS QUADRADOS DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE NEURÔNIOS.	66
FIGURA 4.28 - COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES EXPERIMENTAIS E PREDITOS OBTIDOS DA REDE NEURAL.....	66
FIGURA 4.29 - CINÉTICA DE SECAGEM PARA AS AMOSTRAS COM (A) 18, (B) 30 E (C) 42 GRAMAS.	67
FIGURA 4.30 - ESTRUTURA DA REDE NEURAL.....	68

- FIGURA A.1** - UMIDADE ADIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS ENSAIOS REALIZADOS EM UMA ESTUFA A TEMPERATURA DE 50°C PARA FOLHAS INTEIRAS DO (A) PRIMEIRO E (B) SEGUNDO ESTÁGIO E SUAS RÉPLICAS; 79
- FIGURA A.2** - UMIDADE ADIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS ENSAIOS REALIZADOS EM UMA ESTUFA A TEMPERATURA DE 50°C PARA FOLHAS CORTADAS EM DUAS PARTES DO (A) PRIMEIRO E (B) SEGUNDO ESTÁGIO E SUAS RÉPLICAS;..... 79
- FIGURA A.3** - UMIDADE ADIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS ENSAIOS REALIZADOS EM UMA ESTUFA A TEMPERATURA DE 50°C PARA FOLHAS CORTADAS EM QUATRO PARTES DO (A) PRIMEIRO E (B) SEGUNDO ESTÁGIO E SUAS RÉPLICAS; 80
- FIGURA A.4** - UMIDADE ADIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS ENSAIOS REALIZADOS EM UMA ESTUFA A TEMPERATURA DE 60°C PARA FOLHAS INTEIRAS DO (A) PRIMEIRO E (B) SEGUNDO ESTÁGIO E SUAS RÉPLICAS; 80
- FIGURA A.5** - UMIDADE ADIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS ENSAIOS REALIZADOS EM UMA ESTUFA A TEMPERATURA DE 60°C PARA FOLHAS CORTADAS EM DUAS PARTES DO (A) PRIMEIRO E (B) SEGUNDO ESTÁGIO E SUAS RÉPLICAS;..... 81
- FIGURA A.6** - UMIDADE ADIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS ENSAIOS REALIZADOS EM UMA ESTUFA A TEMPERATURA DE 60°C PARA FOLHAS CORTADAS EM QUATRO PARTES DO (A) PRIMEIRO E (B) SEGUNDO ESTÁGIO E SUAS RÉPLICAS; 81
- FIGURA A.7** - GRÁFICOS DE (A) MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PRIMEIRO ESTÁGIO E (B) MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O SEGUNDO ESTÁGIO, AMBOS PARAMETRIZADOS NO TAMANHO DA FOLHA, RESULTANTE DA SECAGEM A 60°C..... 82
- FIGURA A.8** - UMIDADE ADIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS ENSAIOS REALIZADOS À TEMPERATURA DE 50°C, PARAMETRIZADO NO ESTÁGIO DA FOLHA. 82
- FIGURA A.9** - UMIDADE ADIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS ENSAIOS REALIZADOS À TEMPERATURA DE 60°C, PARAMETRIZADO NO ESTÁGIO DA FOLHA. 83
- FIGURA B.1** - GRÁFICOS DE MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA AS AMOSTRAS COM 18 GRAMAS E VELOCIDADE DO AR DE 1,5 M/S, PARAMETRIZADO NA TEMPERATURA. 85
- FIGURA B.2** - GRÁFICOS DE MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA AS AMOSTRAS COM 30 GRAMAS E VELOCIDADE DO AR DE 1,5 M/S, PARAMETRIZADO NA TEMPERATURA. 85
- FIGURA B.3** - GRÁFICOS DE MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA AS AMOSTRAS COM 42 GRAMAS E VELOCIDADE DO AR DE 1,0 M/S, PARAMETRIZADO NA TEMPERATURA. 86

FIGURA B.4 - GRÁFICOS DE MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA AS AMOSTRAS COM 42 GRAMAS E VELOCIDADE DO AR DE 1,5 M/S, PARAMETRIZADO NA TEMPERATURA.....	86
FIGURA B.5 - GRÁFICOS DE MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA AS AMOSTRAS COM 42 GRAMAS E VELOCIDADE DO AR DE 2,0 M/S, PARAMETRIZADO NA TEMPERATURA.....	87
FIGURA B.6 - GRÁFICOS DE MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA AS AMOSTRAS COM 18 GRAMAS E TEMPERATURA DO AR DE 50°C, PARAMETRIZADO NA VELOCIDADE DO AR.....	87
FIGURA B.7 - GRÁFICOS DE MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA AS AMOSTRAS COM 30 GRAMAS E TEMPERATURA DO AR DE 50°C, PARAMETRIZADO NA VELOCIDADE DO AR.....	88
FIGURA B.8 - GRÁFICOS DE MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA AS AMOSTRAS COM 42 GRAMAS E TEMPERATURA DO AR DE 36°C, PARAMETRIZADO NA VELOCIDADE DO AR.....	88
FIGURA B.9 - GRÁFICOS DE MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA AS AMOSTRAS COM 42 GRAMAS E TEMPERATURA DO AR DE 50°C, PARAMETRIZADO NA VELOCIDADE DO AR.....	89
FIGURA B.10 - GRÁFICOS DE MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA AS AMOSTRAS COM 42 GRAMAS E TEMPERATURA DO AR DE 64°C, PARAMETRIZADO NA VELOCIDADE DO AR.....	89
FIGURA B.11 - GRÁFICOS DE MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS ENSAIOS REALIZADOS À TEMPERATURA DO AR DE 36°C E VELOCIDADE DO AR DE 1,5M/S, PARAMETRIZADO NA MASSA DA AMOSTRA.....	90
FIGURA B.12 - GRÁFICOS DE MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS ENSAIOS REALIZADOS À TEMPERATURA DO AR DE 50°C E VELOCIDADE DO AR DE 1,5M/S, PARAMETRIZADO NA MASSA DA AMOSTRA.....	90
FIGURA B.13 - GRÁFICOS DE MR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS ENSAIOS REALIZADOS À TEMPERATURA DO AR DE 64°C E VELOCIDADE DO AR DE 1,5M/S, PARAMETRIZADO NA MASSA DA AMOSTRA.....	91

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - COMPONENTES VOLÁTEIS DO ÓLEO ORIGINAL DA ESPÉCIE <i>MENTHA X VILLOSA H.</i>	6
TABELA 2.2 - EQUAÇÕES SEMI-EMPÍRICAS PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE ADIMENSIONAL NA SECAGEM EM CAMADA FINA.	12
TABELA 3.1 - PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.	28
TABELA 4.1 - PROPRIEDADES FÍSICAS DO MATERIAL.	32
TABELA 4.2 - RESULTADO DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS MODELOS EM CAMADA FINA PARA AMOSTRA COM 18 GRAMAS.	51
TABELA 4.3 - RESULTADO DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS MODELOS EM CAMADA FINA PARA AMOSTRA COM 30 GRAMAS.	53
TABELA 4.4 - RESULTADO DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS MODELOS EM CAMADA FINA PARA AMOSTRA COM 42 GRAMAS.	54
TABELA 4.5 - COEFICIENTES DE REGRESSÃO PARA MR NO INSTANTE DE 100 MINUTOS.	57
TABELA 4.6 - COEFICIENTES DE REGRESSÃO COM OS COEFICIENTES SIGNIFICATIVOS.	58
TABELA 4.7 - COEFICIENTES DE REGRESSÃO PARA O TEMPO PARA O MR EM 0,004.	61
TABELA 4.8 - COEFICIENTES DE REGRESSÃO COM OS COEFICIENTES SIGNIFICATIVOS.	62

NOMECLATURA

A_{pro}	Área projetada	$[L^2]$
A	Constante da equação da constante de secagem	$[L^2T^{-1}]$
a, b, c	Coefficientes das equações de cinética (Tabela 2.2.)	$[*]$
c_i	Variável codificada	$[-]$
d	Diâmetro	$[L]$
E_a	Energia de ativação	$[]$
K	Número de fatores	$[-]$
k	Constante cinética dos modelos empíricos e semi-empíricos	$[s^{-1}]$
m	Massa	$[M]$
MR	Razão de umidade	$[-]$
N	Número de níveis para cada fator	$[-]$
Pe	Perímetro	$[L]$
R^2	Coefficiente de determinação	$[-]$
R	Constante dos gases	
T	Temperatura	$[\theta]$
t	Tempo	$[T]$
U	Umidade	$[-]$
V_p	Volume aparente	$[L^3]$
v_{AR}	Vazão do ar	$[L^3T^{-1}]$
X	Teor de umidade	$[-]$
x_i	Valor da variável não-codificada	$[-]$
\bar{X}	Valor médio dos níveis mais altos e mais baixos na forma não codificada	$[-]$

Símbolos Gregos

α	Valor da forma codificada	$[-]$
β	Parâmetros relativos a equação 9	$[-]$
ρ_p	Massa específica aparente	$[ML^{-3}]$
λ	Espaçamento	$[L]$

Sub-índice

bs	Base seca
cr	Crítica
E	Equilíbrio
exp	Experimental
i	Inicial
max	Máximo
min	Mínimo
med	Médio
pred	Predito
s	Seca
t	Instante t
u	Úmida

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xiv
NOMECLATURA.....	xv
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Aspectos gerais da hortelã.....	4
2.2 Secagem.....	6
2.2.1 Secagem de plantas medicinais.....	8
2.2.2 Modelos empíricos ou semi-empíricos.....	10
2.3 Planejamento experimental	13
2.4 Redes neurais artificiais	17
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1 Materiais.....	21
3.2 Caracterização das folhas	22
3.3 Equipamento e metodologia	24
3.3.1 Estufa.....	24
3.3.2 Secador convectivo horizontal.....	26
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1 Caracterização das folhas	32
4.2 Secagem.....	33
4.2.1 Estufa.....	33
4.2.2 Secador convectivo horizontal.....	40
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	69
CAPÍTULO 6 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	71
CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
APÊNDICE A	78
APÊNDICE B	84

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Plantas medicinais são aquelas que possuem, em um de seus órgãos ou em todos, substâncias com propriedades terapêuticas. São utilizadas desde os tempos pré-históricos no tratamento de doenças, e sua utilização começou de forma empírica, através do processo de experimentação, até que fossem selecionadas as plantas, raízes e folhas apropriadas a cada sintoma (CUNHA; SILVA; ROQUE, 2003; PACHÚ, 2007; RANDUZ, 2004).

O aumento do consumo de medicamentos fitoterápicos foi significativo nas últimas décadas. Na Europa, no ano de 2007 o mercado atingiu cerca de 7 milhões de dólares. No mercado brasileiro, a Associação Brasileira das Empresas do Setor Fitoterápico (ABIFISA) estimou para o mesmo ano, uma movimentação aproximada de um bilhão de reais (CORRÊA; ALVES, 2008).

O crescimento do mercado de plantas medicinais não é unicamente voltado para a produção de medicamentos. Outros setores com interesse nestas matérias primas são os de higiene pessoal, perfumaria e cosméticos. As indústrias destes setores estão investindo na biodiversidade brasileira para produção de essências usadas em produtos como batons, desodorantes, cremes de barbear, águas de colônia, bronzeadores, esmaltes, sabonetes líquidos, entre outros produtos (BATALHA; MING, 2003; CORRÊA; ALVES, 2008).

Dentre o grande número de plantas medicinais existentes, a hortelã é uma das mais conhecidas e utilizadas na medicina popular, e devido as suas características atrai interesse de pesquisadores e produtores. Com um sabor característico e aroma refrescante, é muito utilizada como especiaria culinária, combinando bem com frutas e legumes ou como chá no combate a problemas digestivos. O seu óleo essencial é amplamente empregado em produtos aromatizantes de uso oral, medicamentos e em cosméticos. Por apresentar esta ampla aplicação é considerada a terceira preferência mundial como flavorizante, perdendo apenas para o de baunilha e o de *Citrus* (ADJUTO, 2008).

A secagem como processamento pós-colheita de produtos perecíveis é interessante, pois aumenta a vida útil do produto, diminui o custo de armazenamento e transporte e conserva os constituintes químicos e minerais. Porém se a secagem for realizada de forma indevida, o processo pode acarretar a deterioração de constituintes e nutrientes. Com isso, é importante o conhecimento dos fenômenos envolvidos no processo de secagem, para auxiliar na padronização da matéria prima e na construção de equipamentos adequados ao produto a ser seco (MARTINS 2000; RANDUZ 2004).

O processo de secagem convectiva das plantas medicinais envolve a transferência de calor e massa em um conjunto de folhas que formam um “pacote”, e a análise dos fundamentos deste processo é bastante complexa por várias razões. Como cada folhas possui características únicas, em termos de tamanho, formato, rugosidade superficial, composição, etc., os “pacotes” de folhas não são reprodutíveis, resultando em meios porosos e secagens diferentes a cada processo (LIMA, 2013). Além disto, devido ao elevado teor de umidade inicial, as folhas sofrem encolhimento e se deformam durante a secagem, resultando em interações entre as fases sólidas e fluidas bem mais complexas do que as observadas em leitos de partículas rígidas.

Diante destas dificuldades, desenvolver modelos teóricos para descrever a secagem de folhas é difícil, pois seriam necessários um grande número de parâmetros que não são facilmente determinados, além de requerer técnicas complexas para a resolução das equações. Assim, alguns pesquisadores sugerem descrever a secagem utilizando equações empíricas ou semi-empíricas como alternativa à modelagem teórica. Ainda que as equações totalmente empíricas não tenham significado físico, em geral apresentam um custo computacional menor com relação ao método convencional de simulação dos modelos teóricos (MARTINAZZO et al., 2007; YOUSSEFI; MOUSAVI, 2009).

Uma das alternativas muito utilizadas na literatura para descrever o processo de secagem das plantas medicinais é o uso de modelos empíricos e semi-empíricos de secagem em camada fina. Estes modelos são ajustados a partir de dados experimentais que representam a relação da razão de umidade em função do tempo para cada condição no processo de secagem. Também é possível ajustar equações através da regressão múltipla dos dados, técnica utilizada na otimização de processos que apresentam muitas variáveis

envolvidas, determinando uma relação das variáveis independentes com a resposta e verificando quais variáveis têm mais influência no processo.

O uso de Redes Neurais Artificiais (RNA's), que são um conjunto de métodos matemáticos e algoritmos computacionais de simulação de processo é outra possibilidade. As RNA's têm sido utilizadas na modelagem empírica da secagem de alguns produtos naturais, e diferentemente dos modelos de cinética de secagem, as RNA's, conseguem representar o comportamento de secagem para uma faixa de operação e não apenas para uma única condição (KARIMI et al., 2012). Dentro do contexto apresentado, o principal objetivo do presente trabalho foi estudar a secagem de folhas de hortelã da espécie *Mentha x villosa* H. em leitos rasos e testar diferentes modelos para descrever o comportamento da secagem de folhas nas condições avaliadas. Para isso foi analisado o efeito que a massa da amostra junto com as variáveis de processo, temperatura e velocidade do ar, apresentam nas curvas de secagem obtidas em um secador convectivo horizontal com escoamento de ar paralelo. De forma complementar foi investigada a secagem em uma estufa de convecção natural avaliando-se a influência dos tamanhos das folhas e o estágio de crescimento das mesmas na secagem.

Com os dados obtidos da secagem no secador convectivo, realizou-se o ajuste da cinética de secagem a modelos empíricos e semi-empíricos. Como complemento realizou-se a modelagem utilizando as técnicas de redes neurais, visando obter uma rede que represente o comportamento da secagem para as folhas de hortelã, para a faixa operacional estudada. Também foi feita uma análise baseada na metodologia de superfície de resposta e na regressão múltipla dos dados, com o intuito de determinar uma condição ótima para a secagem, que forneça o menor teor de umidade, e determinar quais variáveis operacionais estudadas exerceram mais influência sobre a umidade da folha e o tempo de secagem.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentadas informações gerais sobre a hortelã comum, *Mentha x villosa H.*, sobre o processo de secagem e uma revisão sobre as plantas medicinais e também dos principais conceitos utilizados na aplicação das técnicas de planejamento experimental, superfícies de respostas e redes neurais.

2.1 Aspectos gerais da hortelã

A hortelã-comum (*Mentha x villosa L.*) é uma planta oriunda da família Labiatae, é uma espécie híbrida natural da *M. suaveolens* e *M. spicata* (MARTINS; RAFFIN; MOURA, 2007) e pertence a um gênero que apresenta um grande número de espécies, como a hortelã-verde (*Mentha Spicata*), hortelã-crespa (*Mentha Crispa*), poejo ou hortelãzinho (*Mentha Pulegium*), entre outras (PARK; VOHNIKOZA; BROD, 2002).

Esta planta originária da Europa e cultivada em clima temperado pode alcançar de 30 a 60 cm de altura. Apresenta um caule ramificado, violáceo e quadrangular. Suas folhas são opostas, oval-lanceoladas, serradas e curtamente pecioladas com coloração verde escuro, podendo ser visualizadas na Figura 2.1, e apresenta flores lilases ou azuladas, localizadas em espigas terminais (RANDUZ, 2004).

Em território brasileiro, é utilizada para consumo caseiro como condimento na alimentação, chás e infusões aromatizantes. No setor industrial extrai-se o óleo para emprego em produtos cosméticos, na produção de bebidas e doces (DOYMAZ, 2006; PAULUS; VALMORBIDA; TOFFOLI, 2011; RADUNZ, 2004).

Figura 2.1 - Hortelã-comum.



FONTE: http://www.canstockphoto.com.br/foto-imagens/folhashortel%C3%A3.html#file_view.php?id=5966411.

Os princípios ativos presentes na planta são estimulantes digestivos, antissépticos, cardiotônicos e antiespasmódicos, e são recomendadas para gastrite, reumatismo, flatulência, timpanite nervosa, cólicas, palpitações, tremedeiras e vômitos (BIESK, 2005).

Outra ação que este fitoterápico apresenta é ação antimicrobiana. Arruda, Antunes e Catão (2006), estudaram a ação antimicrobiana do óleo da *Mentha x villosa H.* e de óleos sintéticos, análogos aos componentes naturais presentes no óleo de hortelã, como epóxi-limoneno, epóxi-pulegona, epóxi-carvona e pulegona. O estudo foi realizado em microorganismos como o *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Cândida albicans* e *Staphylococcus aureus meticilina*. Os autores concluíram que o óleo natural de hortelã apresentou-se eficiente no combate aos microorganismos *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus meticilina* e *Cândida albicans*.

Martins, Raffin e Moura (2007) investigaram a quantidade de componentes voláteis na caracterização do óleo da espécie *Mentha x villosa H.*, utilizando o método de coprecipitação e amassamento em um meio hidro-etanólico. A identificação dos componentes voláteis foi realizada através da cromatografia gasosa e espectrometria de massas, e os principais componentes encontrados para o óleo de hortelã estão apresentados na Tabela 2.1.

Muitas vezes as folhas não são manuseadas *in-natura*. Na indústria farmacêutica, por exemplo, o interesse é na matéria-prima em sua forma seca, já que a dosagem torna-se mais precisa e tem-se maior facilidade de manuseio, além de prolongar o tempo de conservação das propriedades do material (PACHÚ, 2007).

Tabela 2.1 - Componentes voláteis do óleo original da espécie *Mentha x villosa H.*

Componentes voláteis	Composição do óleo padrão (%)
Limoneno	2,6
1,8-cineole	3,48
Trans-ocimeno	2,1
Timol acetato	6,38
Óxido de piperitenona	35,35
piperitenona	9,64
Trans-carofileno	3,36
γ -muroleno	8,47
γ -cadineno	2,2

FORTE: MARTINS, RAFFIN, MOURA 2007.

Assim, no tópico seguinte serão apresentados os princípios e fundamentos teóricos do processo de secagem.

2.2 Secagem

A secagem é um processo de transferência de calor e massa, e baseia-se na remoção de líquidos voláteis que estão presentes na superfície ou no interior do sólido. A diferença de temperatura entre a superfície do material sólido e a fonte quente proporciona a transferência de calor e, simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor de água entre a superfície do material e o sorvedor de umidade promove a migração da umidade (SILVA, 2005).

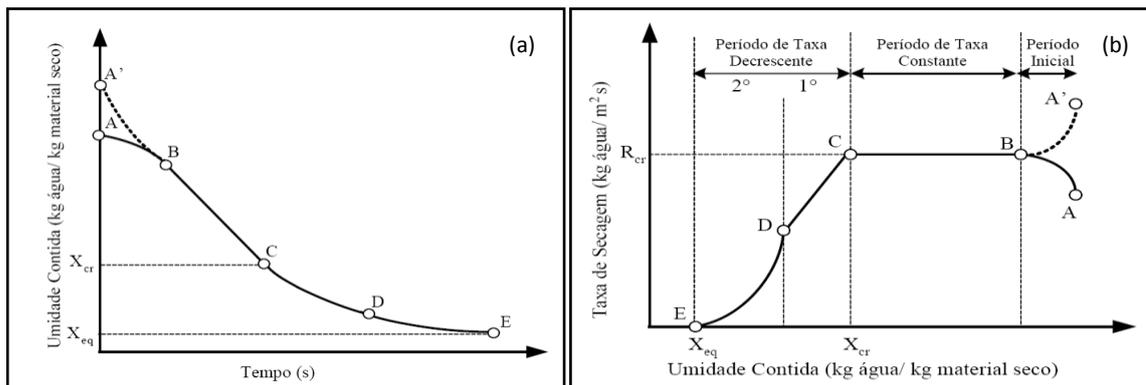
Durante a secagem, o movimento sofrido pela água, do interior até a superfície do material, é caracterizado por diferentes mecanismos de transferência de massa, sendo que os mais importantes são (PARK et al., 2007):

- Difusão líquida: movimento do líquido decorrente do gradiente de concentração da umidade;
- Difusão de vapor: movimento da umidade decorrente da diferença de pressão de vapor provocada pela diferença de temperatura;

- Escoamento capilar: o movimento do líquido é por gravidade ou por capilaridade, força resultante da diferença de pressão hidrostática e dos efeitos da tensão superficial.

A evolução do processo de secagem faz com que a curva apresente períodos distintos, os quais são mostrados na Figura 2.2 e descritos a seguir (PARK et al., 2007):

Figura 2.2 - Curvas de (a) variação da umidade em base seca em função do tempo (s) e (b) taxa de secagem do material em função do teor de umidade em base seca (X).



FONTE: FOUST et al., 1982.

O período (A'-B ou A-B) é o período em que se inicia a secagem. Na situação em que o sólido se encontra a uma temperatura menor que a temperatura do fluido, etapa (A-B), o calor fornecido pelo fluido proporciona o aumento da temperatura do sólido até a temperatura do bulbo úmido do ar. Outra situação possível é indicada pela etapa (A'-B), quando a temperatura do sólido é inicialmente maior que a temperatura do fluido. Neste caso a temperatura do sólido tende a diminuir até atingir a temperatura de bulbo úmido do ar.

O período (B-C) representa o período em que o calor fornecido ao material sólido é totalmente usado para a evaporação da água livre presente na superfície, denominado de período de taxa constante. A temperatura nesta etapa permanece constante e é igual à temperatura de bulbo úmido do ar, a pressão de vapor também é constante e igual à pressão de vapor de água pura a temperatura do sólido. Estas condições também caracterizam a taxa de secagem, pois a água que migra do interior até a superfície do sólido é completamente evaporada e o mecanismo predominante é a difusão de vapor de água no filme de ar que envolve o material.

O período (C-E), denominado de período de taxa decrescente, inicia-se quando o material atinge a umidade crítica (X_{cr}). Neste período a taxa de reposição da água que migra do interior para a superfície do material não é a mesma que a taxa de evaporação da água na superfície, com isso o deslocamento da umidade no interior do material passa a controlar o processo. Como a superfície do sólido não se encontra mais saturada, o mecanismo predominante de transferência de massa no interior do sólido é a difusão líquida devido ao gradiente de concentração, ou por capilaridade resultante na diferença de pressão hidrostática provocada pela tensão superficial. Usualmente é um período dividido em duas etapas, que correspondem às etapas (C-D) e (D-E) da Figura 2.2. Na primeira etapa a superfície não pode ser mantida saturada de água pela umidade que está presente nos poros do produto. A segunda etapa é quando a superfície está completamente insaturada e há entrada de ar quente pelo interior do sólido, provocando a presença de bolsas de ar nos poros (STRUMILLO e KUDRA, 1986 *apud* SILVA, 2005).

Ao final deste período o material atinge a umidade de equilíbrio (X_E) e taxa de secagem tende a zero. A umidade de equilíbrio é o teor de umidade que corresponde ao equilíbrio entre as pressões de vapor da água no material e no ambiente, e que corresponde à umidade final que um material pode alcançar em um determinado conjunto de condições. (BARROZO, 1995).

No tópico a seguir será comentada a influência que as variáveis de processo de secagem podem trazer ao produto final das plantas medicinais, visto que é um material altamente perecível e que apresentam componentes químicos voláteis em sua constituição.

2.2.1 Secagem de plantas medicinais

A secagem das plantas tem a finalidade de reduzir o teor de umidade presentes nas folhas, caules ou raízes para evitar a deterioração rápida relacionada ao seu alto teor de água, o que favorece o aumento da ação enzimática, acarretando a degradação dos constituintes químicos e a proliferação de microorganismos (RADUNZ, 2004).

Um método de secagem é a secagem ao natural, em que o material é exposto à radiação solar. Porém é um processo desaconselhado visto que há a contaminação do

produto com poeira, terra e insetos, além de depender das condições climáticas. Este método provoca a fotodecomposição intensa em materiais como folhas, degradando os componentes químicos, alterando odor, cor e sabor (MARTINS, 2000; DOYMAZ, 2006). Uma forma na qual pode ser conduzido o método de secagem ao natural é o processo ocorrendo à sombra, em lugar ventilado, protegido do ataque de insetos e de outros animais, e de poeira (MOCHI, 2005). Um método alternativo é o emprego de secadores no processo de secagem, com o uso de temperaturas que assegurem uma rápida redução no teor de umidade sem afetar a qualidade do material (RADUNZ, 2004).

Para os casos de plantas que contém óleos essenciais de interesse comercial, a secagem deve ser criteriosa devido à sensibilidade que os princípios biologicamente ativos apresentam, pois as condições aplicadas no processo e o método de secagem podem influenciar na composição dos óleos e minerais presentes. Por isso a metodologia e as condições de secagem mais apropriadas devem ser definidas para cada espécie (CORREA et al., 2004).

De acordo com estudos existentes na literatura sobre secagem de folhas, pode-se observar que a escolha do equipamento influencia a composição e a qualidade do produto final. Jackes et al. (2007) e Arslan, Ozcan e Menges (2010), ao realizar a secagem de uma mesma espécie de planta em diferentes equipamentos e usando diferentes métodos de secagem, obtiveram diferentes valores para quantidades de nutrientes, composições e rendimento do óleo nos produtos finais. Diaz-Maroto et al. (2003) observaram, através de uma microscopia de varredura, que a escolha das condições de secagem e do equipamento pode influenciar na estrutura celular das folhas.

Boa parte dos trabalhos que apresentam a secagem em camada fina de plantas medicinais analisa a influência da temperatura, da velocidade e da umidade do ar na transferência de massa. Erbay e Icier (2010) analisaram a influência que a temperatura e velocidade do ar exerceram sobre a secagem de folhas de oliveira da espécie *Olea europaea* L. em um secador bandeja. Kaya e Aydin (2009) realizaram o estudo de secagem das folhas de hortelã (*Mentha spicata* L.) e de urtiga (*Urtica dioica*) em um secador convectivo variando a temperatura, velocidade e umidade relativa do ar de secagem. Doymaz, Tugrul e Pala (2006) estudaram a secagem de endro (*Anethum graveilens* L.) e salsa (*Petroselinum crispum* L.) em um secador gabinete variando a temperatura do ar. Gunhan et al. 2005 analisaram a

influência da temperatura e umidade relativa do ar durante a secagem de folhas de louro (*Laurua nobilis L.*) em um secador de escala laboratorial.

Estes autores obtiveram resultados semelhantes com relação ao comportamento de secagem para os diferentes tipos de folha, ou seja, que a temperatura foi a variável que apresentou influência direta no processo de secagem e o único período que se encontrou nas curvas de secagem foi o período de taxa decrescente.

2.2.2 Modelos empíricos ou semi-empíricos

Os modelos empíricos e semi-empíricos são equações propostas para representar a transferência de massa durante a secagem de produtos alimentícios, porém incluem as resistências de transferência de massa e calor, e as características do material todas juntas em simples parâmetros. Além disto, são baseados apenas nas condições externas do processo, como a temperatura, a velocidade e a umidade do ar (CARLESSO et al., 2007; MARTINAZZO et al., 2007; PRADO, 2004; ZANOELO; CELSO; KASKANTZIS, 2007;).

Estes modelos descrevem a secagem de um material em camada fina, ou delgada, em um leito fixo. Esta camada de material corresponde a espessura de uma amostra em que os gradientes de temperatura ou umidade ao longo da posição são desprezíveis.

O primeiro modelo proposto foi o de Lewis (1921) e a maioria dos modelos empíricos de secagem são baseados neste modelo, que realiza uma analogia do período de taxa decrescente de secagem com a lei de resfriamento de Newton. Este modelo foi desenvolvido a partir de um balanço global de transferência de massa assumindo que a umidade é uniforme em qualquer posição da amostra, variando apenas em função do tempo, e que a resistência à transferência de massa encontra-se apenas na superfície do material. Com isso, o autor considera que a variação da umidade em função do tempo é proporcional a diferença de umidade entre a superfície da amostra e a umidade de equilíbrio (BACELOS, 2002; BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992, CARLESSO et al., 2005), conforme a equação:

$$\frac{dX}{dt} = k(\bar{X} - X_E) \quad (1)$$

A equação integrada encontra-se na Tabela 2.2 (equação 3), e é conhecida também como modelo exponencial de secagem.

O coeficiente k presente na equação é uma constante de proporcionalidade, denominada constante de secagem. É considerado o parâmetro que caracteriza o fenômeno de evaporação da umidade, porém não inclui as características do produto, e sim, as condições externas do processo. A dependência desta constante pode estar representada em função apenas da temperatura do ar, através de uma equação do tipo Arrhenius. Entretanto esta equação não apresenta significado físico, visto que o conceito da energia de ativação não explica nenhum fenômeno do processo de secagem (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

$$k = A \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \quad (2)$$

onde R é a constante universal dos gases, T é temperatura absoluta e A constante (m^2/s).

O modelo proposto por Lewis descreve de forma aceitável o comportamento de secagem de muitos produtos alimentícios, porém Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1992) afirmam que o modelo descreve de forma satisfatória apenas a secagem de grãos com baixo teor de umidade, pois o material atinge rapidamente a umidade de equilíbrio. A partir disso, e com o intuito de melhorar o ajuste do modelo aos dados experimentais, outros autores propuseram modificações ao modelo de Lewis. Algumas destas equações se encontram na Tabela 2.2

O modelo de Page (equação 4), de acordo com Prado (2004), pode ser considerado o mais adequado para representar a cinética de vários materiais, independentemente do mecanismo que venha a predominar durante o processo de secagem. Segundo Park, Brod e Vohnikova (2002), a equação proposta por Page representou bem a secagem de folhas de hortelã da espécie *Mentha crispa L.* em estufa, microondas e ao natural. Este modelo também foi adequado para descrever a secagem de folhas de louro de espécie *Laurus nobilis L.* em um secador de escala laboratorial, segundo Gunhan et al. 2005.

Para os autores Arslan e Oczan (2008), o modelo de Page Modificado (equação 5) foi o mais adequado para descrever a secagem de alecrim em um forno microondas.

O modelo de Henderson e Pabis (1969) (equação 6), foi um dos primeiros modelos baseados na solução da “segunda lei de Fick”. Este modelo consiste em truncar o primeiro termo da série obtida a partir da solução do modelo difusivo unidirecional e transiente, transformando a expressão em uma equação análoga à lei de resfriamento de Newton. Porém o parâmetro k da equação resultante é considerado uma difusividade efetiva, e com isso os autores puderam demonstrar que a constante não depende unicamente da temperatura, mas também dos mecanismos efetivos de difusão de umidade (CARLESSO et al., 2007).

Dos vários modelos existentes, Erbay e Icier (2010) ajustaram alguns deles aos dados experimentais obtidos na secagem de folhas de oliveira da espécie *Olea Europaea L.* Os autores citam 11 modelos, e o modelo de Henderson e Pabis modificado, foi o que melhor representou a cinética de secagem das folhas de oliveira. Para Doymaz (2006) que realizou a secagem de folhas de hortelã da espécie *Mentha spicata L.* em secador do tipo gabinete, o modelo Logarítmico (equação 7) foi o que melhor descreveu a cinética do processo.

A seguir é mostrada a Tabela 2.2 com algumas das equações empíricas citadas anteriormente e muito utilizadas para este tipo de modelagem.

Tabela 2.2 - Equações semi-empíricas para estimativa da umidade adimensional na secagem em camada fina.

Nome dos modelos	Equações
Lewis	$MR = \exp(-kt)$ (3)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$ (4)
Page Modificada	$MR = \exp[-(kt)^n]$ (5)
Henderson e Pabis	$MR = a \exp(-kt)$ (6)
Logarítmico	$MR = a \exp(-kt) + c$ (7)
Dois Termos	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$ (8)

FONTE: ERBAY e ICIER, 2010.

Nas equações (3) a (8), MR é a umidade adimensional e k , k_0 e k_1 são constantes a serem determinadas e t é a variável temporal.

Outra maneira de representar empiricamente o processo de secagem através de modelos é utilizando ferramentas estatísticas, por exemplo. Diferentemente dos modelos

análogos à lei de Newton, estes modelos permitem obter equações que demonstram a influência das variáveis de processo em qualquer resposta final que se deseja obter no processo de secagem para uma determinada faixa de operação.

Karimi et al. (2012), realizaram a modelagem empírica, utilizando técnicas de redes neurais e planejamento experimental para obtenção de superfícies de resposta, da secagem de folhas de *Artemisia absinthium* em um secador tipo gabinete. Os autores consideraram a temperatura, velocidade do ar e tempo de secagem, como variáveis independentes no processo, e a umidade final das folhas, taxa de secagem, eficiência energética e eficiência exergética como as respostas desejadas nos modelos.

Nos próximos itens serão apresentados os principais conceitos envolvidos no procedimento de Planejamento de Experimentos e na modelagem por Redes Neurais, que são de interesse para o presente trabalho.

2.3 Planejamento experimental

O planejamento experimental é um procedimento que permite avaliar os efeitos de variáveis independentes sobre a resposta utilizada quando precisa-se melhorar um processo industrial ou quando há necessidade de se formular um produto que atinja especificações desejadas. Com o uso do planejamento há um aproveitamento de dados que certamente não seriam considerados sem a utilização do método (RODRIGUES; IEMMA, 2005).

A primeira etapa para o planejamento consiste em selecionar os fatores, as variáveis independentes do sistema que interferem no processo, e os níveis, valores escolhidos para os fatores. Em seguida determina-se qual o melhor planejamento experimental que defina como os fatores e níveis devem estar associados.

O arranjo mais comum e simples é o fatorial completo, em que os níveis e fatores são organizados de forma a garantir todas as combinações possíveis, e denota-se o número de experimentos por N^k , onde N é o número de níveis e k os fatores. A desvantagem deste planejamento é que, com o aumento do número de fatores, o número de experimentos cresce exponencialmente, e isto pode tornar o número de experimentos inviável (COLOMBARY, 2004; RODRIGUES; IEMMA, 2005).

Quando se pretende trabalhar com um número grande de variáveis, é bem provável que alguns destes fatores não influenciem significativamente a resposta, e devido a isso o uso da quantidade de experimentos do planejamento anterior pode ser considerado um desperdício. Para obter os efeitos principais sobre as interações de primeira ordem, a técnica de delineamento fatorial fracionado é de grande utilidade (NETO; SCARMINIO; BRUS, 2007).

O delineamento fatorial fracionário é um arranjo experimental utilizado quando existem muitos fatores a serem analisados no processo e a quantidade de experimentos deve ser pequena. Em um delineamento fatorial fracionário com dois níveis, por exemplo, o número de experimentos é dado por 2^{k-p} , em que k continua correspondendo ao número de fatores envolvidos e o valor de p corresponde ao número de experimentos que pretende-se realizar. Se é metade dos experimentos do delineamento fatorial completo, p equivale a 1, se é um quarto dos experimentos, p é igual a dois, e assim sucessivamente (PAIVA, 2008).

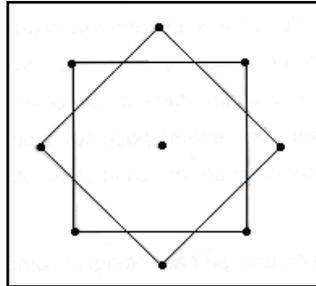
O delineamento composto central é um planejamento experimental muito usado para realizar análises de superfícies de resposta, devido a possibilidade de se explorar um grande espaço amostral com um número pequeno de ensaios. É um planejamento simétrico e consiste na repetição do ponto central e na adição de pontos axiais, sendo o número de experimentos dado pela equação:

$$NE = PF + PA + PC \quad (9)$$

onde NE é o número de experimentos, PF o planejamento fatorial 2^k , PA corresponde a quantidade de pontos axiais e equivale a 2 vezes a quantidade de fatores, e PC é o número de repetições no ponto central. A adição dos pontos centrais no planejamento permite obter informações extras sobre a região central do experimento, pois é onde normalmente encontram-se as melhores respostas, melhora a estimativa dos efeitos quadráticos e permite graus de liberdade para uma estimativa do erro experimental (PENTEADO, 2010).

A representação esquemática de um delineamento composto central pode ser visualizada na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Representação do delineamento do composto central rotacional 2^2 .



FONTE: RODRIGUES; IEMMA, 2005.

Depois de determinada a quantidade de ensaios é determinado o nível dos pontos axiais, também denominado de distância entre o centro e os pontos axiais, e representada por alfa, de acordo com:

$$\alpha = (2^k)^{\frac{1}{4}} \quad (10)$$

Determinado o nível nos pontos axiais, é necessário determinar o valor das variáveis independentes, referente a cada nível dos pontos axiais. Para estabelecer estas variáveis é utilizada a equação da variável codificada, dada por:

$$c_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\lambda} \quad (11)$$

onde \bar{x} é a média dos níveis, do mais alto e do mais baixo, x_i é o valor da variável não codificada e λ é o espaçamento entre os valores das variáveis.

Depois de escolhido o planejamento, realizados os experimentos e obtidas as respostas para cada condição, uma forma de analisar estes dados é através da Metodologia de Superfície de Resposta (RSM). Esta metodologia consiste em um conjunto de ferramentas matemáticas e estatísticas para analisar problemas, além de definir uma relação entre as variáveis independentes e a resposta. A relação pode ser expressa por uma equação polinomial de 2ª ordem, que pode estimar qualquer valor da variável resposta, y , correspondente ao intervalo da variável independente x , e pode ser representada pela equação (PAIVA, 2008):

$$y_{ijr} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1, i < j}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + e \quad (12)$$

onde x_i e x_j são as variáveis independentes, β_0 é o ponto de inserção, β_i são relacionados aos efeitos lineares, β_{ii} são os efeitos quadráticos, β_{ij} são os efeitos de interação, sendo estimados pelo método dos mínimos quadrados, e e é o erro experimental. Porém quando é analisada uma região longe do ponto ótimo e a superfície não apresenta curvatura, pode-se empregar um modelo de primeira ordem para representar a correlação entre as variáveis (PENTEADO, 2010; WERKEMA; AGUIAR, 1996).

Antes de construir os modelos, os resultados obtidos são submetidos a uma análise dos parâmetros para verificar quais destes apresentam influência estatisticamente significativa na resposta. Esta análise é a análise de regressão múltipla.

Depois do modelo ajustado, são construídas as superfícies de resposta e as curvas de contorno. As superfícies de resposta são representações gráficas em que é possível mapear uma determinada região e, assim, visualizar as condições ótimas do processo. As curvas de contorno ajudam a visualizar a forma da superfície, onde cada curva de nível representada está relacionada a uma altura da superfície de resposta (KARIMI et al., 2012; WERKEMA; AGUIAR, 1996).

Na literatura, diversos autores citam o uso da metodologia de superfície de resposta (MSR) em estudos sobre secagem. Por exemplo Erbay e Icier (2009) utilizaram esta metodologia para analisar a secagem convectiva de folhas de oliva (*Olea europaea L.*) em secadores do tipo bandeja; Mitra e Meda (2009) para determinar a influência das variáveis de processo na secagem em microondas a vácuo de Saskatoon berries (*Amelanchier alnifolia*); e Burande et al. (2008) para verificar a influência das variáveis de processo durante a secagem de ervilhas (*Pisum sativum L.*) em leitos fluidizados.

2.4 Redes neurais artificiais

As redes neurais artificiais (RNAs) foram inspiradas e tiveram seu nome retirado das redes de células nervosas no cérebro. São sistemas massivamente paralelos que dependem de arranjos densos de interligações e têm a propensão natural de armazenar dados e torná-los disponíveis para uso (HAYKIN, 2001). As aplicações de redes neurais se iniciaram com os trabalhos de McCulloch e Pitts (1942). Juntos, McCulloch, um psiquiatra e neuroanatomista e Pitts, um matemático, descreveram um cálculo lógico de redes neurais unificando os estudos de neurofisiologia, lógica e matemática assumindo um modelo formal em que o neurônio seguia uma lei do “tudo ou nada”, mostrando que uma rede assim realizaria o cálculo de qualquer função computável (HAYKIN, 2001).

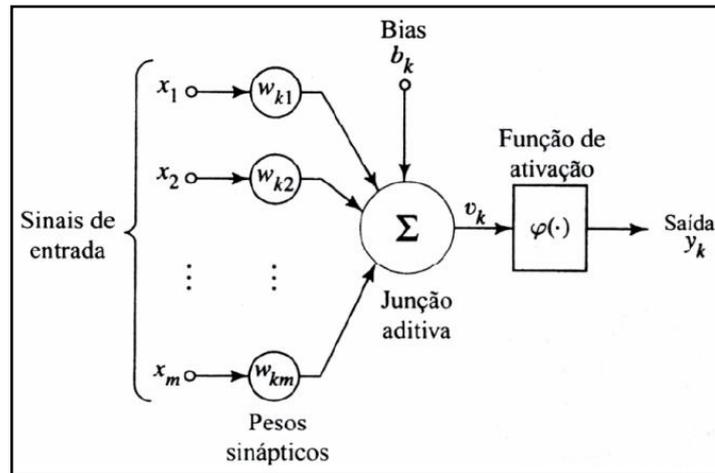
As estruturas das redes neurais são consideravelmente menos complexas do que as do cérebro, do ponto de vista da engenharia, e são vistos como modelos empíricos não-lineares muito úteis na representação de processos de entrada e saída de dados, sendo aplicadas para previsões do tempo, classificação de dados, reconhecimento de padrões e apresentam também utilidade quando a informação matemática exata não está disponível. Outra vantagem importante dos modelos de redes neurais em relação a outros modelos, é que se o processo em análise sofrer mudanças, os novos dados podem ser adicionados e a rede ser treinada novamente, sendo uma forma mais fácil de obter novos modelos (HIMMELBLAU, 2008; KARIMI et al., 2012).

Para fornecer resultados, as redes neurais utilizam diversas células computacionais simples e interligadas, denominadas neurônios. Os dados experimentais são armazenados nos neurônios em unidades denominadas pesos sinápticos, e seus valores são modificados à medida que a rede sofre o processo de aprendizagem. Esta modificação ocorre de uma forma ordenada para alcançar o objetivo (BREVE, 2006).

A Figura 2.4 mostra a estrutura básica de uma unidade de processamento, ou neurônio, identificando quais os elementos básicos. As variáveis x_j correspondem aos sinais de entrada, que podem vir de outros neurônios ou de outra fonte, e são conectadas a um peso sináptico w_{kj} . A junção aditiva, Equação 13, realiza uma soma ponderada dos sinais de entrada. Nesta etapa é adicionado o bias, um parâmetro externo do neurônio, que tem a

finalidade de limitar a entrada líquida da função de ativação. A função de ativação é considerada uma função restritiva, que restringe o intervalo do sinal de saída dos neurônios a valores finitos, tipicamente em intervalos fechados $[0,1]$ ou alternados $[-1,1]$. E a saída é a resposta produzida pela rede (HAYKIN, 2001).

Figura 2.4 - Modelo não-linear de neurônios.



FONTE: BREVE, 2006.

$$u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j \quad (13)$$

O sinal de saída, também denominado de função de transferência, pode ser representado matematicamente pela equação:

$$y_k = f_{ati}(u_k + b_k) \quad (14)$$

A função de ativação, f_{ati} , presente na Equação 15 pode ser uma função linear, rampa, degrau, tangente hiperbólica ou sigmoideal (FERREIRA, 2004). Destas funções a mais comum é a sigmoideal por ser estritamente crescente e diferenciável, e é representada pela equação (HAYKIN, 2001):

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (15)$$

A combinação dos neurônios interligados é denominada de arquitetura da rede, e compreende o número de camadas, de neurônios por camadas e tipo de conexões por neurônios. A estrutura geral da rede é feita em camadas, que são classificadas em camada

de entrada, intermediária e de saída. A função da camada de entrada é transmitir o valor dos dados de entrada para camada seguinte. A camada intermediária pode existir (e ser mais de uma) ou não existir na estrutura de rede, é onde é feita a modelagem não linear da rede. A camada de saída corresponde à resposta da rede, o resultado do problema analisado (TERRA, 2000).

Dentre as possíveis arquiteturas de redes, a rede com múltiplas camadas vem sendo muito empregada para a resolução de problemas na área da engenharia química. Para este tipo de arquitetura o algoritmo mais usado para os ajustes dos pesos é o de retropropagação de erro, ou *back-propagation* (FERREIRA, 2003).

Nesta técnica de aprendizagem, primeiramente o sinal de entrada ou sinal funcional se propaga pelos neurônios, de camada em camada, até a camada de saída com os resultados fornecidos pela rede. Em seguida é realizado o passo para trás, neste instante os pesos sinápticos são ajustados de acordo com a regra de correção de erro. O erro, expresso pela Equação 16, corresponde à resposta encontrada pela rede subtraída da resposta desejada. Este sinal é propagado na direção inversa das conexões e os pesos são ajustados para que a resposta da rede seja o mais próxima possível da resposta desejada. (HAYKIN, 2001).

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n) \quad (16)$$

onde $d_j(n)$ corresponde à resposta desejada e $y_j(n)$ à encontrada pela rede.

A adaptação dos pesos se inicia quando a medida de desempenho de aprendizagem ou função de custo, expressa na Equação 17, atingir um valor mínimo. A correção então é aplicada ao peso e pode ser representada por uma equação geral, semelhante à equação para a rede com L camadas descrita na Equação 18.

$$\mathcal{E}_{méd} = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N \sum_{j \in C} e_j(n)^2 \quad (17)$$

$$\Delta w_{ji}^{(l)} = \alpha [w_{ji}^{(l)}(n-1)] + \eta \delta_j^{(l)}(n) y_i^{(l-1)}(n) \quad (18)$$

onde α corresponde a constante de momento, η o parâmetro da taxa de aprendizagem e δ o gradiente local.

Se o neurônio pertence à camada de saída, o gradiente local corresponde ao produto entre a derivada da função de ativação associada com o sinal de erro referente ao neurônio de saída. E se o gradiente local corresponde a um neurônio da camada intermediária, seu valor é o produto da derivada da função de ativação associada pela soma ponderada dos gradientes locais para os neurônios da camada subsequente.

Para a definição da arquitetura da rede neural, não existe uma maneira exata de se estimar a quantidade de camadas e neurônios necessários. Uma abordagem empírica utilizada é treinar várias redes com diferentes arquiteturas, para os dados experimentais em questão, e avaliar cada uma delas. Com base nos resultados obtidos por cada uma e de acordo com o critério de desempenho, escolhe-se então a melhor rede neural (NETO; NICOLETTI, 2005).

Nos processos de secagem, as redes neurais têm sido muito utilizadas para descrever as curvas dos adimensionais de umidade em função do tempo para diversos materiais e em diferentes condições. Movagharnejad e Nikzad (2007) utilizaram o modelo das redes neurais para descrever a secagem de fatias de tomates variando o potência de aquecimento e velocidade do ar de um secador bandeja. Omid, Baharloonei e Ahmadi (2009) utilizaram as redes neurais para descrever a secagem de pistache (*Akbari v.*) em um secador bandeja para diferentes condições de tempo de secagem, temperatura e velocidade do ar. Para materiais como folhas, além de Karimi et al. (2011), Panchariaya, Popovic e Sharma (2002) utilizaram a técnica de redes neurais para descrever isotermas de equilíbrio de folhas de chá preto variando a temperatura e a atividade da água.

Freire et al. (2012), propuseram o uso das redes neurais para determinar o termo de acoplamento entre as fases nas equações de balanço utilizadas para descrever as transferência de calor e massa na secagem de pasta em leitos de jorro, gerando um modelos híbrido, no qual a rede é usada como complemento para modelos teóricos.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

O comportamento cinético das folhas de hortelã foi estudado em dois diferentes secadores: em uma estufa sem convecção forçada e em um secador convectivo horizontal com escoamento de ar paralelo a amostra.

Neste capítulo serão descritos os materiais e o equipamento necessários para a realização dos experimentos bem como as metodologias empregadas no desenvolvimento deste trabalho.

3.1 Materiais

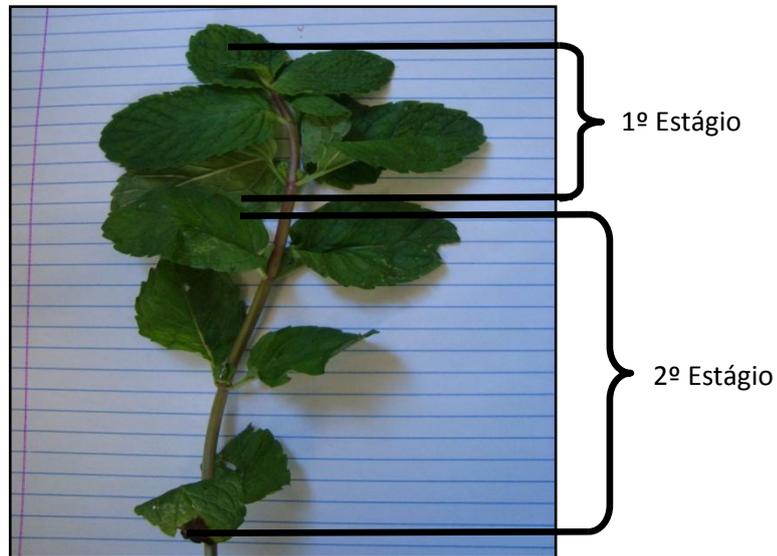
As folhas utilizadas nos experimentos foram folhas *in natura* de hortelã da espécie *Mentha x villosa* H. adquiridas no comércio de São Carlos – SP e sempre do mesmo estabelecimento.

Como as plantas são constituídas por galhos que apresentam em seus ramos folhas com diferentes características, como por exemplo, tamanho e coloração. Estas características estão associadas à posição das folhas no caule e é um indicativo de diferentes estágios de crescimento, uma vez que as folhas mais novas tendem a ficar no topo do caule e as mais velhas na base.

Visto que os ramos eram fornecidos de acordo com o padrão mostrado na Figura 3.1, resolveu-se então analisar a influência da posição das folhas no ramo, ou seja, verificou-se a “idade” das folhas teria influência no processo. Para isso separou-se o comprimento do ramo em dois níveis, o primeiro estágio corresponde às folhas que se encontraram no topo do ramo (folhas novas) e o segundo estágio corresponde às folhas que se encontraram na base (folhas velhas). A separação entre os estágios foi feita considerando-se as três

primeiras folhas do topo do ramo como o primeiro estágio, e o restante das folhas presentes no ramo eram consideradas como folhas do segundo estágio.

Figura 3.1 - Ramo de hortelã obtido do fornecedor.



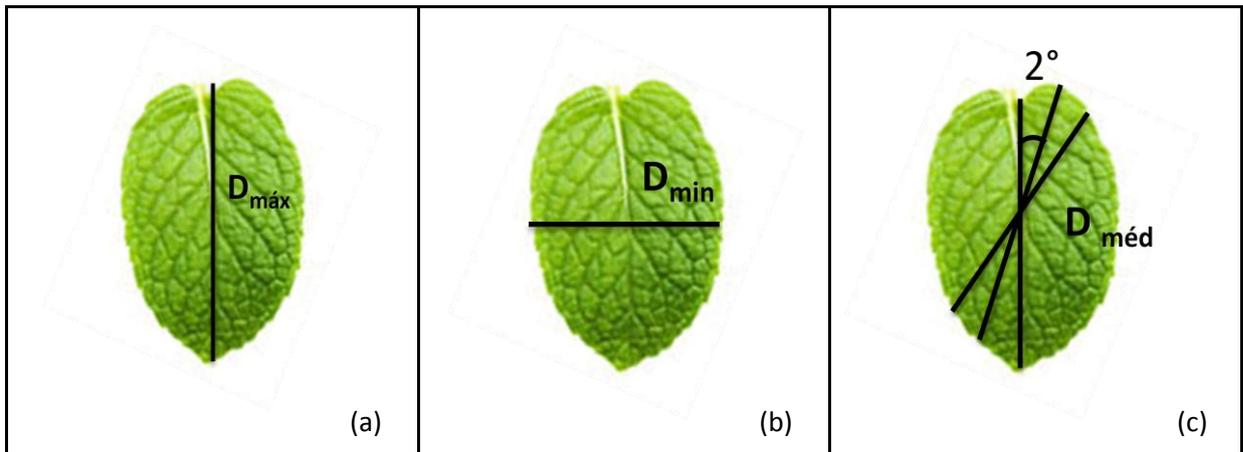
FONTE: Acervo pessoal.

3.2 Caracterização das folhas

As folhas de hortelã foram caracterizadas com a determinação de suas dimensões características, massa específica aparente, espessura média e teor de umidade.

Com o auxílio do analisador Galai Macro Viewer com o software Imagem Pró-Plus determinou-se as dimensões características para 30 folhas selecionadas aleatoriamente, para cada estágio das folhas e a média foi calculada. As dimensões características determinadas foram, a área projetada das folhas, o perímetro projetado, o diâmetro máximo (o maior diâmetro que liga dois extremos da folha e intercepta o centro), diâmetro mínimo (o menor diâmetro que intercepta o centro e liga dois extremos da folha) e o diâmetro médio. O diâmetro médio corresponde a média de comprimentos que interceptam o centro e foram medidos a cada 2°, como indica a figura.

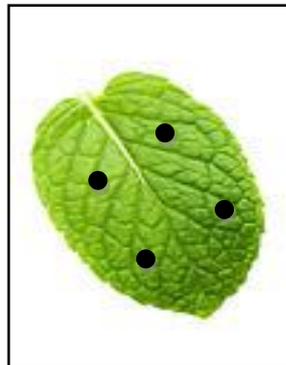
Figura 3.2 – Ilustração dos diâmetros máximo (a), mínimo (b) e médio (c).



FONTE: Figura adaptada de www.canstockphoto.com.br/foto-imagens/folha-hortel%C3%A3.html#file_view.php?id=6291412.

A espessura média das folhas foi determinada para 30 folhas escolhidas aleatoriamente no ramo com o auxílio de um micromêtro com precisão de 0,01 mm. Para determinar uma espessura média para cada folha, foram medidos quatro pontos distribuídos na superfície da mesma, como indica a Figura 3.3, e o valor médio para cada folha foi encontrado. Em seguida foi calculada a espessura média para as 30 folhas.

Figura 3.3 - Representação dos locais onde foram medidos as espessuras das folhas.



FONTE: Figura adaptada de www.canstockphoto.com.br/foto-imagens/folha-hortel%C3%A3.html#file_view.php?id=6291412.

A massa específica aparente das folhas de hortelã *in natura* foi determinada através da técnica de picnometria líquida com o hexano como líquido de referência, para 100 folhas de hortelã.

Usando a equação 19, foi possível determinar a massa específica aparente da amostra.

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (19)$$

O teor de umidade foi determinado para amostras de folhas *in natura* e ao final do processo de secagem, utilizando-se o método gravimétrico, no qual foi feita a pesagem das amostras. Uma massa de amostra foi colocada em uma estufa a $105^\circ \pm 3^\circ\text{C}$ por um período de 24 horas. Ao final deste período a amostra foi pesada novamente e o peso encontrado foi determinado como massa seca da amostra. A umidade em base seca foi calculada de acordo com a equação:

$$U_{bs} = \frac{m_i - m_f}{m_f} \quad (20)$$

3.3 Equipamento e metodologia

3.3.1 Estufa

A estufa sem circulação de ar utilizada para a realização dos experimentos é de marca Thermolyne modelo Furnace 6000, disponível do Centro de Secagem no Departamento de Engenharia Química.

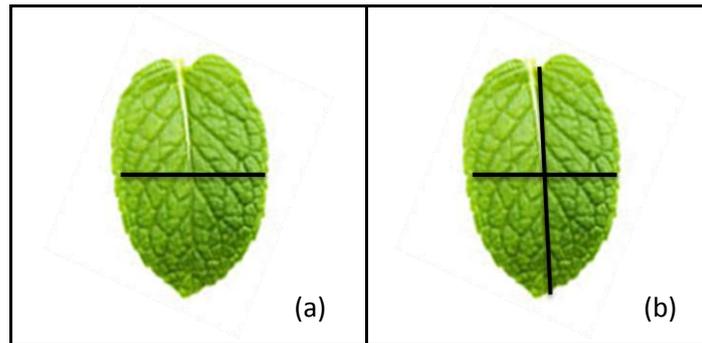
Figura 3.4 - Estufa



FONTE: Acervo pessoal.

Os ensaios de secagem realizados neste equipamento tiveram como objetivo obter informações sobre as cinéticas de secagem variando-se o tamanho das folhas (folhas inteiras, cortadas em duas partes e cortadas em quatro partes), os estágios de crescimento (1º estágio e 2º estágio) e as temperaturas do ar de 40°, 50° e 60°C. A Figura 3.5 ilustra como as folhas de hortelã foram cortadas.

Figura 3.5 - Ilustração das folhas cortadas em (a) duas partes e (b) quatro partes.



FONTE: Figura adaptada de www.canstockphoto.com.br/foto-imagens/folhas-hortel%C3%A3.html#file_view.php?id=6291412.

Depois de determinado o tamanho e o estágio de crescimento das folhas, a amostra com massa inicial de aproximadamente 7 gramas era colocada em recipientes de vidro, com diâmetro de 10 cm e espessura de 1 cm, as quais eram inseridas na unidade de secagem à temperatura pré-estabelecida. As pesagens das amostras foram realizadas em intervalos de 20 minutos até que a amostra atingisse massa constante. Com os valores de massa seca das amostras foi calculada a umidade em base seca (Equação 20).

Com os dados obtidos foram calculados a razão de umidade e taxa de secagem, através das equações 21 e 22 respectivamente. Em seguida foram construídos gráficos de teor de umidade adimensional em função do tempo e taxa de secagem em função de MR.

$$MR = \frac{X_t - X_{eq}}{X_i - X_{eq}} \quad (21)$$

onde X são os teores de umidade em base seca e o subscrito t corresponde ao instante t, 0 à umidade inicial e eq à umidade de equilíbrio.

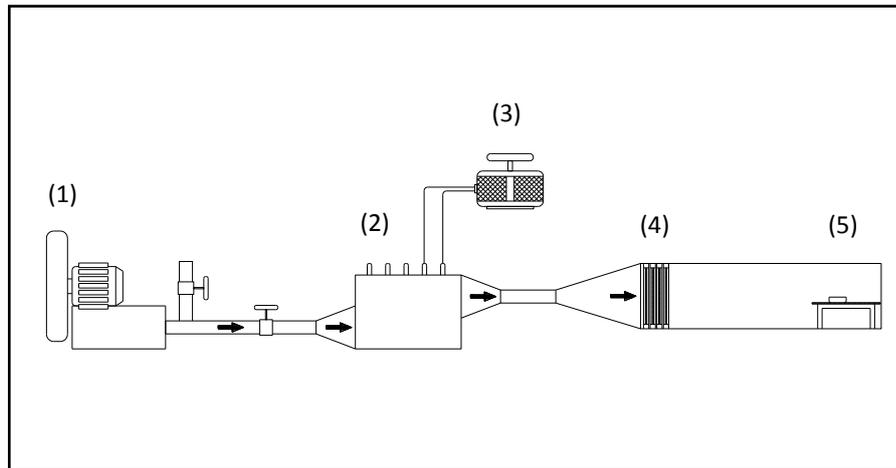
$$TX = \frac{X_{t+dt} - X_t}{dt} \quad (22)$$

onde TX é taxa de secagem, X o teor de umidade, e o subscrito $t+dt$ indica a umidade no instante de tempo $t+dt$ e t é o instante de tempo t .

3.2.2 Secador convectivo horizontal

A unidade em que foi realizada a secagem das amostras foi um secador convectivo horizontal, com convecção forçada de ar, desenvolvido no centro de secagem do DEQ/UFSCar (VERAS, 2010) de acordo com o esquema mostrado na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Secador convectivo. 1) soprador; 2) aquecedor elétrico; 3) variac; 4) sistema de homogeneização; 5) câmara de secagem.



FONTE: Acervo Pessoal.

O ar foi fornecido por um soprador (1) fabricado pela IBRAM, modelos VC 3560, 3469 rpm e com potência de 4 CV. Para ajustar a vazão de ar que escoar no equipamento, o soprador está conectado a uma válvula gaveta de ajuste manual.

O aquecimento do ar foi feito por um trocador de calor (2) dotado de um conjunto de resistências elétricas ligados em um variac (3) VARIVOLT que permite variar a potência de saída e mantém o fornecimento de energia para o aquecedor.

Antes de entrar na câmara de secagem, o ar passa por um sistema de homogeneização (4) que é composto por placas perfuradas com furos não alinhados, inseridas no final da tubulação. O sistema de homogeneização visa evitar caminhos preferenciais e tornar uniforme a distribuição de ar na entrada do secador.

As medidas da temperatura e a umidade relativa do leito foram realizadas usando um termohigrômetro da marca Cole Parmer Instruments Company modelo 37950-00, que era inserido na parte superior da câmara de secagem. Para medir a velocidade do ar no leito, utilizou-se um anemômetro presente no kit tri-sense da Cole Pamer Instruments Company. Este anemômetro era posicionado no interior do leito através das perfurações existentes na lateral da câmara de secagem (5), como mostrado na Figura 3.7. A princípio, colocava-se o anemômetro no centro da câmara, região onde a amostra seria colocada, e após o leito alcançar estabilidade térmica e fluidodinâmica retirava-se o anemômetro e era colocada a amostra.

Figura 3.7 - Lateral da câmara de secagem.

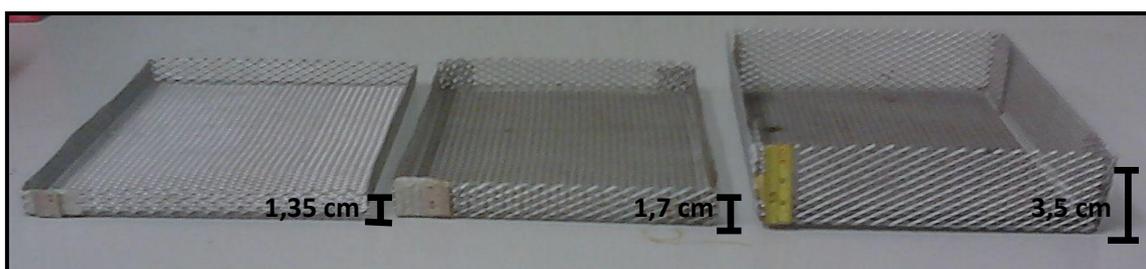


FONTE: Acervo pessoal.

Os ensaios de secagem neste equipamento foram realizados para amostras com 18, 30, e 42 gramas, temperaturas do ar de 36°, 50° e 64°C e velocidades do ar de 1,0m/s, 1,5m/s e 2,0m/s.

Os recipientes onde eram colocadas as folhas para a realização dos ensaios, são mostrados na Figura 3.8, e foram construídos em tela de ferro com dimensões de 20 cm x 10 cm, e alturas 1,35 cm, 1,7 cm, e 3,5 cm.

Figura 3.8 - Células de medidas utilizadas nos experimentos.



FONTE: Acervo pessoal.

Para avaliar os efeitos da massa da amostra, da temperatura e da velocidade do ar durante a secagem das folhas no secador convectivo, foi utilizado um planejamento fatorial de acordo com o delineamento fatorial completo com 3³ experimentos e listadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Planejamento experimental.

Ensaio	Temperatura do ar (°C)	Velocidade do ar (m/s)	Massa (gramas)
1	36	1,0	18
2	50	1,0	18
3	64	1,0	18
4	36	1,5	18
5	50	1,5	18
6	64	1,5	18
7	36	2,0	18
8	50	2,0	18
9	64	2,0	18
10	36	1,0	30
11	50	1,0	30
12	64	1,0	30
13	36	1,5	30
14	50	1,5	30
15	64	1,5	30
16	36	2,0	30
17	50	2,0	30
18	64	2,0	30
19	36	1,0	42
20	50	1,0	42
21	64	1,0	42
22	36	1,5	42
23	50	1,5	42
24	64	1,5	42
25	36	2,0	42
26	50	2,0	42
27	64	2,0	42

FONTE: Acervo pessoal.

No secador, eram ajustadas a velocidade e temperatura do ar, de acordo com o planejamento, e esperava-se alguns minutos para que o ar alcançasse estabilidade. Alcançada a estabilidade, o recipiente de medida era então colocado na câmara de secagem.

Para verificar a variação de massa das folhas durante os ensaios, foi utilizada uma balança semi-analítica da marca GEHAKA, modelo BK400. As pesagens das amostras então foram realizadas em intervalos de tempos pré-estabelecidos, até que a massa da amostra se encontrasse constante.

Visto que, para determinar a umidade adimensional é necessário ter a umidade de equilíbrio das folhas, foi utilizada a umidade de equilíbrio dinâmica obtida ao final de cada processo de secagem.

Os dados das curvas de razão de umidade em função do tempo foram ajustados aos modelos empíricos e semi-empíricos, que correspondem às equações de 3 a 8. Os dados foram tratados e os valores das constantes determinados através da minimização da soma dos quadrados dos resíduos. O valor da soma dos quadrados dos resíduos (SQR), o erro quadrado médio (EQM) e os coeficientes de correlação (R^2) foram calculados com o auxílio de uma rotina presente no Microsoft Excel 2007 denominada de Solver, sendo as duas primeiras equações determinadas a seguir:

$$SQR = \sum_{i=1}^N (x_{pred,i} - x_{exp,i})^2 \quad (23)$$

$$EQM = \frac{1}{(N)} \sum_{i=1}^N (x_{pred,i} - x_{exp,i})^2 \quad (24)$$

Nestas equações, N representa o número de observações e x os valores preditos pelo modelo e experimentais nos pontos analisados.

Como critério para determinar a melhor qualidade dos ajustes, foram considerados os valores mais próximos da unidade para os R^2 , determinados pela função “correl” presente no Excel, os menores valores da soma dos quadrados dos resíduos (SQR), sendo inferiores a 10% do resíduo encontrado, os menores valores do erro quadrado médio (EQM) e a distribuição aleatória dos resíduos nos gráficos de resíduo.

Para os modelos que foram construídos utilizando a metodologia de superfície de resposta, foi utilizado o software STATISTICA 7. Primeiramente realizou-se a regressão múltipla dos dados para analisar os efeitos individuais e os das interações entre as variáveis independentes na umidade final das folhas e no tempo de secagem. Determinadas as variáveis que apresentaram mais influência no processo, foram então construídos os

modelos e as superfícies de respostas para a umidade final das folhas e o tempo de processo.

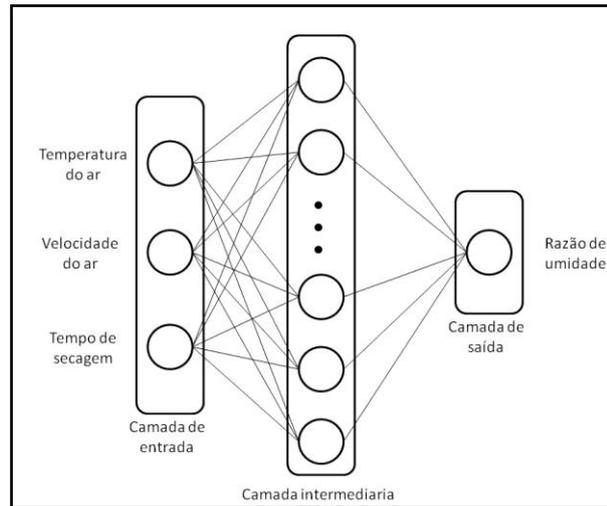
Os dados experimentais da umidade adimensional em função do tempo também foram utilizados para a obtenção de um modelo empírico utilizando Redes Neurais Artificiais. Para o desenvolvimento da rede neural foi utilizada uma subrotina, o Toolbox Neural Network, disponível no software MATLAB®. A rede neural utilizada foi a 'feed-forward', em uma estrutura que apresenta uma única camada intermediária, usando como algoritmo de treinamento o back-propagation, onde os pesos foram ajustados de acordo com o algoritmo de Levenberg-Marquardt (trainlm).

A arquitetura geral da rede neural, a princípio, correspondeu a uma camada de entrada com três neurônios, que correspondem aos valores das variáveis, temperatura do ar, velocidade do ar e o tempo de secagem, para cada massa de amostra. Na camada intermediária uma quantidade de neurônios desconhecida e na camada de saída, um neurônio, onde foram fornecidas as umidades das folhas obtidas durante os ensaios. Na Figura 3.9 está uma representação do esquema estrutural da rede descrita acima.

Para determinar quantos neurônios foram necessários na camada intermediária, foram construídas e investigadas várias redes com diferentes números de neurônios nesta camada. Ao mesmo tempo em que variou-se o número de neurônios, variou-se a distribuição dos dados usados para treinar, validar e testar as mesmas. À medida que as redes eram criadas, foram determinadas a soma do erro quadrado, apresentada na equação 23, e foram construídos, um gráfico de análise de resíduos e gráficos que apresentaram os resultados simulados em comparação aos experimentais.

A fim de determinar a melhor performance da rede, com o número de neurônios necessários, usou-se como critério, a menor soma do erro quadrado, os resíduos distribuídos aleatoriamente (com o valor de r^2 mais próximo de 1) e os gráficos simulados mais próximos dos gráficos experimentais.

Figura 3.9 - Esquema da estrutura da Rede Neural



FONTE: Acervo pessoal.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo os resultados obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho serão apresentados e discutidos.

4.1 Caracterização das folhas

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores encontrados das dimensões características das folhas de hortelã para cada um dos estágios selecionados, conforme descrito no capítulo anterior.

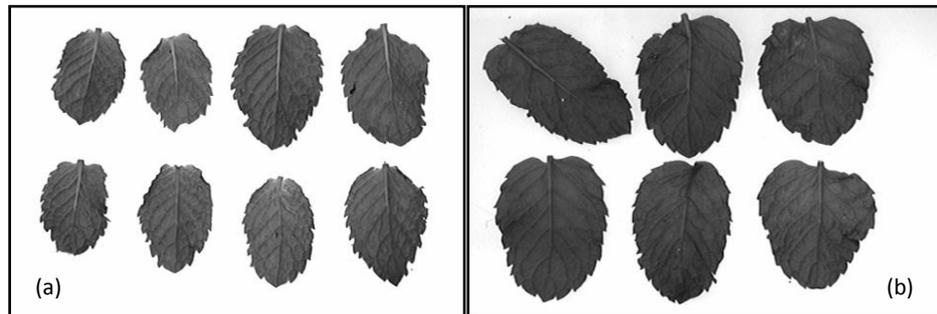
Tabela 4.1 - Propriedades físicas do material.

Estágio das folhas	Área projetada (cm ²)	Perímetro projetado (cm)	Diâmetro máximo (cm)	Diâmetro mínimo (cm)	Diâmetro médio (cm)	Espessura (mm)
Estágio 1	8,296 ± 1,945	12,894 ± 1,647	4,222 ± 0,479	2,467 ± 0,308	3,206 ± 0,368	0,168±0,002
Estágio 2	14,807 ± 2,464	16,696 ± 1,949	5,483 ± 0,576	3,245 ± 0,276	4,238 ± 0,328	

FONTE: Acervo pessoal.

Como esperado, os resultados encontrados na Tabela 4.1 mostraram que as dimensões características para cada estágio apresentaram valores com variações significativas, por exemplo, a área projetada das folhas do primeiro estágio varia aproximadamente de 6 a 10 cm². Outro fator notado foi que as folhas do primeiro estágio são menores que as folhas segundo estágio, o que pode ser observado na Figura 4.1 que apresenta uma foto das folhas nos diferentes estágios do ramo, sendo claramente visualizada a diferença de tamanho das folhas em cada estágio.

Figura 4.1 - Fotos das folhas no (a) estágio um e (b) estágio dois.



FONTE: Acervo pessoal.

O teor de umidade das folhas *in natura* encontrado foi de aproximadamente 88% de umidade (b.u.). Este valor está de acordo com os valores de umidade encontrados na literatura para as plantas medicinais (APKINAR 2010; DOYMAZ; TUGRUL; PALA, 2006).

A densidade aparente do material foi de $0,988 \pm 0,232$ g/mL. Visto que este material apresenta teor de umidade significativamente alto e que a densidade aparente é influenciada pela umidade contida em seu interior, o valor encontrado foi considerado coerente e é semelhante a densidades aparentes das folhas de aroeira e pingo de ouro, encontradas no trabalho de Lima (2009).

4.2 Secagem

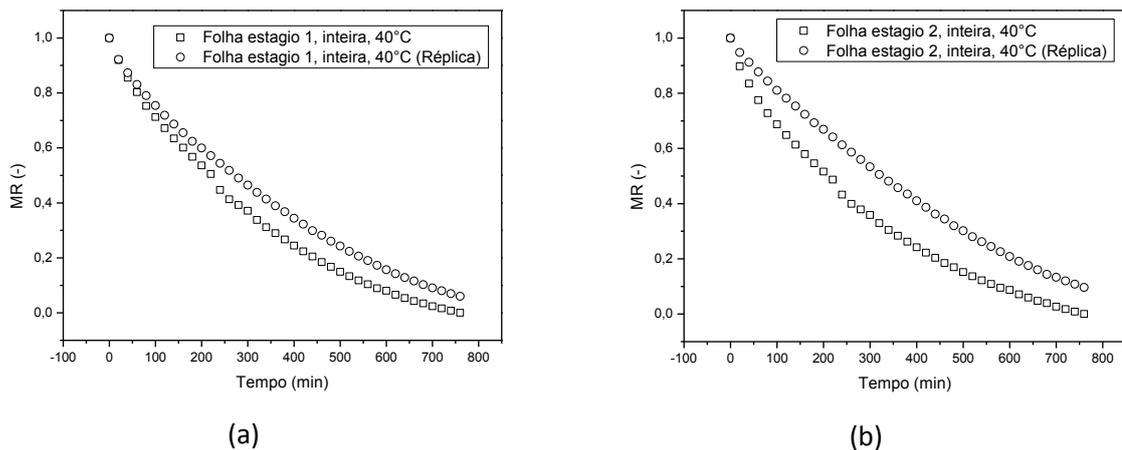
Visando obter informações sobre o processo de secagem das folhas de hortelã, foram construídas curvas de razão de umidade em função do tempo e taxas de secagem em função da razão de umidade para as diferentes condições descritas no capítulo anterior.

4.2.1 Estufa

Os ensaios realizados na estufa tem a finalidade de avaliar a influência dos estágios das folhas e os diferentes tamanhos no processo de secagem. Primeiramente foi analisada a reprodutibilidade dos dados, e é mostrada a Figura 4.2 das curvas da razão de umidade em

função do tempo (e suas réplicas) para folhas inteiras do primeiro e segundo estágio, em ensaios realizados a temperatura de 40°C.

Figura 4.2 - Umidade adimensional em função do tempo para os ensaios realizados em uma estufa a temperatura de 40°C para folhas inteiras do (a) primeiro e (b) segundo estágio e suas réplicas.



FONTE: Acervo pessoal.

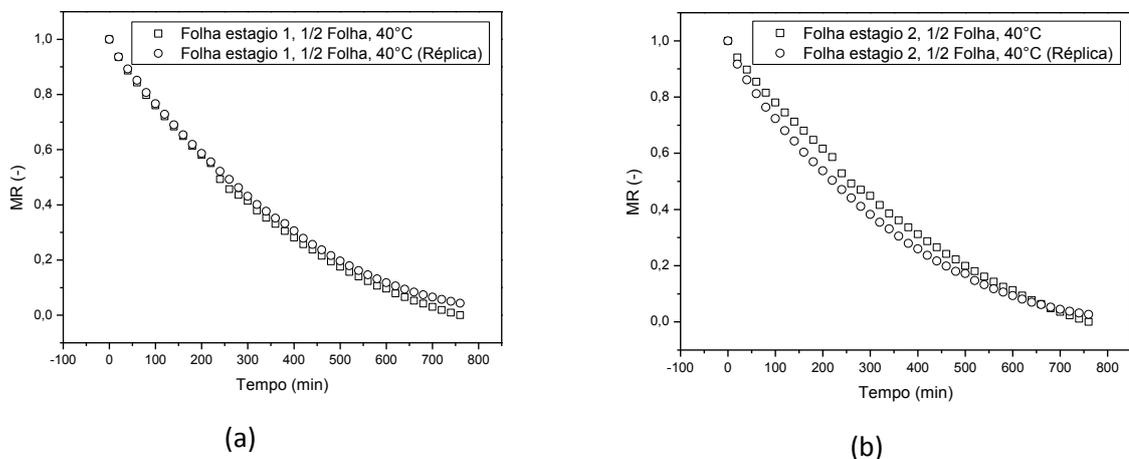
Conforme é apresentado no gráfico, as curvas mostraram um desvio significativo. Na tentativa de reproduzir o leito de folhas tanto na primeira medida como na segunda, as folhas foram misturadas manualmente e desta mistura foram retiradas duas amostras. A forma como as folhas foram acomodadas no recipiente utilizado nos ensaios foi a mesma e com isso esperava-se que as curvas apresentassem respostas muito similares. A Figura 4.2 mostra que isso não foi possível para a temperatura de 40°C e folhas inteiras, pois o significativo desvio encontrado não pode estar relacionado apenas com erros de medidas.

Embora as massas utilizadas tenham se mantido constantes, o comportamento das curvas pode ser explicado devido às características do material, pois as folhas apresentam um formato plano de tamanho irregular, áreas superficiais bem variadas, superfície altamente rugosa e uma densidade baixa. Assim, formam um leito poroso, com estruturas diferentes entre um ensaio e outro, tornando difícil a reprodução de um pacote com características similares, dificultando desta forma a reprodutibilidade dos dados. Além disso, no decorrer do processo de secagem o volume das folhas reduz-se significativamente, e este encolhimento contribuiu para piorar a reprodutibilidade. Observa-se que na literatura, poucos autores analisam com critério a reprodutibilidade na secagem de folhas. Contudo,

Lima (2013) relatou o mesmo tipo de problema na secagem convectiva de folhas de manjeriço.

Para os ensaios realizados com folhas cortadas em duas partes a temperatura de 40°C, a Figura 4.3 apresenta as curvas de razão de umidade em função do tempo e suas réplicas.

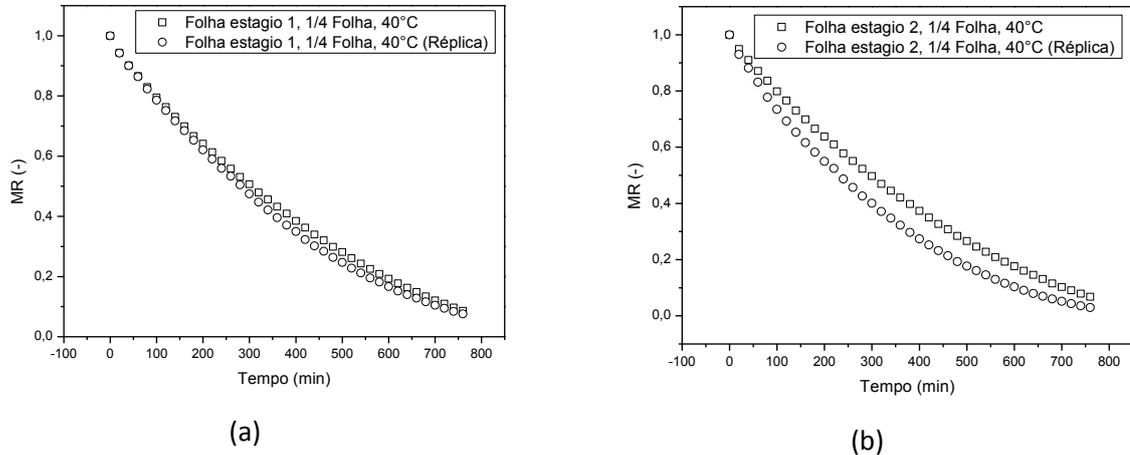
Figura 4.3 - Umidade adimensional em função do tempo para os ensaios realizados em uma estufa a temperatura de 40°C para folhas cortadas em duas partes do (a) primeiro e (b) segundo estágio e suas réplicas;



FONTE: Acervo pessoal.

Conforme é apresentado na Figura 4.3, a redução do tamanho das partículas pela metade proporcionou curvas com desvios entre as réplicas menos significativos do que foi observado para folhas inteiras, podendo ser considerado um indicativo de que a redução do tamanho melhorou a reprodutibilidade. No entanto, quando se analisa a Figura 4.4, que são curvas de razão de umidade em função do tempo (e suas réplicas) para as folhas do estágio um e dois, cortadas em quatro partes, observa-se que esta melhora não foi mantida, pois na Figura 4.4b é visto um desvio significativo entre as curvas. Com isso, não se pode afirmar que a redução do tamanho das folhas irá garantir uma boa reprodutibilidade para os ensaios, já que as folhas apresentam, além do tamanho, outros fatores que dificultam a reprodutibilidade. Na literatura consultada não foi encontrados trabalhos que analisassem, na cinética de secagem, o efeito do estágio de crescimento ou o tamanho das folhas.

Figura 4.4 - Umidade adimensional em função do tempo para os ensaios realizados em uma estufa a temperatura de 40°C para folhas cortadas em quatro partes do (a) primeiro e (b) segundo estágio e suas réplicas;



FONTE: Acervo pessoal.

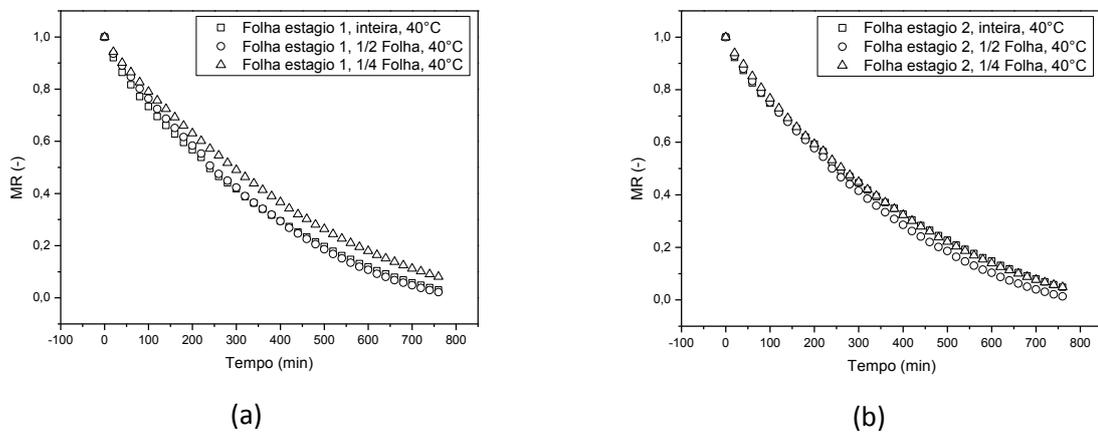
O que pode ter proporcionado este comportamento é que as características das folhas proporcionaram uma estrutura de leito heterogênea, com regiões mais densas que outras, que podem ter resultado na dificuldade de reprodução dos ensaios.

Para as outras condições, temperaturas de 50°C e 60°C realizadas em folhas inteiras, cortadas em duas partes e cortadas em quatro partes, os gráficos podem ser visualizadas no Apêndice A (Figuras A.1, A.2, A.3, A.4, A.5 e A.6). De acordo com o que foi observado, à medida que aumentou a temperatura no processo de secagem, as curvas dos ensaios e suas réplicas apresentaram-se mais próximas entre si em comparação as curvas a 40°C, porém algumas condições ainda mostraram desvios maiores que o erro experimental. Por isso decidiu-se mostrar apenas os ensaios a 40°C, pois esta foi a condição que apresentou os desvios mais acentuados, para ressaltar a complexidade de se trabalhar com este tipo de material.

A partir destes resultados constata-se que, como as folhas são “partículas” planas, com superfície rugosa e possuem áreas superficiais bem variadas, a forma como empacotam dificilmente irá resultar na reprodução de uma mesma estrutura de leito. Assim a reprodutibilidade dos dados de secagem é difícil de ser obtida. Além disto, não se pode esquecer que à medida que transcorre a secagem deste material o leito encolhe, mudando a estrutura ao longo do tempo, e prejudicando ainda mais a reprodução dos ensaios.

Partículas de diferentes tamanhos acomodam-se de diferentes formas no leito, em recipientes de mesmas dimensões. Para analisar se os tamanhos de folhas influenciam a secagem, foram avaliadas as curvas de MR para os tamanhos de folhas inteiras, cortadas em duas partes e cortadas em quatro partes. Na Figura 4.5 apresenta-se as curvas de razão de umidade em função do tempo para os ensaios realizados a temperatura de 40°C para os estágios 1 e 2 das folhas, parametrizando-se o tamanho das mesmas.

Figura 4.5 - Gráficos (a) MR em função do tempo para o primeiro estágio e (b) MR em função do tempo para o segundo estágio, ambos parametrizados no tamanho da folha, resultante da secagem a 40°C.

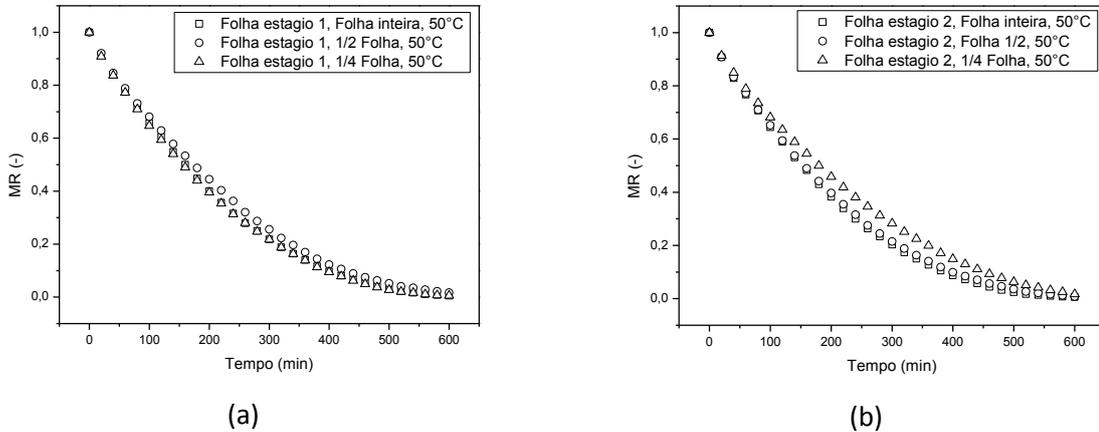


FONTE: Acervo pessoal.

De acordo com os resultados obtidos, as curvas ficaram muito próximas para os diferentes tamanhos das folhas, apresentando um desvio menor do que as curvas das figuras anteriores que ilustram a reprodutibilidade dos dados. Com isso pode-se concluir que para os ensaios realizados na estufa a temperatura de 40°C o tamanho das folhas não tem influência significativa no processo de secagem.

Na Figura 4.6, são mostradas as curvas de razão de umidade em função do tempo para os ensaios realizados à temperatura de 50°C com folhas do primeiro e segundo estágio, parametrizando-se os diferentes tamanhos de folhas.

Figura 4.6 - Gráficos de (a) MR em função do tempo para o primeiro estágio e (b) MR em função do tempo para o segundo estágio, ambos parametrizados no tamanho da folha, resultante da secagem a 50°C.



FONTE: Acervo pessoal.

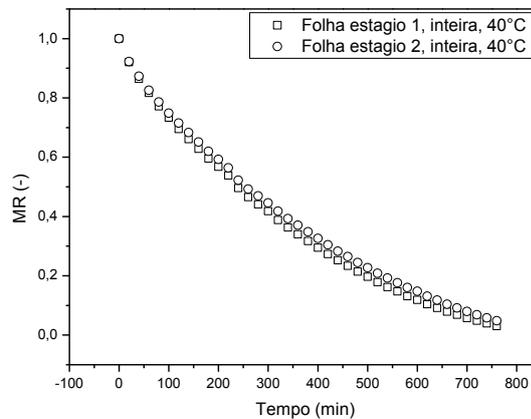
Com o aumento da temperatura, as curvas apresentaram entre elas desvios poucos significativos, podendo-se também afirmar que o tamanho das folhas não influencia no processo de secagem para os ensaios realizados a 50°C.

As curvas para os ensaios realizados a temperatura de 60°C, apresentaram resultados semelhantes e optou-se por não apresentá-las aqui, mas elas podem ser encontradas no Apêndice A (Figuras A.7). Os resultados obtidos mostraram que para a estufa sem convecção o tamanho das folhas não influencia o processo de secagem.

Considerando que o tamanho das folhas não apresentou influência no processo, resolveu-se analisar a influência dos estágios de crescimento do ramo durante o processo de secagem apenas para as folhas inteiras. A Figura 4.7, são as curvas médias de razão de umidade das folhas inteiras para os dois estágios de crescimento.

Ao analisar as curvas médias dos diferentes estágios juntos, é observado que o desvio apresentado é pouco significativo se comparado com os desvios encontrados para as réplicas das folhas inteiras, logo constata-se que para 40°C o estágio de crescimento não influencia no processo de secagem.

Figura 4.7 - Umidade adimensional em função do tempo para os ensaios realizados à temperatura de 40°C, parametrizado no estágio da folha.



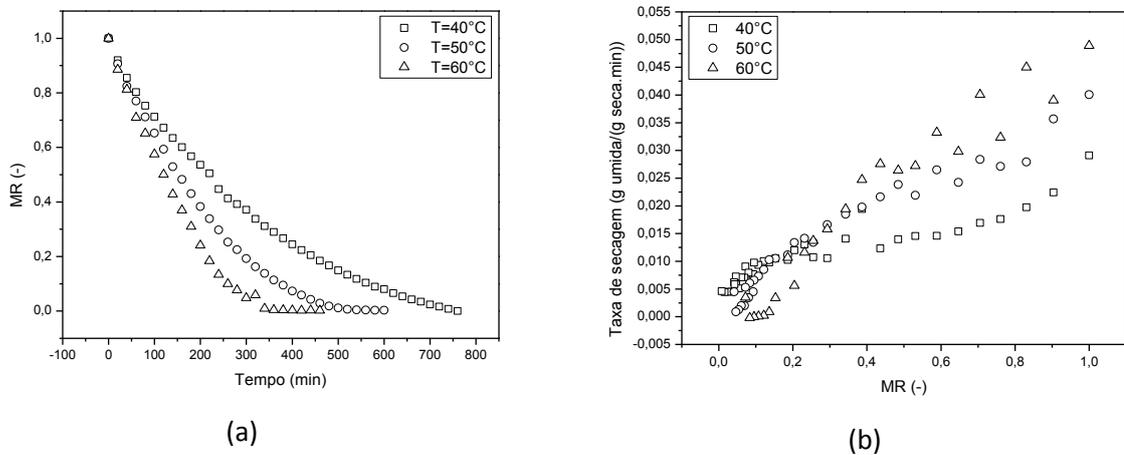
FONTE: Acervo pessoal.

As curvas para os ensaios realizados às temperaturas de 50° e 60°C, comparando-se os estágios das folhas, apresentaram características semelhantes, confirmando que o nível de crescimento das folhas não influencia o processo de secagem da hortelã. Os gráficos podem ser visualizados no apêndice A (Figuras A.8 e A.9).

Como o tamanho das folhas e o nível de crescimento não influenciaram no processo de secagem em estufa escolheu-se, para analisar a influência da temperatura nas curvas de razão de umidade e taxa de secagem, os ensaios realizados com as amostras de folhas inteiras, misturando-se os dois estágios das folhas. A Figura 4.8 apresenta o gráfico de razão de umidade em função do tempo e a taxa de secagem em função da razão de umidade para os ensaios com amostras de folhas inteiras, parametrizando-se as temperaturas dos ensaios.

Conforme a Figura 4.8, o aumento da temperatura do ar conduz a uma maior variação da massa, devido a isso provocou uma redução no tempo da secagem do material, atingindo mais rapidamente a umidade de equilíbrio. No aumento da temperatura de 40°C para 50°C, o tempo necessário para se atingir o equilíbrio foi reduzido em 21% e ao aumentar de 50°C para 60°C o tempo foi reduzido em 23%. Com o aumento da temperatura do ar há um aumento da transferência de calor ao material, fazendo com que a umidade presente seja evaporada mais rapidamente.

Figura 4.8 - Gráficos de (a) MR em função do tempo e (b) taxa de secagem em função de MR, ambos para o ensaio com folhas interias, parametrizado na temperatura.



FONTE: Acervo pessoal.

Analisando as curvas da taxa de secagem, é confirmada a influência da temperatura, pois o aumento desta variável aumentou as taxas de secagem. Outro fator que é visualizado na curva é a presença de um único período existente na secagem das folhas, o período de taxa decrescente. Baseado nisso pode-se afirmar que a resistência ao transporte de umidade encontra-se no interior do material, logo a transferência interna de umidade é o mecanismo controlador durante a secagem das folhas de hortelã por convecção natural. Deve-se ressaltar que o que está sendo analisado é o conjunto de folhas e não uma única unidade, logo o transporte de umidade além de ocorrer no interior do material ocorre também nos interstícios das folhas, até que alcance a superfície do leito.

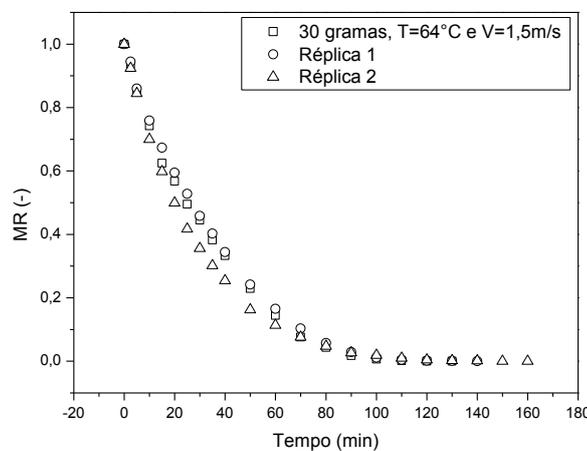
4.2.2 Secador convectivo horizontal

Até o momento foi analisada a secagem das folhas de hortelã com convecção natural e mostrou-se que o tamanho das folhas não influencia o processo de secagem. Agora pretende-se analisar como se comporta este tipo de material através da secagem com convecção forçada, utilizando-se um secador convectivo horizontal. Neste tipo de secador o escoamento de ar ocorre nas superfícies da amostra e como o ar não atravessa os interstícios do leito, acredita-se que a forma como as folhas se acomodam não irá influenciar

na secagem, como visto durante a secagem na estufa. Baseando-se nisso, todos os ensaios foram realizados apenas com folhas inteiras.

Para os ensaios realizados no secador convectivo, escolheu-se uma condição aleatória que é apresentada na Figura 4.9, com os resultados das umidades adimensionais em função do tempo para os experimentos realizados em amostras com 30 gramas e suas réplicas, a temperatura do ar a 64°C e velocidade do ar de 1,5m/s.

Figura 4.9 - Razão de umidade em função do tempo para os ensaios a temperatura de 64°C e velocidade de 1,5m/s.



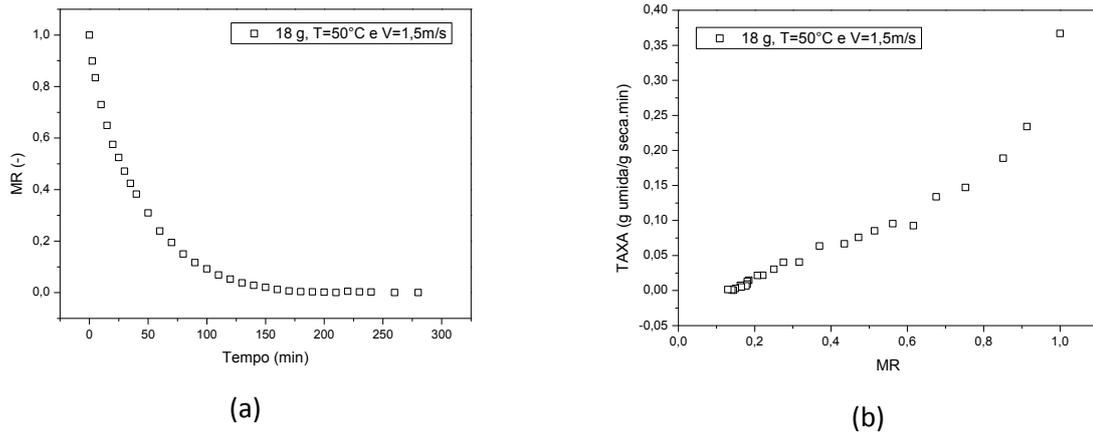
FONTE: Acervo pessoal.

O gráfico apresentado tem a função de mostrar a reprodutibilidade dos dados. Surpreendentemente, as curvas mostraram uma reprodutibilidade aceitável considerando as dificuldades discutidas anteriormente. Até o momento tem se partido da ideia de que a secagem depende muito da estrutura em que se encontra o recheio de folhas, não se podendo esquecer também das mudanças que as folhas sofrem no decorrer do processo que torna, para este tipo de material, a reprodutibilidade muito difícil. Porém não ficou claro porque para este tipo de escoamento durante o processo, a secagem tornou-se reprodutível.

Com o intuito de analisar se a adição de um escoamento forçado na secagem de folhas poderá influenciar sobre o mecanismo responsável pelo transporte de massa, diferenciando-se ou não do resultado obtido pela secagem na estufa, escolheu-se uma condição aleatória estabelecida no planejamento para construir as curvas de razão de umidade e taxa de secagem.

Na Figura 4.10 é apresentado a MR em função do tempo e a taxa de secagem em função do MR para o ensaio realizado em amostra com 18 gramas com a temperatura do ar igual e 50°C e velocidade do ar de 1,0 m/s.

Figura 4.10 - Gráficos de (a) MR em função do tempo e (b) taxa de secagem em função de MR, ambos para o ensaio com amostra de 18 gramas, temperatura do ar 50°C e velocidade igual a 1,0m/s.



FONTE: Acervo pessoal.

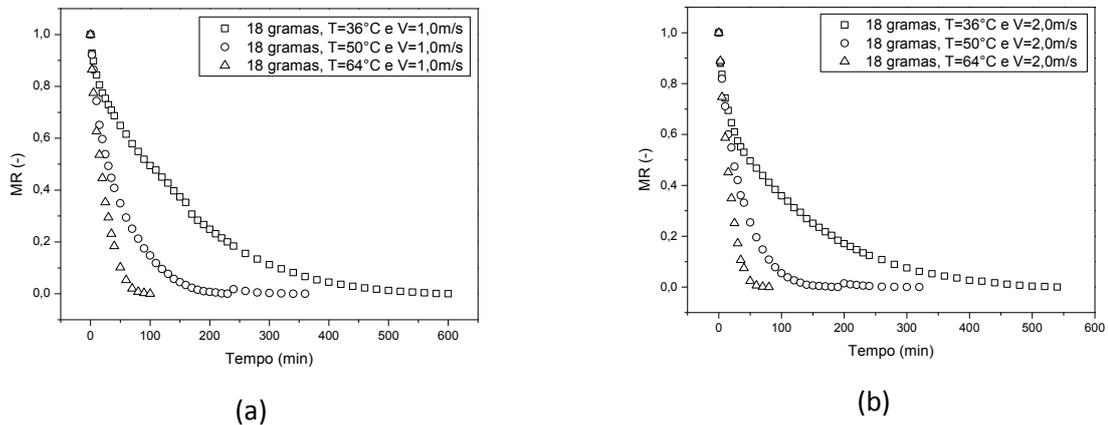
Observando primeiramente o gráfico de razão de umidade em função do tempo (a), aparentemente a curva não apresenta um período de taxa constante. Para confirmar esta hipótese, a análise é complementada com o gráfico de taxa de secagem em função da MR (b) e a curva apresentou um único período, o período de taxa decrescente. Logo, no transporte de umidade no interior do material o mecanismo que predomina é a transferência interna de massa. De modo geral, as demais curvas apresentaram comportamento similar para todas as condições investigadas.

O resultado encontrado está de acordo com os trabalhos de secagem de folhas como salsa, louro, hortelã (*Mentha spicata L.*), urtiga, capim-limão em camada fina (KAYA E ADIN, 2009; MARTINS, 2000; DOYMAZ, 2006; DOYMAZ; TUGRUL; PALA, 2006; GUNHAN et al., 2005).

Para analisar a influência da temperatura no processo de secagem na Figura 4.11 são apresentadas as curvas de MR em função do tempo para as diferentes condições experimentais realizadas em amostras com 18 gramas, para as condições extremas de velocidades do ar (1,0m/s e 2,0 m/s). O gráfico das curvas referentes aos ensaios realizados

com velocidade do ar de 1,5m/s, já que apresentaram o mesmo comportamento que as condições extremas de velocidade, estará disponível apenas no Apêndice B (Figura B.1).

Figura 4.11 - Gráficos de MR em função do tempo para as amostras com 18 gramas e velocidade do ar de (a) 1,0m/s e (b) 2,0 m/s, ambos parametrizados na temperatura.



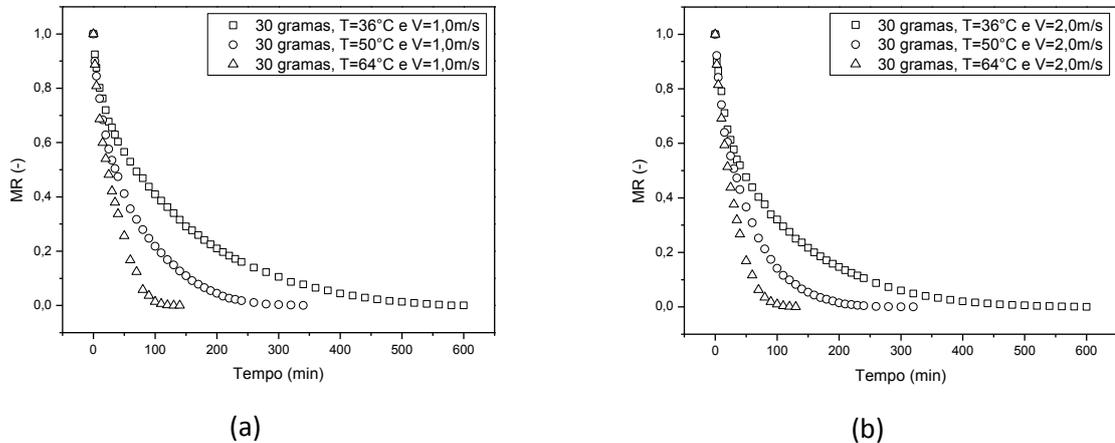
FONTE: Acervo pessoal.

Conforme os gráficos de razão de umidade em função do tempo é visível a influência direta da temperatura durante o processo de secagem independente da velocidade do ar trabalhada, resultado típico ao se parametrizar a temperatura do processo de secagem. O aumento da temperatura reduziu significativamente o tempo necessário para que a folha de hortelã alcance a umidade de equilíbrio e esta redução foi mais pronunciada para as curvas que representam a secagem à temperatura de 64°C. Realizando uma análise quantitativa para as amostras com 18 gramas e experimentos realizados a 2,0 m/s, por exemplo, aumentando a temperatura de 36°C para 50°C, o tempo reduziu em aproximadamente 42,31%, e aumentando de 50°C para 64°C o tempo reduziu em 76,67%.

A Figura. 4.12 mostra os gráficos de MR em função de tempo para as amostras com 30 gramas e velocidade de (a) 1,0m/s e (b) 2,0m/s, parametrizando as temperaturas do ar. O gráfico para os ensaios com velocidade de 1,5m/s, encontra-se no Apêndice B (Figura B.2).

Ao analisar estes gráficos e compará-los com os gráficos da Figura 4.11, observa-se um comportamento semelhante, mostrando a forte influência da temperatura, independentemente da velocidade do ar.

Figura 4.12 - Gráficos de MR em função do tempo para as amostras com 30 gramas e velocidade do ar de (a) 1,0 m/s e (b) 2,0m/s, ambos parametrizados na temperatura.



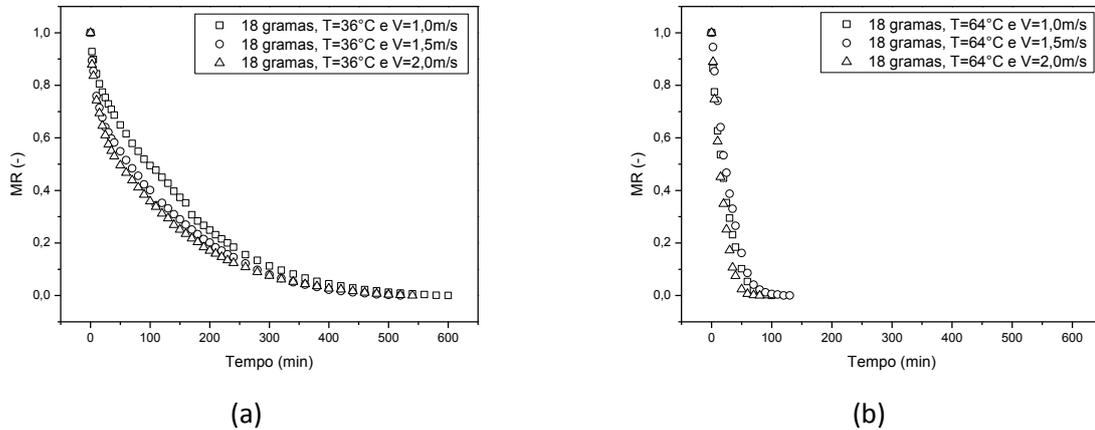
FONTE: Acervo pessoal.

Este mesmo comportamento foi observado nos gráficos que representam os ensaios realizados em amostras com 42 gramas e que podem ser visualizados no Apêndice B (Figuras B.3, B.4, e B.5).

Com base nos resultados pode-se constatar que, independente da velocidade do ar e da quantidade da amostra analisadas, a temperatura do ar apresenta um forte efeito nas curvas de cinética de secagem e seu aumento possibilita que a amostra atinja mais rapidamente a umidade de equilíbrio. O aumento da temperatura proporcionou um aumento na quantidade de calor transferido para o leito, aumentando assim a taxa de evaporação de água na superfície e também a velocidade com que umidade do interior da amostra migra para superfície.

Visto que a temperatura apresenta uma forte influência no processo de secagem de folhas de hortelã, na Figura 4.13 são mostrados os gráficos de razão de umidade em função do tempo para os ensaios realizados com amostra de 18 gramas e temperaturas do ar de 36°C e 64°C, parametrizando as velocidades do ar trabalhadas, com a finalidade de analisar a influência da velocidade do ar na secagem deste material. As curvas que representam os ensaios realizados com a temperatura de 50°C apresentam o mesmo comportamento e podem ser visualizadas no Apêndice B (Figura B.6).

Figura 4.13 - Gráficos de MR em função do tempo para as amostras com 18 gramas e temperatura do ar de (a) 36°C e (b) 64°C, ambos parametrizados na velocidade do ar.



FONTE: Acervo pessoal.

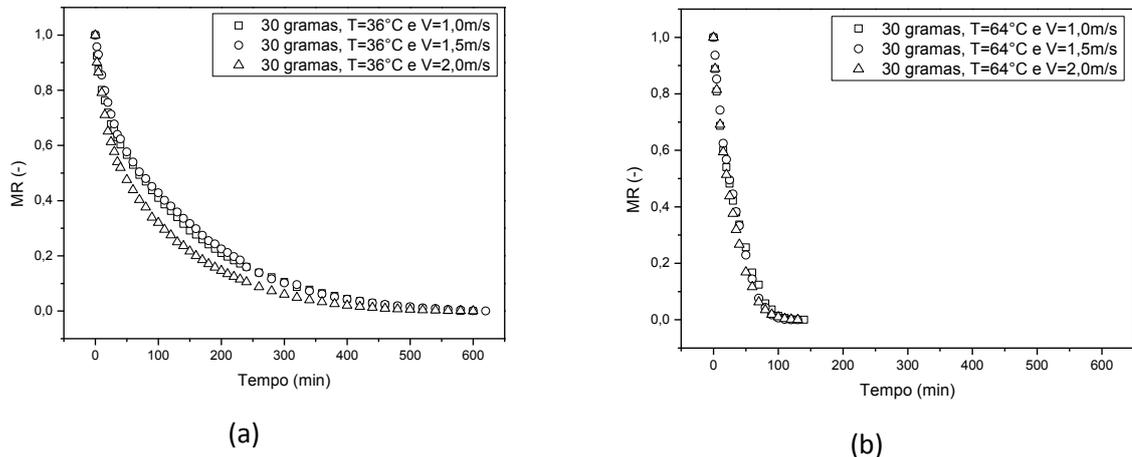
Ao analisar os gráficos de razão de umidade, observou-se que a variação da velocidade do ar apresentou uma menor influência nas curvas, um comportamento diferente do mostrado nas análises para a influência da temperatura. Ao analisar quantitativamente a redução do tempo necessário para que a amostra atingisse o equilíbrio em um ensaio realizado com a temperatura de 36°C, por exemplo, o aumento da velocidade de 1,0m/s para 1,5m/s reduziu este tempo em 13,33% e aumentando de 1,5 para 2,0m/s, o tempo para que a mesma amostra atingisse o equilíbrio não foi reduzido.

A Figura 4.14 apresenta o gráfico de razão de umidade em função do tempo para os ensaios realizados com 30 gramas nas temperaturas de 36°C e 64°C parametrizando as velocidades do ar apresentadas nos gráficos. Os ensaios realizados em temperaturas de 50°C, nos quais foi observado o mesmo comportamento, estão apresentados no Apêndice B (Figura B.7).

Analisando estes gráficos e comparando com os da figura anterior é observado o mesmo comportamento, ou seja, a pouca influência da velocidade do ar durante a secagem de folhas de hortelã. O mesmo comportamento foi observado também para os gráficos dos ensaios realizados em amostras com 42 gramas e para as diferentes temperaturas trabalhadas, que podem ser visualizados no Apêndice B (Figuras B.8, B.9 e B.10). Conclui-se assim que independente da quantidade da amostra e da temperatura do ar, a velocidade do

fluido é uma variável que não exerceu influência significativa no processo de secagem para este tipo de material.

Figura 4.14 - Gráficos de MR em função do tempo para as amostras com 30 gramas e temperatura do ar de (a) 36°C e (b) 64°C, ambos parametrizado na velocidade do ar.



FONTE: Acervo pessoal.

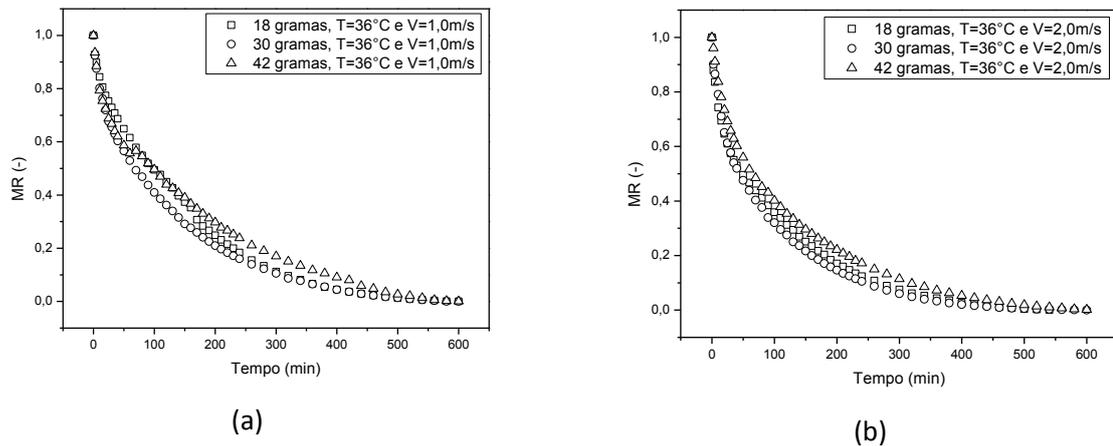
Resultados semelhantes foram encontrados por Erbay e Icier (2010) na secagem convectiva das folhas de oliva (*Olea Europaea L.*), com escoamento de ar paralelo às amostras. Motta Lima, Pereira e Mendes (2002), também avaliaram a secagem convectiva de papel artesanal com escoamento do ar paralelo às amostras. Mesmo sendo um material com propriedades diferentes da hortelã, o papel tem em comum a elevada área superficial. Ao analisar a influência da temperatura e velocidade do ar no período de taxa decrescente da secagem, os autores observaram comportamentos semelhantes aos observados no presente trabalho.

Como também foram trabalhadas diferentes massas de amostras e nestes casos o que variou foi a espessura da mesma, verificou-se se as diferentes massas de amostra influenciam o processo de secagem das folhas com esta configuração de escoamento.

Para analisar esta influência, primeiramente é apresentada a Figura 4.15 que mostra os gráficos de razão de umidade em função do tempo para os ensaios realizados com a temperatura de 36°C e velocidades do ar de 1,0m/s e 2,0m/s, parametrizando as massas das amostras. Decidiu-se apresentar apenas as condições extremas, pois o mesmo comportamento foi observado para os ensaios realizados para as diferentes velocidades do

ar analisadas, podendo-se visualizar os gráficos dos ensaios realizados às temperaturas de 36°, 50° e 60°C e velocidade de 1,5m/s no Apêndice B (Figuras B.11, B.12 e B.13).

Figura 4.15 - Gráficos de MR em função do tempo para os ensaios realizados à temperatura do ar de 36°C e velocidade do ar de (a) 1,0m/s e (b) 2,0m/s, ambos parametrizados na massa da amostra.

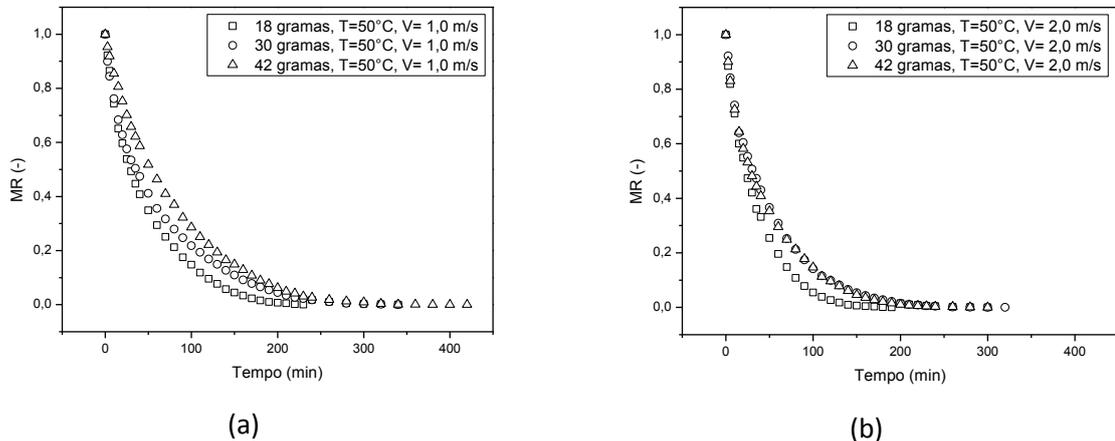


FONTE: Acervo pessoal.

Conforme é mostrado na figura, tanto para os ensaios a 1,0 m/s como a 2,0m/s, as curvas para as diferentes massas de amostras estão muito próximas mostrando que os desvios apresentados são pouco significantes comparados com as das réplicas, podendo-se concluir que a quantidade da amostra não influenciou no processo de secagem para as temperaturas de 36°C. Este comportamento está relacionado com a resistência interna à transferência de massa, pois, para as temperaturas de 36°C, a taxa com que a umidade é evaporada nas superfícies das amostras é baixa, fazendo com que a velocidade que a umidade se desloca do interior do material até a superfície não seja limitante no processo. Desta forma as espessuras das amostras não representaram uma dificuldade durante a migração de água. Com isso, a resistência interna não é significativa à temperatura de 36°C.

Na Figura 4.16, observa-se as curvas de razão de umidade em função do tempo para os ensaios realizados para temperatura de 50°C e velocidades do ar de 1,0m/s e 2,0m/s parametrizando as massas das amostras apresentadas nos gráficos.

Figura 4.16 - Gráficos de MR em função do tempo para os ensaios realizados a temperatura do ar de 50°C e velocidade do ar de (a) 1,0m/s e (b) 2,0 m/s, ambos parametrizados na massa da amostra.

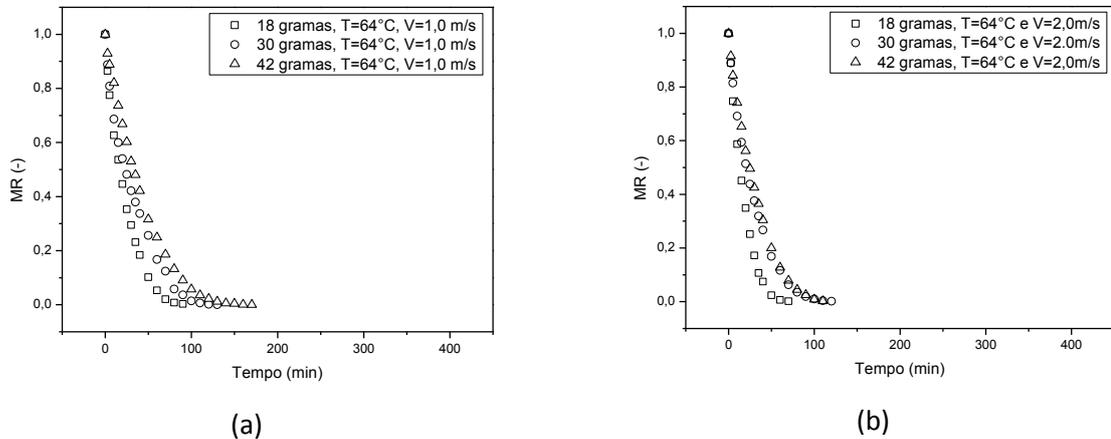


FONTE: Acervo pessoal.

Analisando-se o gráfico, observa-se que ao aumentar a temperatura, a massa da amostra passa a apresentar uma influência no processo de secagem, tornando a secagem mais lenta para as amostras com 30 e 42 gramas. Isto ocorre porque a taxa de secagem nas superfícies das amostras aumenta à temperatura de 50°C, sendo maior que a velocidade com que a umidade migra do interior até a superfície. Desta forma a resistência interna tornou-se significativa, durante a secagem a esta temperatura, e passa a ser limitante no processo. Este fato também pode ser confirmado pelas curvas de razão de umidade em função do tempo para os ensaios realizados a temperatura de 64°C e velocidades de 1,0m/s e 2,0m/s, que são apresentados na Figura 4.17.

Observa-se nos gráficos, que para os ensaios a temperatura de 64°C as diferentes massas das amostras apresentaram uma influência mais pronunciada, ou seja, as espessuras das amostras representaram uma resistência para a migração de umidade e as amostras com massas de 18 gramas alcançaram a umidade de equilíbrio mais rapidamente do que as amostras com 30 e 42 gramas.

Figura 4.17 - Gráficos de MR em função do tempo para os ensaios realizados a temperatura do ar de 64°C e velocidade do ar de (a) 1,0m/s (b) 2,0m/s, ambos parametrizados na massa da amostra.



FONTE: Acervo pessoal.

Analisando as diferentes quantidades mássicas para as variadas temperaturas do ar, foi possível observar que à medida que aumentou a temperatura o efeito da resistência interna para o transporte de umidade do interior para a superfície foi mais significativo, pois a taxa com que a umidade é evaporada na superfície das amostras aumentou com o aumento da temperatura. Logo o aumento da espessura das amostras, em altas temperaturas, casou uma redução na taxa de secagem no leito de folhas e conseqüentemente fez com que necessitassem de um tempo maior para a secagem destas amostras.

Ajuste dos modelos

Seis modelos semi-empíricos de cinética de secagem, Equações 3 a 8 presentes no Capítulo 2, foram ajustados aos dados de umidade em função do tempo obtidos em cada condição estabelecida no planejamento experimental. Os resultados das análises estatísticas, para as diferentes massas das amostras, encontram-se nas Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4.

De um modo geral, o modelo de Lewis foi o que apresentou para a maioria das condições testadas, os valores da soma de quadrados dos resíduos e o erro quadrado médio

superiores ao restante dos modelos. O que pode estar relacionado com estes resultados é o fato do modelo apresentar um único parâmetro de ajuste para estimar as curvas de cinética de secagem experimental.

Pode-se observar também que o modelo de Page e o modelo de Page modificado apresentaram valores semelhantes em seus critérios estatísticos (SQR e EQM). Este resultado já era esperado, visto que as equações são equivalentes.

Ao analisar os dados separadamente, referentes aos ajustes para as amostras com 18 gramas, Tabela 4.2, pode-se observar que os valores dos coeficientes de correlação apresentaram um valor superior a 0,98, na maioria das condições. Este valor indica um bom ajuste dos modelos aos dados experimentais.

Comparando os conjuntos de valores dos coeficientes de correlação, SQR, EQM dos modelos, para determinar qual melhor se ajustou aos dados, pode-se notar que o modelo de Dois Termos foi que apresentou a maioria dos valores de R^2 superiores a 0,99, os menores valores de SQR, variando de 0,0018 a 0,0655, e os menores valores do EQM, variando de 0,0002 a 0,0012. Este melhor ajuste está relacionado com o número de parâmetros que a equação apresenta (quatro parâmetros de ajuste) e isso proporcionou um maior grau de liberdade para a equação, tornando o ajuste mais adequado aos dados.

Porém, considerando que modelos com muitos parâmetros oferecem uma maior dificuldade para o uso, selecionou-se, entre os modelos com menos de dois parâmetros, o que apresentou melhor desempenho. Baseado neste critério, o modelo de Henderson-Pabis foi o que melhor se ajustou os dados dos ensaios com 18 gramas, apresentando a maioria dos R^2 com valores superiores a 0,99, as SQR variando entre 0,006 e 0,0655 e EQM variando entre 0,0002 e 0,0012. Notou-se que os parâmetros estatísticos deste modelo não se apresentaram tão inferiores aos modelos de Dois Termos, podendo-se recomendar o uso deste modelo pela praticidade.

Tabela 4.2 - Resultado das análises estatísticas dos modelos em camada fina para amostra com 18 gramas.

Modelo	T(°C)	V(m/s)	Coeficientes			R ²	SQR	EQM	
Lewis	36	1	k=0,0072			0,9907	0,0675	0,0014	
	36	1,5	k=0,0096			0,9782	0,0468	0,0011	
	36	2	k=0,0109			0,9751	0,2305	0,0042	
	50	1	k=0,0220			0,9948	0,0231	0,0008	
	50	1,5	k=0,0251			0,9896	0,0111	0,0004	
	50	2	k= 0,0293			0,9792	0,0096	0,0004	
	64	1	k=0,0432			0,9965	0,0066	0,0004	
	64	1,5	k=0,0334			0,9916	0,0162	0,0009	
Page	64	2	k=0,0566			0,9974	0,0062	0,0005	
	36	1	k=0,0004;	n=1,5926		0,9756	0,4104	0,0086	
	36	1,5	k=0,0392;	n=0,7080		0,9871	0,0468	0,0011	
	36	2	k=0,0538;	n=0,6608		0,9914	0,0296	0,0005	
	50	1	k=0,0378;	n=0,8619		0,9980	0,0063	0,0002	
	50	1,5	k=0,0007;	n=1,9972		0,9960	0,2878	0,0107	
	50	2	k=0,0408;	n=0,9090		0,9920	0,0045	0,0002	
	64	1	k=0,0449;	n=0,9879		0,9965	0,0066	0,0004	
Page Modificado	64	1,5	k=0,0183;	n=1,1727		0,9979	0,0050	0,0003	
	64	2	k=0,0423;	n=1,0971		0,9979	0,0036	0,0003	
	36	1	k=0,0073;	n=0,8886		0,9899	0,0504	0,0011	
	36	1,5	k=0,0103;	n=0,7080		0,9871	0,0468	0,0011	
	36	2	k=0,0120;	n=0,6608		0,9914	0,0296	0,0005	
	50	1	k=0,0223;	n=0,8619		0,9980	0,0063	0,0002	
	50	1,5	k=0,0253;	n=0,9081		0,9960	0,0045	0,0002	
	50	2	k=0,0296;	n=0,9085		0,9808	0,0045	0,0002	
Henderson Pabis	64	1	k=0,0432;	n=0,9879		0,9965	0,0066	0,0004	
	64	1,5	k=0,0331;	n=1,1727		0,9979	0,0050	0,0003	
	64	2	k=0,0560;	n=1,0971		0,9979	0,0036	0,0003	
	36	1	a=0,9264;	k=0,0066		0,9941	0,0285	0,0006	
	36	1,5	a=0,8499;	k=0,0077		0,9842	0,0524	0,0012	
	36	2	a=0,8276;	k=0,0085		0,9796	0,0655	0,0012	
	50	1	a=0,9455;	k=0,0204		0,9952	0,0131	0,0005	
	50	1,5	a=0,9558;	k=0,0237		0,9904	0,0050	0,0002	
Logarítmico	50	2	a=0,9583;	k=0,0278		0,9981	0,0047	0,0002	
	64	1	a=0,9811;	k=0,0422		0,9971	0,0066	0,0004	
	64	1,5	a=1,0317;	k=0,0346		0,9950	0,0136	0,0008	
	64	2	a=1,0166;	k=0,0577		0,9970	0,0060	0,0004	
	36	1	a=0,9545;	k=0,0059;	c=-0,0392	0,9954	0,0201	0,0004	
	36	1,5	a=0,8553;	k=0,0075;	c=-0,0083	0,9843	0,0520	0,0012	
	36	2	a=0,8195;	k=0,0089;	c=0,0141	0,9799	0,0641	0,0012	
	50	1	a=0,9442;	k=0,0206;	c=0,0026	0,9952	0,0131	0,0005	
Dois Termos	50	1,5	a=0,9596;	k=0,0232;	c=-0,0066	0,9987	0,0047	0,0023	
	50	2	a=0,9515;	k=0,0273;	c=-0,0055	0,9981	0,0045	0,0002	
	64	1	a=1,0051;	k=0,0386;	c=-0,0338	0,9981	0,0031	0,0002	
	64	1,5	a=1,0719;	k=0,0303;	c=-0,0552	0,9974	0,0054	0,0003	
	64	2	a=1,0425;	k=0,0525;	c=-0,0358	0,9982	0,0029	0,0002	
	36	1	a=0,9159;	k1=0,0064;	b=0,0834;	k2=2,6802	0,9957	0,0222	0,0005
	36	1,5	a=0,7804;	k1=0,0070;	b=0,2184;	k2=0,1867	0,9976	0,0097	0,0002
	36	2	a=0,4138;	k1=0,0084;	b=0,4138;	k2=0,0085	0,9796	0,0655	0,0012
Dois Termos	50	1	a=0,1544;	k1=0,1443;	b=0,8507;	k2=0,0182	0,9991	0,0032	0,0001
	50	1,5	a=0,0739;	k1=0,4996;	b=0,9279;	k2=0,0229	0,9995	0,0018	0,0001
	50	2	a=0,9257;	k1=0,0267;	b=0,0741;	k2=0,5096	0,9994	0,0019	0,0001
	64	1	a=0,9620;	k1=0,0413;	b=0,0319;	k2=0,4131	0,9974	0,0055	0,0003
	64	1,5	a=2,1220;	k1=0,0475;	b=-1,1333;	k2=0,0699	0,9981	0,0045	0,0003
	64	2	a=1,7778;	k1=0,0723;	b=-0,7842;	k2=0,1063	0,9982	0,0031	0,0002

FONTE: Acervo pessoal.

A Tabela 4.3 apresenta o ajuste dos dados para os ensaios realizados com as amostras de 30 gramas, e foi observado para a maioria das condições dos modelos ajustados, os coeficientes de determinação foram de aproximadamente 0,99, indicando um excelente ajuste. Desta forma, o modelo que obteve os melhores ajustes foi o de Dois Termos com os valores de R^2 superiores a 0,99, os menores valores de SQR, variando entre 0,0019 e 0,0150, e os menores valores de EQM, variando entre 0 e 0,0007.

Dos modelos com dois ou menos parâmetros, o modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados, apresentando também valores de R^2 superiores a 0,99, os menores valores de SQR, variando entre 0,0067 e 0,0225 e os menores valores de EQM, variando entre 0,0002 e 0,0008. Para esta quantidade de amostra, notou-se também que os valores encontrados nos parâmetros deste modelo não apresentaram diferença significativa com relação ao modelo de Dois Termos.

A Tabela 4.4 apresenta os ajustes dos modelos empíricos de secagem aos dados para os ensaios realizados com amostra de 42 gramas. Analisando os dados, verifica-se que os coeficientes de determinação foram superiores a 0,98, indicando um bom ajuste dos modelos para as amostras com espessuras de 3,5 cm. Baseado nos critérios citados no capítulo anterior, o modelo de Dois Termos foi o que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais com a maioria dos R^2 superiores a 0,99, os menores valores da SQR, variando de 0,0023 a 0,0415, e os menores valores de EQM, variando de 0,0001 a 0,0008. Com relação aos modelos mais simples, com menos de dois parâmetros, o modelo de Page foi o que melhor ajustou os dados, apresentando o R^2 superiores a 0,98, os menores valores de SQR, variando de 0,0055 a 0,0722, e os menores valores de EQM, variando de 0,0002 a 0,0015.

Tabela 4.3 - Resultado das análises estatísticas dos modelos em camada fina para amostra com 30 gramas.

Modelo	T(°C)	V(m/s)	Coeficientes			R ²	SQR	EQM	
Lewis	36	1	k=0,0089			0,9874	0,1332	0,0028	
	36	1,5	k=0,0084			0,9894	0,0920	0,0018	
	36	2	k=0,0122			0,9826	0,1582	0,0033	
	50	1	k=0,0174			0,9920	0,0554	0,0015	
	50	1,5	k=0,0205			0,9951	0,0233	0,0008	
	50	2	k=0,0212			0,9951	0,0262	0,0008	
	64	1	k=0,0304			0,9925	0,0176	0,0009	
	64	1,5	k=0,03001			0,9947	0,0163	0,0009	
Page	64	2	k=0,0347			0,9971	0,0068	0,0004	
	36	1	k=0,0313;	n=0,7425		0,9947	0,0225	0,0005	
	36	1,5	k=0,0001;	n=1,9987		0,9279	0,8982	0,0180	
	36	2	k=0,0481;	n=0,6994		0,9972	0,0112	0,0002	
	50	1	k=0,0409;	n=0,7963		0,9976	0,0084	0,0002	
	50	1,5	k=0,0339;	n=0,8749		0,9972	0,0092	0,0003	
	50	2	k=0,0379;	n=0,8542		0,9979	0,0070	0,0002	
	64	1	k=0,0358;	n=0,9551		0,9928	0,0165	0,0008	
Page Modificado	64	1,5	k=0,0209;	n=1,1009		0,9952	0,1116	0,0006	
	64	2	k=0,0331;	n=1,0137		0,9971	0,0067	0,0004	
	36	1	k=0,0094;	n=0,7425		0,9947	0,0225	0,0005	
	36	1,5	k=0,0087;	n=0,7926		0,9955	0,0212	0,0004	
	36	2	k=0,0130;	n=0,6994		0,9971	0,0112	0,0002	
	50	1	k=0,0181;	n=0,7963		0,9976	0,0084	0,0002	
	50	1,5	k=0,0209;	n=0,8749		0,9972	0,0092	0,0003	
	50	2	k=0,0217;	n=0,8541		0,9979	0,0070	0,0002	
Henderson Pabis	64	1	k=0,0306;	n=0,9550		0,9928	0,0165	0,0008	
	64	1,5	k=0,0298;	n=1,1009		0,9952	0,0112	0,0006	
	64	2	k=0,0346;	n=1,0137		0,9971	0,0067	0,0004	
	36	1	a=0,8760;	k=0,0075		0,9902	0,0375	0,0008	
	36	1,5	a=0,9081;	k=0,0075		0,9911	0,0383	0,0008	
	36	2	a=0,8593;	k=0,0099		0,9841	0,0589	0,0012	
	50	1	a=0,9074;	k=0,0153		0,9931	0,0213	0,0006	
	50	1,5	a=0,9414;	k=0,0190		0,9962	0,0109	0,0004	
Logarítmico	50	2	a=0,9372;	k=0,0195		0,9959	0,0124	0,0000	
	64	1	a=0,9648;	k=0,0291		0,9940	0,0141	0,0007	
	64	1,5	a=1,0121;	k=0,0305		0,9942	0,0158	0,0008	
	64	2	a=0,9869;	k=0,0341		0,9975	0,0064	0,0003	
	36	1	a=0,8724;	k=0,0076;	c=0,0059	0,9903	0,0372	0,0008	
	36	1,5	a=0,9068;	k=0,0075;	c=0,0021	0,9911	0,8383	0,0008	
	36	2	a=0,8499;	k=0,0106;	c=0,0192	0,9848	0,0546	0,0011	
	50	1	a=0,9034;	k=0,0158;	c=0,0081	0,9932	0,0208	0,0006	
Dois Termos	50	1,5	a=0,9445;	k=0,0186;	c=-0,0057	0,9963	0,0107	0,0003	
	50	2	a=0,9359;	k=0,0197;	c=0,0024	0,9959	0,0124	0,0004	
	64	1	a=0,9940;	k=0,0259;	c=-0,0428	0,9956	0,0090	0,0004	
	64	1,5	a=1,0577;	k=0,0260;	c=-0,0633	0,9972	0,0061	0,0003	
	64	2	a=1,0090;	k=0,0313;	c=-0,0323	0,9986	0,0029	0,0002	
	36	1	a=0,1952;	k1=0,1297;	b=0,8016;	k2=0,0068	0,9994	0,0028	0,0001
	36	1,5	a=0,1925;	k1=0,0821;	b=0,8161;	k2=0,0066	0,9988	0,0063	0,0001
	36	2	a=0,7068;	k1=0,0080;	b=0,2829;	k2=0,0839	0,9995	0,0019	0,0000
50	1	a=0,8152;	k1=0,0136;	b=0,1797;	k2=0,1537	0,9993	0,0025	0,0001	
50	1,5	a=0,1140;	k1=0,2309;	b=0,8862;	k2=0,0178	0,9989	0,0040	0,0001	
50	2	a=0,1416;	k1=0,2073;	b=0,8642;	k2=0,0178	0,9994	0,0022	0,0001	
64	1	a=0,7728;	k1=0,0291;	b=0,1920;	k2=0,0291	0,9940	0,0150	0,0007	
64	1,5	a=7,3506;	k1=0,0444;	b=-6,3694;	k2=0,0477	0,9962	0,0094	0,0005	
64	2	a=0,9789;	k1=0,0338;	b=0,0209;	k2=1,8401	0,9977	0,0061	0,0003	

FONTE: Acervo pessoal.

Tabela 4.4 - Resultado das análises estatísticas dos modelos em camada fina para amostra com 42 gramas.

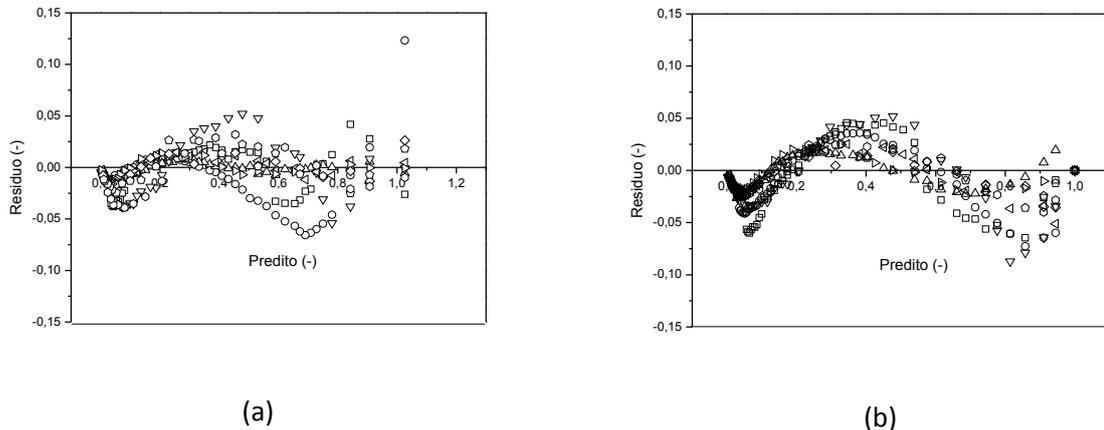
Modelo	T(°C)	V(m/s)	Coeficientes			R ²	SQR	EQM	
Lewis	36	1	k=0,0069			0,9749	0,2194	0,0046	
	36	1,5	k=0,0071			0,9912	0,2078	0,0039	
	36	2	k=0,0088			0,9869	0,1253	0,0026	
	50	1	k=0,0118			0,9894	0,0507	0,0013	
	50	1,5	k=0,0156			0,9959	0,0261	0,0007	
	50	2	k=0,0222			0,9937	0,0342	0,0010	
	64	1	k=0,0230			0,9961	0,0191	0,0008	
	64	1,5	k=0,0226			0,9954	0,0247	0,0011	
Page	64	2	k=0,0308			0,9958	0,0126	0,0007	
	36	1	k=0,0296;	n=0,7154		0,9811	0,0722	0,0015	
	36	1,5	k=0,0301;	n=0,7185		0,9868	0,0593	0,0011	
	36	2	k=0,0305;	n=0,7448		0,9969	0,0133	0,0003	
	50	1	k=0,0141;	n=0,9627		0,9890	0,0493	0,0012	
	50	1,5	k=0,0249;	n=0,8924		0,9966	0,0141	0,0004	
	50	2	k=0,0435;	n=0,8287		0,9979	0,0072	0,0002	
	64	1	k=0,0123;	n=1,1624		0,9983	0,0055	0,0002	
Page Modificado	64	1,5	k=0,0109;	n=1,1897		0,9979	0,0065	0,0003	
	64	2	k=0,0207;	n=1,1109		0,9969	0,0073	0,0004	
	36	1	k=0,0073;	n=0,7154		0,9811	0,0722	0,0015	
	36	1,5	k=0,0076;	n=0,7185		0,9868	0,0593	0,0011	
	36	2	k=0,0092;	n=0,7448		0,9969	0,0133	0,0003	
	50	1	k=0,0119;	n=0,9627		0,9890	0,0493	0,0012	
	50	1,5	k=0,0159;	n=0,8924		0,9966	0,0141	0,0004	
	50	2	k=0,0228;	n=0,8287		0,9979	0,0072	0,0002	
Henderson Pabis	64	1	k=0,0228;	n=1,1624		0,9983	0,0055	0,0002	
	64	1,5	k=0,0224;	n=1,1897		0,9979	0,0065	0,0003	
	64	2	k=0,0306;	n=1,1109		0,9969	0,0073	0,0004	
	36	1	a=0,8565;	k=0,0056		0,9818	0,0661	0,0014	
	36	1,5	a=0,8491;	k=0,0058		0,9898	0,0415	0,0008	
	36	2	a=0,8899;	k=0,0076		0,9871	0,0511	0,0011	
	50	1	a=0,9498;	k=0,0112		0,9916	0,0372	0,0009	
	50	1,5	a=0,9382;	k=0,0145		0,9975	0,0094	0,0002	
Logarítmico	50	2	a=0,9251;	k=0,0201		0,9948	0,0153	0,0005	
	64	1	a=1,0240;	k=0,0236		0,9952	0,0171	0,0007	
	64	1,5	a=1,0343;	k=0,0236		0,9940	0,0206	0,0009	
	64	2	a=1,0095;	k=0,0311		0,9953	0,0122	0,0007	
	36	1	a=0,8745;	k=0,005229;	c=-0,0252	0,9823	0,0639	0,0013	
	36	1,5	a=0,8569;	k=0,005569;	c=-0,0117	0,9900	0,0405	0,0008	
	36	2	a=0,8778;	k=0,008139;	c=0,0210	0,9877	0,0476	0,0010	
	50	1	a=0,9769;	k=0,009985;	c=-0,0395	0,9933	0,0265	0,0007	
Dois Termos	50	1,5	a=0,9442;	k=0,013996;	c=-0,0105	0,9977	0,0083	0,0002	
	50	2	a=0,9237;	k=0,020299;	c=0,0030	0,9948	0,0152	0,0004	
	64	1	a=1,0663;	k=0,020302;	c=-0,0604	0,9979	0,0055	0,0002	
	64	1,5	a=1,0897;	k=0,019613;	c=-0,0766	0,9977	0,0060	0,0003	
	64	2	a=1,0592;	k=0,026491;	c=-0,0672	0,9984	0,0032	0,0002	
	36	1	a=0,8075;	k1=0,0052;	b=0,2185;	k2=0,2719	0,9944	0,0224	0,0005
	36	1,5	a=-5,4570;	k1=0,0058;	b=6,3069;	k2=0,0058	0,9898	0,0415	0,0008
	36	2	a=0,2453;	k1=0,0682;	b=0,7602;	k2=0,0063	0,9995	0,0024	0,0001
Dois Termos	50	1	a=0,0658;	k1=0,6203;	b=0,9350;	k2=0,0109	0,9927	0,0338	0,0008
	50	1,5	a=0,0822;	k1=0,4391;	b=0,9132;	k2=0,0140	0,9990	0,0046	0,0001
	50	2	a=0,8374;	k1=0,0179;	b=0,1632;	k2=0,1936	0,9994	0,0023	0,0001
	64	1	a=2,1513;	k1=0,0328;	b=-1,1775;	k2=0,0484	0,9990	0,0032	0,0001
	64	1,5	a=-0,7267;	k1=0,0552;	b=1,7086;	k2=0,0311	0,9980	0,0060	0,0003
	64	2	a=1,0095;	k1=0,0311;	b=0,0002;	k2=0,0009	0,9953	0,0123	0,0007

FONTE: Acervo pessoal.

Para complementar a análise, foram construídos gráficos de distribuição de resíduos para as equações ajustadas referentes a cada massa da amostra. Entretanto, nenhuma das equações apresentou ajustes aleatoriamente distribuídos, o que seria desejável para assegurar a confiabilidade dos parâmetros ajustados. Para exemplificar o comportamento

dos resíduos, a Figura 4.18 mostra os gráficos de distribuição de resíduos para os modelos que se destacaram para os ensaios realizados com amostras de 42 gramas.

Figura 4.18 – Distribuição de resíduo dos modelos de (a) Dois Termos e de (b) Page para todas as condições obtidas no planejamento em amostras com 42 gramas.



FONTE: Acervo pessoal.

Visto que, para as equações selecionadas os resíduos apresentaram tendências em sua distribuição, analisou-se os gráficos da distribuição dos resíduos das outras equações propostas, e observou-se em todos os gráficos as distribuições tendenciosas. Com isso, nenhum dos modelos testados atendeu a este critério estatístico de confiabilidade.

Um fator a ser levado em consideração, referente a estes ajustes, é o material envolvido. Já que as equações empíricas foram desenvolvidas baseadas em outros tipos de materiais (sementes, por exemplo) e que as folhas apresentam características diferenciadas, tais como um encolhimento significativo durante a secagem e composição muito variável, é possível que as equações testadas não sejam as mais adequadas para este tipo de material.

Pode-se concluir, que para as folhas de hortelã o ajuste dos dados para determinar uma equação que descreva efetivamente as curvas de secagem se mostrou inadequado, pois mesmo as equações apresentando-se satisfatórias, de acordo com o critério estabelecido, apresentaram tendência na distribuição dos resíduos, afirmando que os ajustes aos dados experimentais foram forçados, resultando em modelos que não são confiáveis.

Como nenhum dos modelos ajustados apresentou os resíduos aleatoriamente distribuídos, os modelos escolhidos como os mais adequados para representar o processo de secagem foram os modelos com dois parâmetros, que apresentaram os melhores

coeficientes de correlação, e os menores SQR e EQM. Por este critério, considerou-se o modelo de Henderson Pabis como o mais adequado para as amostras com 18 gramas e o de Page para as amostras com 30 e 42 gramas.

Para se ter outras alternativas de modelos para descrever o processo de secagem das folhas de hortelã, testou-se outros tipos de modelagem empíricas.

Análise de superfícies de resposta

Será apresentado neste item o tratamento dos dados, baseado na regressão múltipla, e verificado quais variáveis mais influenciaram na razão de umidade das folhas de hortelã. Como, para cada condição de massa de amostra, temperatura e velocidade do ar é obtido um conjunto de dados e não um único resultado, foi fixado o tempo e a análise foi feita usando os valores de razão de umidade referentes a este tempo. Escolheu-se o instante de tempo tendo como critério o tempo em que a amostra com menor massa alcançou a umidade de equilíbrio para as maiores condições de temperatura e velocidade do ar. Logo as análises foram realizadas para o instante de tempo de 100 minutos e a regressão dos dados é apresentada na Tabela 4.5, mostrando o efeito de cada variável, linear, quadrático e das interações entre elas.

Admitindo um intervalo de confiança de 95%, e baseando-se nos menores valores do p-valor ($p\text{-valor} < 0,05$), os coeficientes significativos foram determinados e destacados em vermelho na Tabela 4.5. Com o auxílio do gráfico de pareto, Figura 4.19, é possível ilustrar de forma mais clara a influência dos coeficientes e suas interações na razão de umidade.

Este diagrama apresentado na figura 4.19 mostra a significância dos efeitos distribuídos na amostra analisada, baseados nos valores do teste t. A linha tracejada que corta os efeitos corresponde ao valor mínimo a partir do qual os mesmos exercem alguma influência na resposta. Os valores que se encontram à esquerda da linha tracejada correspondem aos efeitos que não apresentam influência sobre a variável dependente. Com isso pode-se concluir, a princípio, que os fatores que influenciaram na umidade no instante de 100 minutos são a temperatura seguida pela velocidade, massa, temperatura ao

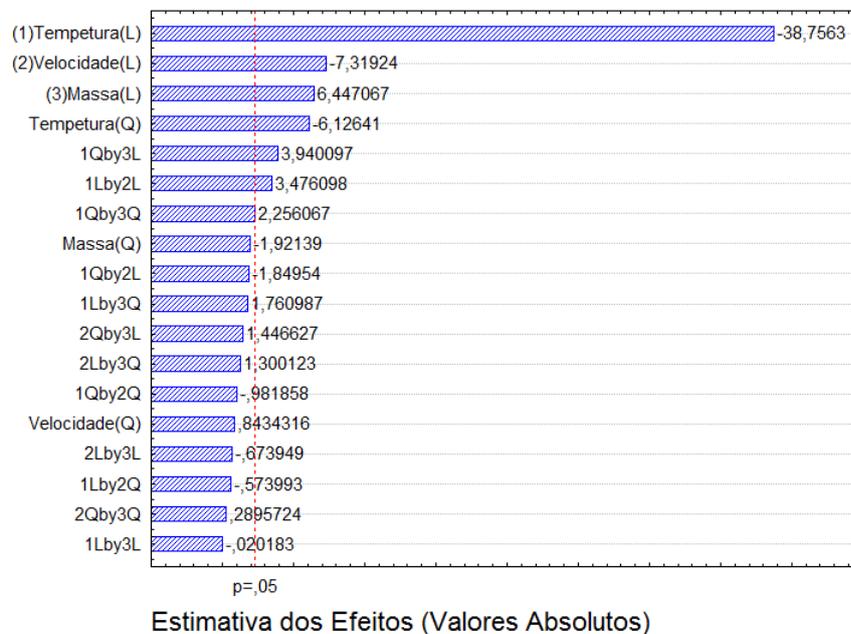
quadrado, a interação da temperatura ao quadrado com a massa e interação entre a temperatura e velocidade.

Tabela 4.5 - Coeficientes de regressão para MR no instante de 100 minutos.

Fator	Coefficiente de Regressão	Erro Padrão	t(8)	p	-95% limite de confiança	+95% limite de confiança
Média	0,200979	0,004233	47,4763	0,000000	0,191218	0,210741
Temperatura	-0,200938	0,005185	-38,7563	0,000000	-0,212894	-0,188982
Temperatura ²	-0,027508	0,004490	-6,1264	0,000281	-0,037862	-0,017154
Velocidade	-0,037948	0,005185	-7,3192	0,000082	-0,049904	-0,025992
Velocidade ²	0,003787	0,004490	0,8434	0,423487	-0,006567	0,014141
Massa	0,033426	0,005185	6,4471	0,000199	0,021470	0,045382
Massa ²	-0,008627	0,004490	-1,9214	0,090921	-0,018981	0,001727
T*V	0,022073	0,006350	3,4761	0,008367	0,007430	0,036716
T*V ²	-0,003156	0,005499	-0,5740	0,581747	-0,015838	0,009525
T ² *V	-0,010171	0,005499	-1,8495	0,101548	-0,022852	0,002510
T ² *V ²	-0,004676	0,004762	-0,9819	0,354927	-0,015658	0,006306
T*M	-0,000128	0,006350	-0,0202	0,984392	-0,014771	0,014515
T*M ²	0,009684	0,005499	1,7610	0,116272	-0,002997	0,022365
T ² *M	0,021667	0,005499	3,9401	0,004295	0,008986	0,034348
T ² *M ²	0,010744	0,004762	2,2561	0,054053	-0,000238	0,021726
V*M	-0,004280	0,006350	-0,6739	0,519338	-0,018922	0,010363
V*M ²	0,007150	0,005499	1,3001	0,229763	-0,005532	0,019831
V ² *M	0,007955	0,005499	1,4466	0,186019	-0,004726	0,020636
V ² *M ²	0,001379	0,004762	0,2896	0,779506	-0,009603	0,012361

R²=0,99527; FONTE: Acervo pessoal.

Figura 4.19 - Diagrama de pareto para o modelo do MR.



FONTE: Acervo pessoal.

Eliminou-se os efeitos não significativos de forma gradual, do maior p-valor ao menor (valores este que ainda são maiores que 0,05), e analisou-se, à medida que as variáveis foram sendo eliminadas, se outras não iam se tornando significantes. De acordo com este procedimento, a Tabela 4.6 apresenta os valores de maior influência na razão de umidade, com seus respectivos valores dos coeficientes de regressão, erro padrão, teste t, p-valor e os intervalos de confiança, e o modelo ajustado é dado pela equação:

$$MR = 0,201 - 0,201T - 0,028T^2 - 0,038V + 0,033M + 0,022TV + 0,022T^2M \quad (21)$$

Tabela 4.6 - Coeficientes de Regressão com os coeficientes significativos.

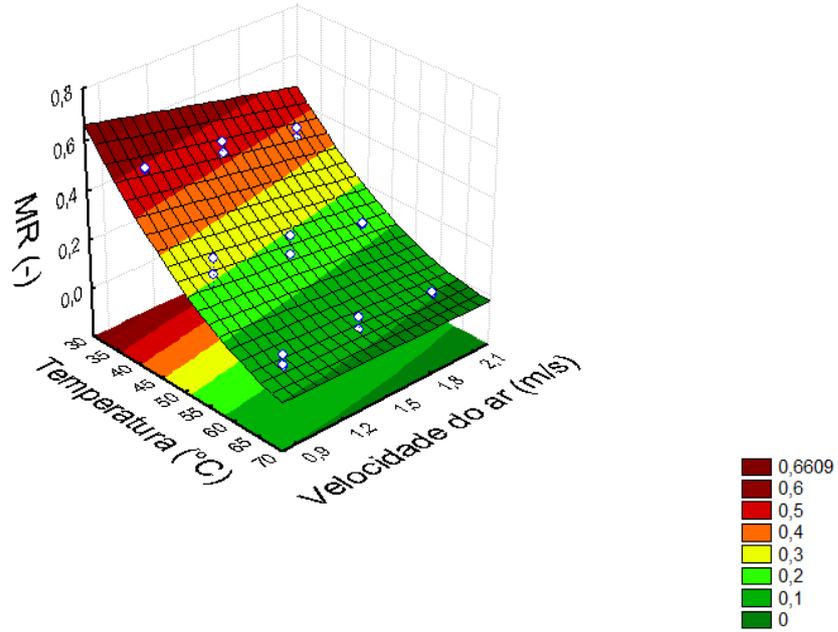
Fator	Coefficiente de Regressão	Erro Padrão	t(23)	p	-95% limite de confiança	+95% limite de confiança
Média	0,200979	0,005153	39,0056	0,000000	0,190231	0,211728
Temperatura	-0,200938	0,006311	-31,8414	0,000000	-0,214102	-0,187775
Temperatura ²	-0,027508	0,005465	-5,0333	0,000064	-0,038908	-0,016108
Velocidade	-0,037948	0,006311	-6,0133	0,000007	-0,051111	-0,024784
Massa	0,033426	0,006311	5,2968	0,000035	0,020262	0,046590
T*V	0,022073	0,007729	2,8559	0,009768	0,005951	0,038195
T ² M	0,021667	0,006693	3,2371	0,004131	0,007705	0,035629

R²=0,98249; FONTE: Acervo pessoal.

Baseados nos valores dos coeficientes encontrados, a temperatura e a velocidade apresentam coeficientes negativos, indicando que o aumento destas variáveis operacionais resulta em menores valores de razão de umidade após 100 minutos de secagem. Porém, a massa da amostra apresenta seu coeficiente positivo, com isso o aumento da quantidade de folhas resultará em umidade maior ao final dos 100 minutos. Com relação aos efeitos das interações entre estas variáveis, as que são mais significantes para a umidade das folhas de hortelã são as interações da temperatura e velocidade, e da temperatura e massa da amostra. Além disso, o valor do coeficiente de determinação para o modelo obtido foi de 0,983, indicando um bom ajuste do modelo aos dados experimentais.

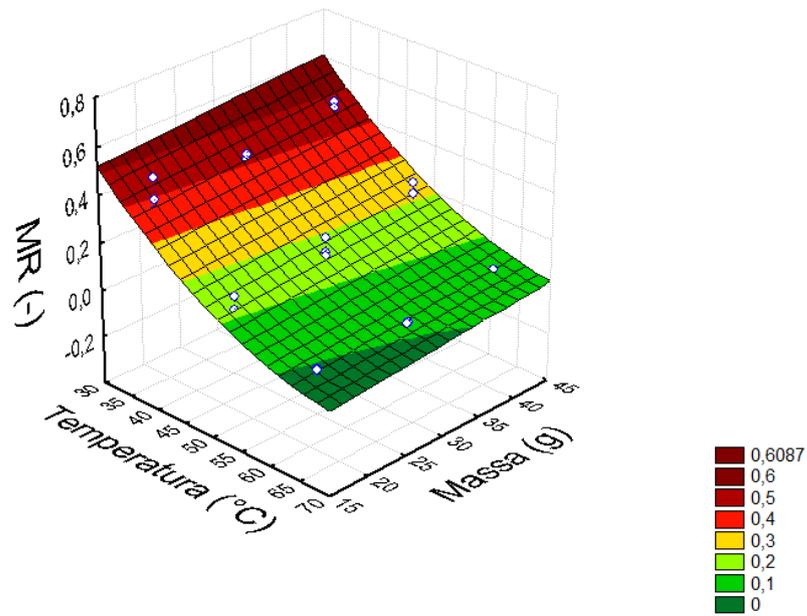
Para mostrar com mais clareza os efeitos individuais das variáveis, temperatura, velocidade, e massa, e os efeitos interativos previstos pelo modelo de razão de umidade, foram construídas superfícies de resposta, mostradas nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22. Visto que se obteve o mesmo comportamento para todas as condições escolheu-se uma condição como exemplo para a análise.

Figura 4.20 - Superfície de resposta da razão de umidade em função da temperatura e da velocidade do ar para amostra com 30 gramas.



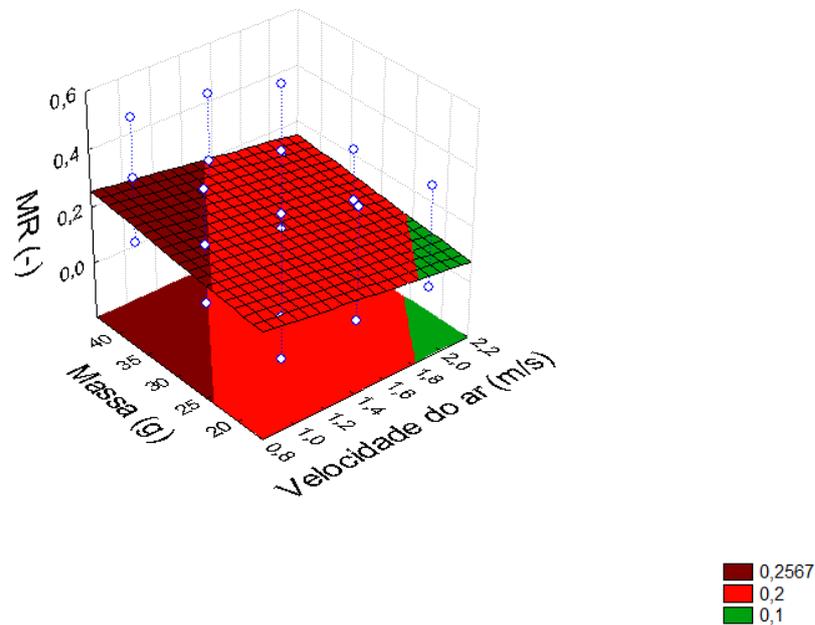
FONTE: Acervo pessoal

Figura 4.21 - Superfície de resposta da razão de umidade em função da temperatura do ar e a massa das amostras para velocidade de 1,5m/s.



FONTE: Acervo Pessoal.

Figura 4.22 - Superfície de resposta da razão de umidade em função da velocidade do ar e a massa das amostras para temperatura de 50°C.



FONTE: Acervo pessoal.

Nas figuras 4.20 e 4.21 é possível visualizar a influência quadrática da temperatura, e na Figura 4.22 o efeito linear da variação da velocidade e quantidade mássica da amostra. Baseado nos gráficos é possível verificar que a temperatura é a condição que mais influencia na secagem, mostrando também que o aumento da velocidade do ar apresenta uma pequena influência no resultado final. Com relação à quantidade mássica da amostra, a influência também é menor que a da temperatura, mas ao aumentar a massa de folhas, a umidade no instante de 100 minutos aumentará.

Também foi efetuada uma análise de superfícies de resposta, fixando uma razão de umidade final e determinando-se a influência das variáveis *massa da amostra*, *velocidade e temperatura do ar* no tempo de secagem do material.

Como critério para esta análise, primeiramente examinou-se os valores de umidade de equilíbrio obtidos ao final de cada ensaio. Em seguida determinou-se a menor razão de umidade que abrangesse todas as condições trabalhadas experimentalmente, sendo esta razão igual a 0,004. Assim, determinou-se o tempo necessário para atingir esta razão de umidade utilizando como variáveis as temperatura, velocidade e massa da amostra.

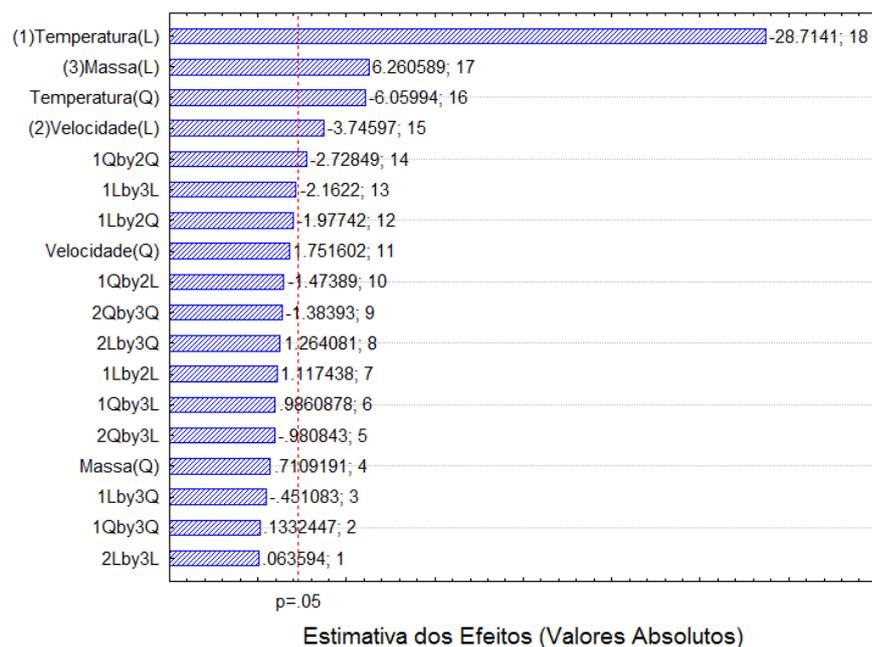
Depois de realizada a regressão dos dados, a Tabela 4.7 apresenta os efeitos que as variáveis exercem na resposta tempo de processo.

Tabela 4.7 - Coeficientes de regressão para o tempo para o MR em 0,004.

Fator	Coeficiente de Regressão	Erro Padrão	t(8)	p	-95% limite de confiança	+95% limite de confiança
Média	297,963	6,115178	48,7251	0,000000	283,861	312,065
Temperatura	-215,056	7,489533	-28,7141	0,000000	-232,326	-197,785
Temperatura ²	-39,306	6,486126	-6,0599	0,000303	-54,263	-24,349
Velocidade	-28,056	7,489533	-3,7460	0,005657	-45,326	-10,785
Velocidade ²	11,361	6,486126	1,7516	0,117945	-3,596	26,318
Massa	46,889	7,489533	6,2606	0,000243	29,618	64,160
Massa ²	4,611	6,486126	0,7109	0,497335	-10,346	19,568
T*V	10,250	9,172767	1,1174	0,296239	-10,902	31,402
T*V ²	-15,708	7,943850	-1,9774	0,083381	-34,027	2,610
T ² *V	-11,708	7,943850	-1,4739	0,178739	-30,027	6,610
T ² *V ²	-18,771	6,879575	-2,7285	0,025906	-34,635	-2,907
T*M	-19,833	9,172767	-2,1622	0,062575	-40,986	1,319
T*M ²	-3,583	7,943850	-0,4511	0,663906	-21,902	14,735
T ² *M	7,833	7,943850	0,9861	0,352971	-10,485	26,152
T ² *M ²	0,917	6,879575	0,1332	0,897291	-14,948	16,781
V*M	0,583	9,172767	0,0636	0,950854	-20,569	21,736
V*M ²	10,042	7,943850	1,2641	0,241787	-8,277	28,360
V ² *M	-7,792	7,943850	-0,9808	0,355398	-26,110	10,527
V ² *M ²	-9,521	6,879575	-1,3839	0,203764	-25,385	6,343

R²=0,99159; FONTE: Acervo pessoal.

Assumindo um intervalo de confiança de 95% e de acordo com os menores valores do p-valor, mesmo critério citado na análise anterior, os coeficientes significativos foram determinados e destacados em vermelho na Tabela. Para que fique mais clara a influência dos coeficientes e suas interações, é apresentada a Figura 4. 23, que apresenta o gráfico de pareto da Tabela 4.7.

Figura 4.23 - Diagrama de pareto para o modelo do Tempo de processo.

FONTE: Acervo pessoal.

O diagrama da Figura 4.23, mostra, baseados nos valores obtidos pelo teste t, a significância dos efeitos. Os valores encontrados na esquerda da linha tracejada correspondem aos efeitos que não apresentam influência significativa no tempo. Da figura, pode-se concluir que os fatores que influenciaram no tempo para que este material atingisse a umidade de equilíbrio de 0,004 é a variável temperatura, seguida pela massa, temperatura ao quadrado, velocidade e a interação da temperatura ao quadrado com a velocidade ao quadrado.

O mesmo procedimento de eliminação dos efeitos não significativos da análise anterior foi adotado. O resultado da análise encontra-se na Tabela 4.8, com os valores dos coeficientes de regressão, erro padrão, teste t, p-valor e intervalos de confiança para as variáveis de maior efeito. O modelo ajustado é dado pela equação:

$$t = 297,9 - 215,1T - 39,3T^2 - 28,1V + 46,9M \quad (22)$$

Tabela 4.8 - Coeficientes de regressão com os coeficientes significativos.

Fator	Coefficiente de Regressão	Erro Padrão	t(22)	p	-95% limite de confiança	+95% limite de confiança
Média	297,963	7,897959	37,7266	0,000000	281,584	314,342
Temperatura	-215,056	9,672985	-22,2326	0,000000	-235,116	-194,995
Temperatura ²	-39,306	8,377051	-4,6921	0,000111	-56,678	-21,933
Velocidade	-28,056	9,672985	-2,9004	0,008298	-48,116	-7,995
Massa	46,889	9,672985	4,8474	0,000076	26,828	66,949

R²=0,96142; FONTE: Acervo pessoal.

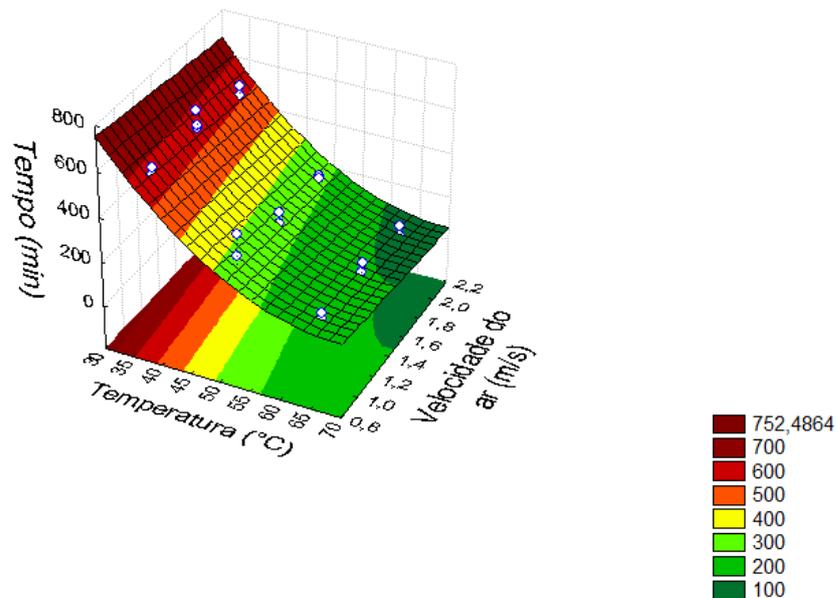
De acordo com os coeficientes encontrados, as variáveis temperatura e velocidade apresentaram coeficientes negativos, indicando o que já era esperado, que o aumento da temperatura e velocidade durante o processo irá resultar na redução do tempo em que o material atingirá a razão de umidade de 0,004. A variável massa apresentou coeficiente positivo, também indicando o que era esperado, que o aumentando da quantidade de material que se pretende secar resultará no aumento do tempo de processo. Nota-se que neste ajuste as interações entre as variáveis envolvidas não foram significativas.

Depois de determinar as variáveis que apresentaram os efeitos mais significativos ao modelo, pode-se notar que o coeficiente de regressão diminuiu, de 0,99 para 0,96, mas continuou indicando um bom ajuste do modelo aos dados experimentais.

Para ter uma clareza maior dos efeitos que as variáveis independentes proporcionam a variável resposta, de acordo com o modelo previsto, foram construídas as superfícies de

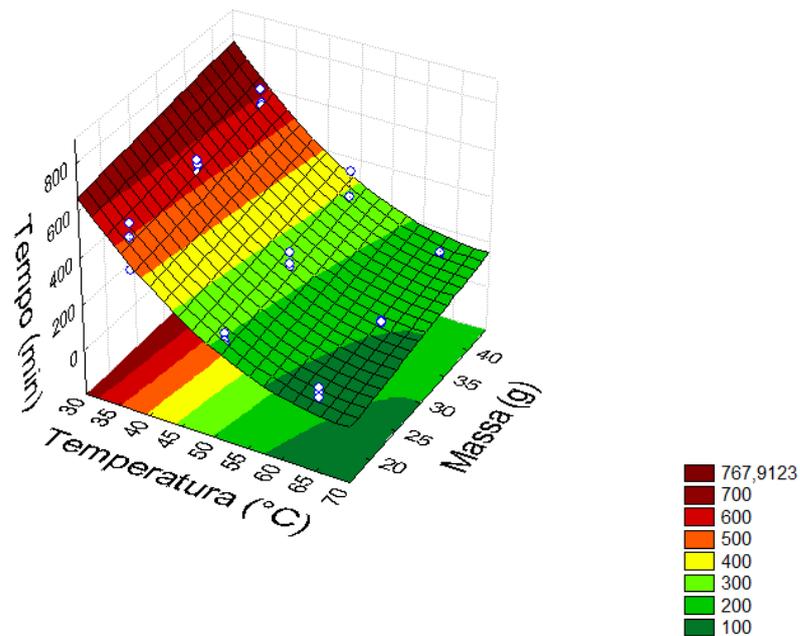
resposta, apresentadas nas Figuras 4.24, Figura 4.25 e Figura 4.26. Como foram obtidos o mesmo comportamento para as diferentes condições analisadas, escolheu-se apenas uma condição como exemplo para realizar a análise.

Figura 4.24 - Superfície de resposta do tempo de secagem em função da temperatura e da velocidade do ar para amostra com 30 gramas.



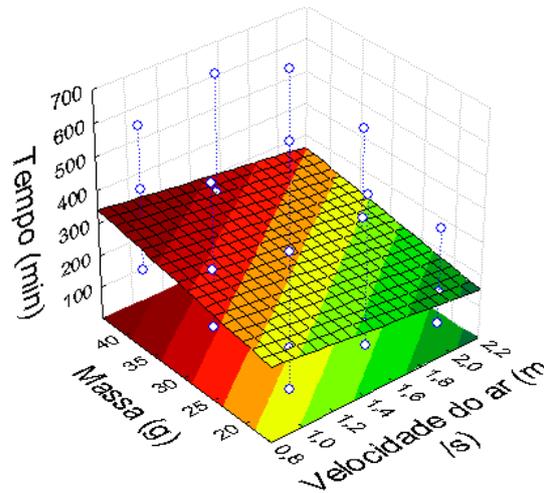
FONTE: Acervo pessoal.

Figura 4.25 - Superfície de resposta do tempo de secagem em função da temperatura e massa da amostra, para velocidade de 1,5m/s.



FONTE: Acervo pessoal.

Figura 4.26 - Superfície de resposta do tempo de secagem em função da velocidade do ar e da massa das amostras para temperatura de 50°C.



FONTE: Acervo pessoal.

Nas figuras 4.24 e 4.25 é possível visualizar o efeito quadrático da temperatura, e na figura 4.26, como as variáveis velocidade e massa só apresentaram um efeito linear no modelo, é visto um plano que representa esta variação. Baseado nos gráficos e nas análises anteriores, observa-se que a temperatura é a variável que tem maior influência no tempo de secagem das folhas, podendo diminuí-lo significativamente. A velocidade do ar e a massa da amostra, mesmo que apresentem uma menor influência que a temperatura no tempo de secagem, não podem ser desconsiderados, pois em conjunto podem afetar significativamente o tempo de secagem das folhas.

Rede Neural

Para o desenvolvimento da Rede Neural usaram-se todas as condições estabelecidas no planejamento experimental. Como descrito no capítulo anterior, a estrutura da rede neural foi desenvolvida usando o Toolbox presente no software Matlab®, permitindo a criação e validação mais rápida de um modelo.

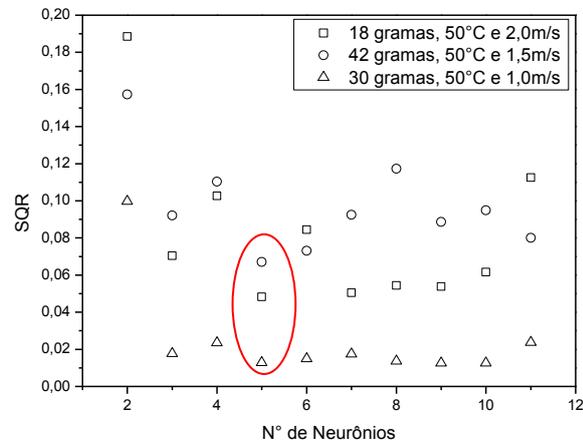
A rede foi construída e na camada de entrada as variáveis fornecidas foram as condições de secagem, tempo de processo, temperatura e velocidade do ar, para cada quantidade mássica da amostra na forma de vetores. O vetor tempo foi o único que não apresentou todos os componentes iguais, nele foram fornecidos os intervalos de tempos de pesagem da amostra. Na camada de saída da rede foram fornecidos os valores de razão de umidade das folhas, obtidos durante o processo de secagem, para cada condição estabelecida no planejamento fatorial. Foi empregada também na rede, comandos para melhorar o seu desenvolvimento, o termo de momento e taxa de aprendizagem, com o intuito de aumentar a velocidade de aprendizagem e reduzir a instabilidade. O termo de momento e taxa de aprendizagem foram fornecidos a rede com um valor igual a 0,5 para cada um.

Primeiramente como eram desconhecidos os números de neurônios na camada intermediária, foi realizado um estudo utilizando-se o método de tentativa e erro onde foram analisadas as várias redes obtidas variando o número de 2 até 35 neurônios nesta camada. Iniciou as análises com 2 neurônios e em seguida era adicionado mais um neurônio na camada para verificar o desenvolvimento da rede e posteriormente avaliar quais das estruturas eram mais satisfatórias.

Depois eram avaliadas as várias redes obtidas variando a quantidade de dados que foram usados para treinar, validar e testar a rede. Iniciaram-se as análises com 100% de dados usados para treinar, 0% para validar e 0% para testar, à medida que as redes eram analisadas diminuía-se a porcentagem de dados para treinar, distribuindo estes dados igualmente para os conjuntos de validação e teste da mesma.

Mesmo tendo conhecimento que altos números de neurônios na camada oculta podem promover o 'overfitting' da rede, decidiu-se primeiramente analisar a rede até alcançar um número de até 35 neurônios, considerado um valor alto, pois em se tratando de um material altamente heterogêneo e de difícil reprodutibilidade como as folhas acreditou-se que a rede teria dificuldade em simular estes dados. A Figura 4.27 apresenta a soma dos quadrados dos resíduos, para algumas condições aleatórias do planejamento, em função do número de neurônios na camada intermediária.

Figura 4.27 - Gráfico das soma dos quadrados dos resíduos em função do número de neurônios.

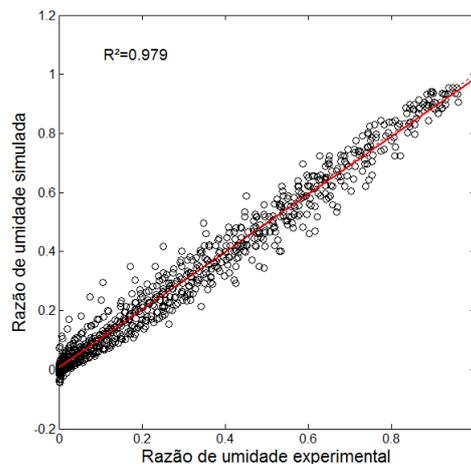


FONTE: Acervo pessoal.

Observa-se nesta figura, que para a rede da cinética de secagem das folhas de hortelã, cinco neurônios foram necessários na camada intermediária, sendo determinado este número de neurônios baseado no menor valor encontrado para a soma dos quadrados dos resíduos, o método de minimização dos quadrados dos resíduos.

Além do gráfico dos resíduos, outra forma de analisar a rede é através da Figura 4.28, que apresenta o gráfico dos dados experimentais de razão de umidade contra os dados simulados pela rede. A figura mostra uma boa concordância dos resultados obtidos da rede neural com os dados experimentais, com um coeficiente de correlação igual a 0,979.

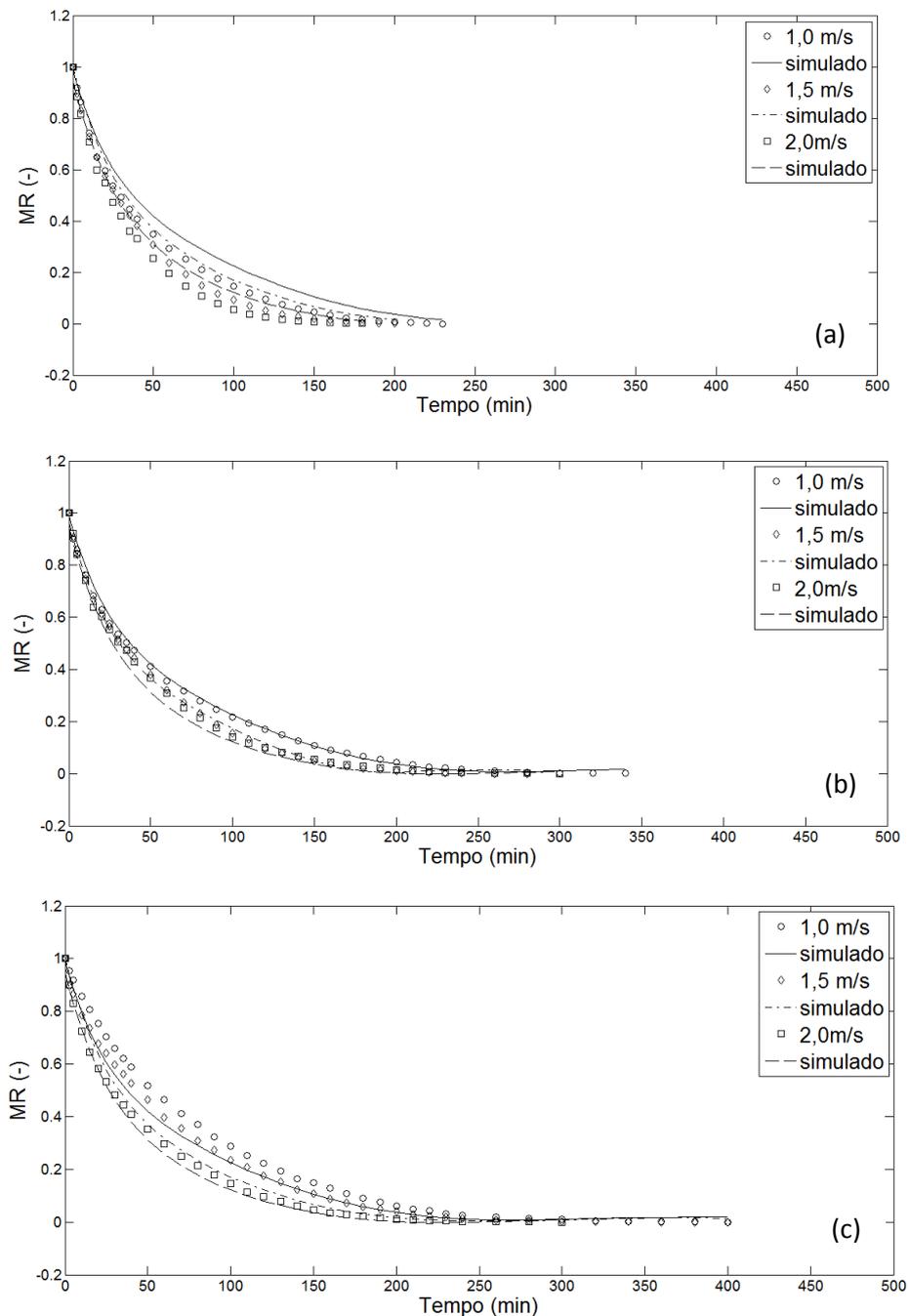
Figura 4.28 - Comparação entre os valores experimentais e preditos obtidos da rede neural.



FONTE: Acervo pessoal.

Para confirmar o desenvolvimento da rede discutido através das figuras anteriores, também é mostrada a Figura 4.29, com os dados experimentais e simulados da rede para os ensaios realizados a temperatura de 50°C para as amostras de 18, 30 e 42 gramas e diferentes velocidades do ar, como está indicado na legenda. Pois mesmo a rede apresentando bons desempenhos com cinco neurônios, a análise gráfica dos gráficos simulados e experimentais ilustra mais claramente os resultados obtidos pela rede neural.

Figura 4.29 - Cinética de secagem para as amostras com (a) 18, (b) 30 e (c) 42 gramas.

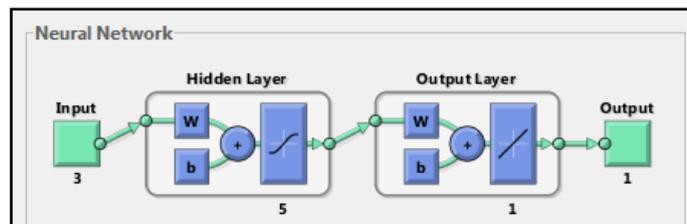


FONTE: Acervo pessoal.

Resultados similares foram obtidos para as outras condições investigadas e por isso não foram mostradas aqui. A partir dos resultados apresentado pode-se concluir que a rede neural consegue descrever com poucos neurônios a secagem deste tipo de material, além de observar que as simulações que se apresentaram mais precisas ocorreram para as amostras com maior massa, 42 gramas. Este resultado pode ser considerado uma camada fina de folhas com características mais próximas de um leito fixo de partículas “bem comportadas”.

Com isso a estrutura da rede neural que representa a cinética de secagem das folhas de hortelã corresponde à apresentada na Figura 4.30, onde na camada de entrada são fornecidas 3 variáveis de entrada, na camada intermediária necessita-se de cinco neurônios e na camada de saída é fornecida apenas uma resposta.

Figura 4.30 - Estrutura da rede Neural.



FONTE: Acervo pessoal.

Portanto, pode-se concluir que uma simples rede neural consegue interpolar varias informações de forma adequada e assim simular satisfatoriamente os dados. Em comparação com os modelos empíricos, como o modelo de Page, por exemplo, a rede é bem mais vantajosa, pois não simula apenas o ensaio específico de uma condição particular e sim uma faixa de operação.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões referentes aos resultados exibidos no capítulo anterior. Baseando-se nestes resultados, pode-se concluir que:

- As análises de caracterização das amostras mostraram que as folhas apresentaram tamanhos médios que variaram bastante de um estágio de crescimento para outro. Entretanto, quando foi analisada a influência do tamanho e do estágio de crescimento das folhas no processo de secagem, foi observado que eles não influenciaram significativamente a secagem em estufa com convecção natural;
- De acordo com os resultados obtidos durante a secagem dos leitos fixos de folhas, tanto para a estufa como para o secador convectivo, observou-se a predominância da resistência interna ao transporte de umidade no interior do leito durante o processo de transferência de massa, para a maioria das condições avaliadas. A temperatura foi a variável com maior influência na redução da umidade;
- À medida que aumentou a temperatura do processo, a influência da massa da amostra tornou-se mais pronunciada, ou seja, a influência da resistência interna tornou-se mais significativa com o aumento da temperatura;
- Os modelos empíricos baseados na secagem em camada fina que melhor se ajustaram aos dados experimentais foram o de Page para as amostras com 30 e 42 gramas e o modelo de Henderson Pabis para as amostras com 18 gramas. Entretanto todos os modelos apresentaram distribuição de resíduos não aleatória, o que reduz a confiabilidade dos parâmetros ajustados;
- O modelo construído através da regressão múltipla mostrou que o teor de umidade em um dado tempo diminui com o aumento da temperatura e da velocidade do ar e aumenta com a

massa da amostra. Já o modelo ajustado para a estimativa do tempo de secagem mostrou, como esperado, que para altas temperaturas e velocidades do ar, o tempo de processo diminui, mas aumenta ao aumentar-se a quantidade da amostra;

- A modelagem baseada na rede neural forneceu bons resultados, para estimar a razão da umidade das folhas, utilizando cinco neurônios na camada intermediária.

Finalmente concluiu-se que o uso das três metodologias propostas mostrou-se adequado para a análise de secagem de uma “partícula” tão complexa como as folhas, visto que os resultados são complementares.

CAPÍTULO 6

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Buscando contribuir para a continuidade da pesquisa iniciada neste trabalho, algumas sugestões são descritas a seguir:

- Realizar a secagem das folhas de hortelã em um secador com escoamento paralelo à amostra para a verificação da qualidade das folhas secas em diferentes condições de temperatura e velocidade do ar, a fim de analisar a influência que as condições de secagem na coloração e composição dos constituintes químicos e minerais.

- Realizar a modelagem empírica utilizando as redes neurais para a secagem das folhas de hortelã em outro tipo de secador.

- Desenvolver a modelagem matemática da secagem deste material, utilizando ainda a secagem com escoamento paralelo à amostra, para a representação dos fenômenos envolvidos no processo.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADJUTO, E.N.P. **Caracterização Morfológica e do óleo essencial de seis acessos de hortelanzinho (*Mentha ssp*)**. 2008. 79f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias), Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

APIKNAR, E. K. Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: Modelling, performance analyses. **Energy Conversion and Management**, v.51, p. 2407-2018. 2010.

ARRUDA, T.A.; ANTUNES R.M.P.; CATÃO R.M.R. Preliminary study of the antimicrobial activity of *Mentha x villosa* Hudson essential oil, rotundifolone and its analogues. **Revista Brasileira de Farmacognosia.**, v.16, n.3, p.307-311, jul./set. 2006.

ARSLAN, D.; OZCAN, M.M. Evaluation of drying methods with respect to drying kinetics, mineral content and colour characteristics of rosemary leaves. **Energy Conversion and Management**. v. 49, p. 1258- 1264. 2008.

ARSLAN, D.; OZCAN, M.M.; MENGES, H.O. Evaluation of methods with respect to drying parameters, some nutritional and colour characteristics of peppermint (*Mentha x piperita* L.). **Energy Conversion and Management**. v. 51, p. 2769-2775. 2010.

BACELOS, M.S. **Análise experimental e modelagem da cinética de secagem de batata considerando o fenômeno de encolhimento**. 2002. 113f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.

BATALHA, M. O.; MING, L. C. **Plantas medicinais e aromáticas: um estudo de competitividade no Estado de São Paulo**. São Paulo: SEBRAE; São Carlos, SP: GEPAl; Botucatu, SP: UNESP, 2003. 240f.

BARROZO, M.A.S. **Transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em leito deslizante e escoamento cruzado**. 1995. 163f. Tese de Doutorado em Engenharia Química – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1995.

BIESK, I.G.C. **Plantas Medicinais e Aromáticos no sistema único de saúde da região sul de Cuiabá–MT**. 2005. 92f. Monografia (Lato Sensu em Plantas Medicinais) – Departamento de Agricultura, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

BREVE, F.A. **Classificação de Imagens Tomográficas de ciência do solos utilizando Redes Neurais e Combinação de Classificadores**. 2006. 57f. Dissertação (Mestrado em Ciência da

Computação) – Centro de Ciência Exata e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying na storage of oilseeds**. New York: An Avi, 1992. 450p.

BURANDE, R.R. et al. Optimization of Fluidized Bed Drying Process of Green Peas Using Response Surface Methodology. **Drying Technology**. v.26. p. 920-930, 2008.

CARLESSO, V. O. et al. Secagem de semente de maracujá em camada delgada. **Rev. Bras. Frutic**. Jaboticabal, v. 27, n. 3, p. 444-448. Dezembro. 2005.

CARLESSO, V. O. et al. Avaliação de modelos de secagem em camada fina de sementes de maracujá amarelo. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 29,p. 28-37, 2007.

CORRÊA, C.C.; ALVES A.F. Plantas Medicinais como alternativa de negócios: caracterização e importância. In: Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, 2008, Rio Branco.

CORREA, R.M. et al. Rendimento de óleo essencial e caracterização organolépticas de folhas de assa-peixe submetidas a diferentes métodos de secagem. **Ciência Agrotecnica**, Lavras, v. 28, n. 2, p. 339-344, mar./abr. 2004.

COLOMBARY, R.R.; **Aplicação de delineamento de experimentos para o processo de solda à projeção**. 2004. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2004.

CUNHA, A.P.; SILVA, A.P.; ROQUE, O.P.; **Plantas e Produtos Vegetais em Fitoterapia**. Ed. São Paulo: Fundação Caloutes Gulbenkian, 2003. 701p.

DIAZ-MAROTO, M.C. et al. Influence of Drying on the Flavor Quality of Spearmint (*Mentha spicata L.*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.51, p. 1265-1269, 2003.

DOYMAZ, I. Thin-layer drying behaviour of mint leaves. **Journal of Food Process Engineering**. v. 74, p. 370-375, 2006.

DOYMAZ, I.; TUGRUL, N.; PALA, M. Drying characteristics of dill and parsley leaves. **Journal of Food Engineering**. v. 77, p. 559-565, 2006.

ERBAY, Z.; ICIER, F. Thin-layer Drying Behaviors of olive leaves (*Olea Europaea L.*). **Journal of Food Process Engineering**. v. 33, p. 287-308, 2010.

ERBAY, Z; ICIER, F. Optimization of hot air drying of olive leaves using response surface methodology. **Journal of Food Engineering**, n. 91, p. 533-541. 2009.

FERREIRA, A. A. **Abordagem estatística e computacional na otimização de meio de cultura para a produção de antibióticos: o caso da cefalosporina C**. 2003. 197f. Tese (Doutorado em

Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.

FERREIRA, A.L.O. **Síntese Enzimática de Ampicilina em Reator Integrado**. 2004. 190f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

FOUST, A. S. *et al.* Princípios das Operações Unitárias. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982. 670 p.

FREIRE, J.T. *et al.* A Hybrid Lumped Parameter/Neural Network Model for Spouted Bed Drying of Pastes with Inert Particles. **Drying Technology**, v. 30, p. 1342-1353. 2012.

GUNHAN, T. *et al.* Mathematical modelling of drying of bay leaves. **Energy Conversion and Management**. v. 46, p. 1667-1679, 2005.

HAYKIN, S. **Redes Neurais – Princípios e Prática**. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900 p.

HIMMELBLAU, D.M. Accounts of Experiences in the Application of Artificial Neural Networks in Chemical Engineering. **Ind. Eng. Chem. Res.** v. 47, p. 5782-5796, 2008.

JACKES, R.A. *et al.* Influence of Drying Methods and Agronomic Variables on the Chemical Composition of Mate Tea Leaves (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil) Obtained from High-Pressure CO₂ Extraction. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. v. 55, n.25, p. 10081-10085. 2007.

KARIMI, F. *et al.* Optimization of an air drying process for Artemisia absinthium leaves using response surface and artificial neural network models. **Journal of Taiwan Institute of Chemical Engineers**, Taiwan, v. 43, p. 29-39, 2012.

KAYA, A.; AYDIN, O. An experimental study on drying kinetics of some herbal leaves. **Energy Conversion and Management**, Turkey, v.50, p. 118-134, 2009.

LIMA, R.A.B. **Fluidodinâmica de Leitos Fluidizados e Vibrofluidizado operando com partículas planas**. 2009. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnológicas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

LIMA, R.A.B. **Análise da secagem convectiva de folhas de manjeriço (*Ocimum basilicum* L.)**. 2013. 145f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

MARTINAZZO, A. P. *et al.* Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.11, n.3,p.301-306,2007.

MARTINS A.P.; RAFFIN F.N.; MOURA, T.F. Preparation and characterization of Mentha x villosa Hudson oil- β -cyclodextrin complex. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.**, Budapest, v. 88, n.2, p. 363-371, 2007.

MARTNS, P.M. **Influência da temperatura e da velocidade do ar de secagem no teor e na composição química do óleo essencial de capim-limão (*Cymbopogon citratus* (D.C.) STAPF.)**. 2000. 77 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

MITRA, P.; MEDA, V. Optimization of Microwave-Vacuum Drying Parameters of Saskatoon Berries Using Response Surface Methodology. **Drying Technology**. v.27, p.1089-1096. 2009.

MOCHI, V.T. **Efeito da temperatura de secagem no rendimento do óleo essencial e teor de 1,8-cineol presentes nas folhas de *Eucalyptus camaldulensis***. 2005. 76f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Área de Engenharia de Processos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MOTTA LIMA, O C. da.; PEREIRA, N. C.; MENDES, E. S. Análise da cinética de secagem de papel artesanal com ar ambiente em convecção forçada. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 24, n. 6, p. 1665-1671. 2002.

MOVAGHARNEJAD,K.; NIKZAD, M. Modeling of tomato drying using artificial neural network. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 59, p. 78-85. 2007.

NETO, L.G.P.; NICOLLETI, M.C. **Introdução às Redes Neurais Construtivas**.São Carlos:EdUFSCar, 2005. 192p.

NETO, B.B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. **Como Fazer Experimentos: Pesquisa e desenvolvimento na ciência a na indústria**. 3 ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2007. 480 p.

OMID, M.; BAHARLOOEI, A.; AHMADI, H. Modeling Drying Kinetics of Pistachio Nuts with Multilayer Feed-Forward Neural Network. **Drying Technology**, v. 27, p. 1069-1077. 2009.

PACHÚ, C. O. **Processamento de plantas medicinais para obtenção de extratos secos e líquidos**. 2007. 102f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

PAIVA, E. J. **Otimização de Processos de Manufatura com Múltiplas Respostas Baseada em Índices de Capacidades**. 2008. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2008.

PANCHARIYA, P. C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A.L. Desorption Isotherm Modelling of Black tea using artificial Neural Networks. **Drying Technology**, v. 20, n.2, p. 351-362. 2002.

PAULUS, D.; VALMORBIDA, R.; TOFFOLI, E.; Avaliação de substratos orgânicos na produção de mudas de hortelã (*Mentha gracillis* R. Br. e *Mentha x villosa* Huds.). **Revista Brasileira de Plantas Medicinai**s, Botucatu, v. 13, n. 1, p. 90-97, 2011.

PARK, K.J, VOHNIKOVA, Z., BROD, F.P.R. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispata* L.). **Journal of Food Engineering**. v. 51, p.193-199, 2002.

PARK, K. J. et al. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. Centro de Tecnologia e Engenharia Agroindustrial, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007. 121p.

PENTEADO, D.M.R. **Estudo de Otimização do meio de cultura para a microalga *Phaeodactylum tricornutum* para produção de lipídios**. 2010. 101f. Dissertação de Mestrado em Bioquímica – Setor de Ciência Biológicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

PRADO, M.M. **Secagem em leito fixo de sementes com mucilagem**.2004. 161f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciência Exatas e de Tecnológicas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 162f., 2004.

RADÜNZ, L. L. **Efeito da temperatura do ar de secagem no teor e na composição dos óleos essenciais de guaco (*Mikania glomerata Sprengel*) e hortelã-comum (*Mentha x villosa Huds*)**. 2004. 90p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2004.

RODRIGUES, M.I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos: Uma estratégia seqüencial de planejamentos**. Campinas: Casa do Pão Editora, 2005. 326p.

SILVA, F. DA. **Avaliação do teor e da composição química do óleo essencial de plantas medicinais submetidas a processos de secagem e armazenamento**. 2005. 151p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: principles applications and design**. 1.ed., Gordon and Breach Science Publishers, 1986, 448p. apud SILVA, F. da. **Avaliação do teor e da composição química do óleo essencial de plantas medicinais submetidas a processos de secagem e armazenamento**. 2005. 168p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2005.

TERRA, A.R.T. **Programa de Produção: Uma Abordagem de Redes Neurais**. 2000. 149f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2000.

VERAS, A.O.M. **Secagem de pimenta dedo-de-moça (*Capsicum baccatum* var. *pendulum*) em secador convectivo horizontal**. 2010. 79f. Dissertação (Mestre em Engenharia Química) – Centro de Ciência Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

YOUSSEFI, Z. E.D.; MOUSAVI, S.M. Comparison of Artificial Neural Network (ANN) and Response Surface Methodology (RSM) in the Prediction of Quality Parameters of Spray-Dried Pomegranate Juice. **Drying Technology**. v.27, p. 910-917, 2009.

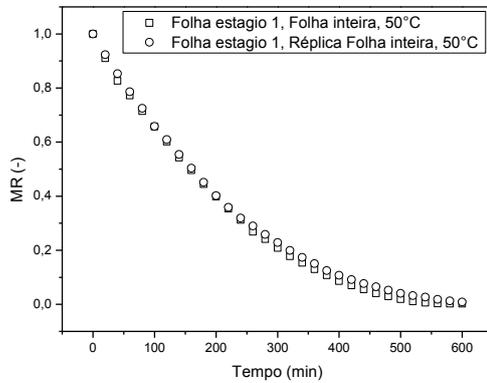
WERKEMA, M.C.C.; AGUIAR, S. **Otimização estatística de processos**: como determinar a condição de operação de um processo que leva ao alcance de uma meta. Belo Horizonte, Fundação Cristiano Ottoni, 1996, 331 p.

ZANOELLO, E.F.; CELSO, G.M. DI; KASKANTZIS, G. Drying Kinetics of Mate Leaves in a Packed Bed Dryer. **Biosystems Engineering**. v. 96, p. 487-494, 2007.

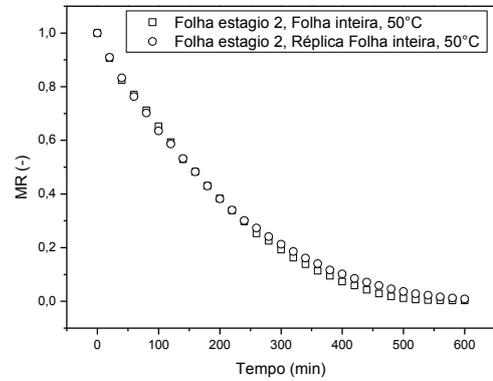
APÊNDICE A

Curvas de razão de umidade em função do tempo para os ensaios realizados na estufa

Figura A.1 - Umidade adimensional em função do tempo para os ensaios realizados em uma estufa a temperatura de 50°C para folhas inteiras do (a) primeiro e (b) segundo estágio e suas réplicas;



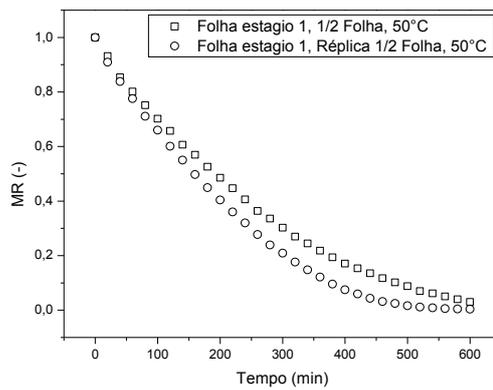
(a)



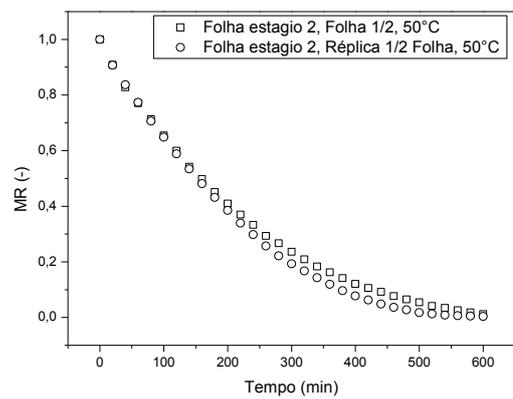
(b)

FONTE: Acervo pessoal

Figura A.2 - Umidade adimensional em função do tempo para os ensaios realizados em uma estufa a temperatura de 50°C para folhas cortadas em duas partes do (a) primeiro e (b) segundo estágio e suas réplicas;



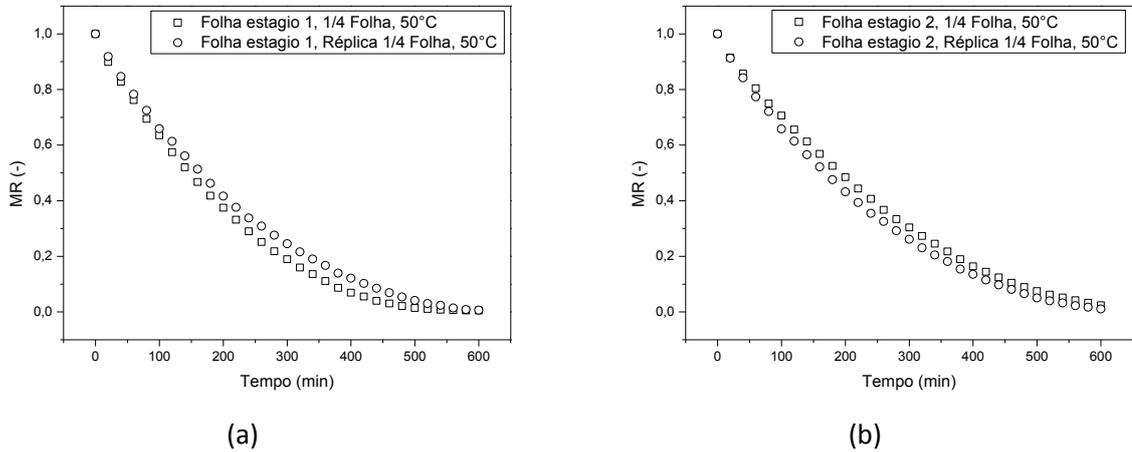
(a)



(b)

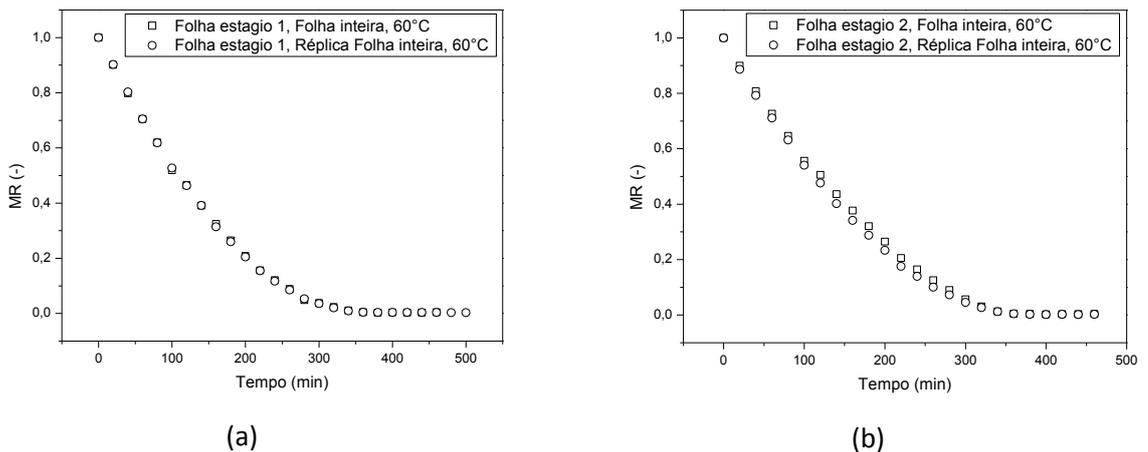
FONTE: Acervo pessoal

Figura A.3 - Umidade adimensional em função do tempo para os ensaios realizados em uma estufa a temperatura de 50°C para folhas cortadas em quatro partes do (a) primeiro e (b) segundo estágio e suas réplicas;



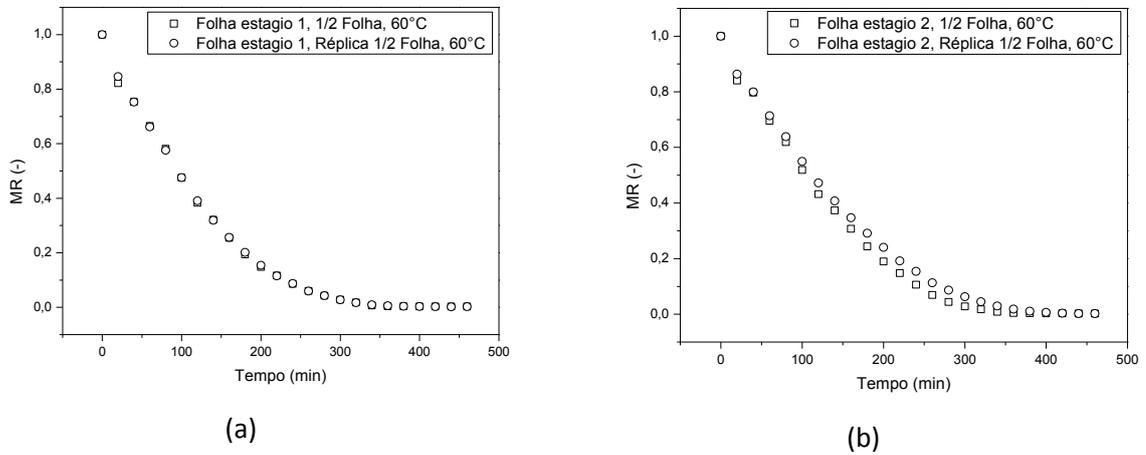
FONTE: Acervo pessoal

Figura A.4 - Umidade adimensional em função do tempo para os ensaios realizados em uma estufa a temperatura de 60°C para folhas inteiras do (a) primeiro e (b) segundo estágio e suas réplicas;



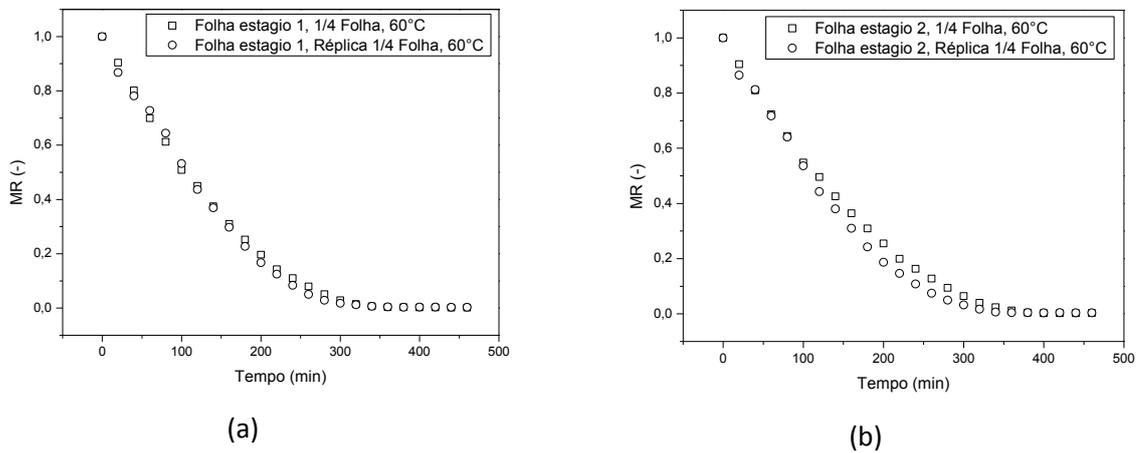
FONTE: Acervo pessoal

Figura A.5 - Umidade adimensional em função do tempo para os ensaios realizados em uma estufa a temperatura de 60°C para folhas cortadas em duas partes do (a) primeiro e (b) segundo estágio e suas réplicas;



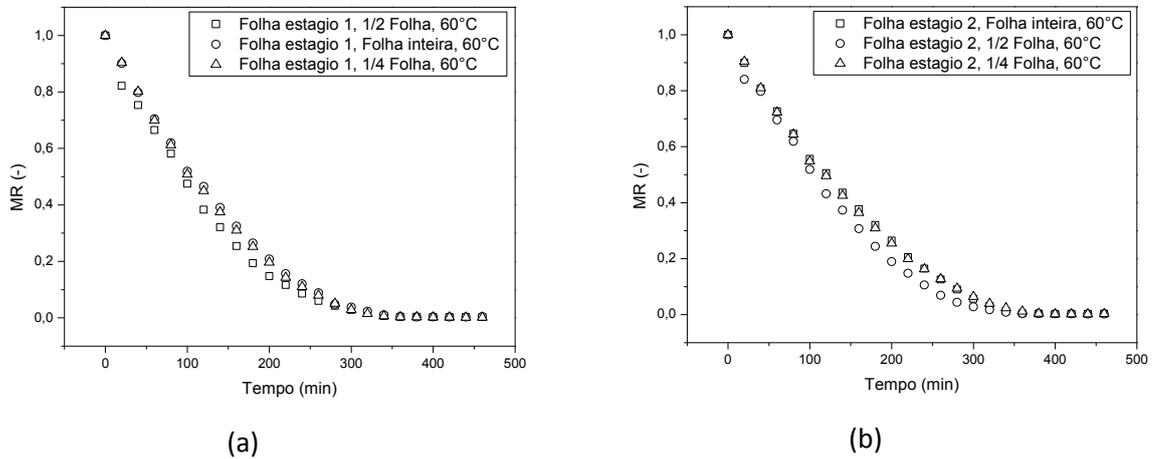
FONTE: Acervo pessoal

Figura A.6 - Umidade adimensional em função do tempo para os ensaios realizados em uma estufa a temperatura de 60°C para folhas cortadas em quatro partes do (a) primeiro e (b) segundo estágio e suas réplicas;



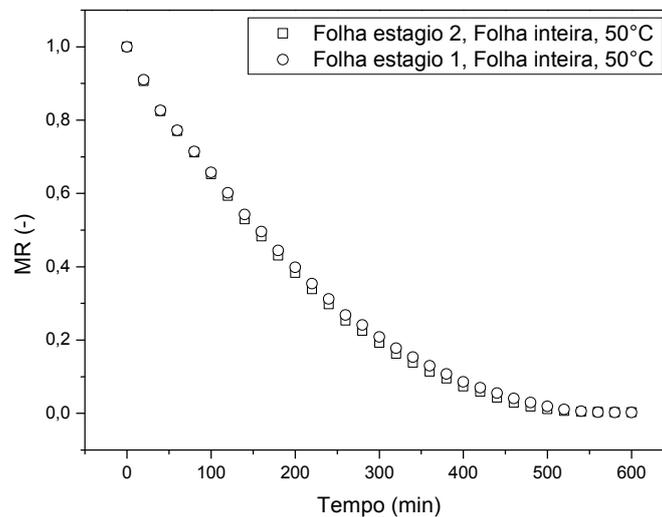
FONTE: Acervo pessoal

Figura A.7 - Gráficos de (a) MR em função do tempo para o primeiro estágio e (b) MR em função do tempo para o segundo estágio, ambos parametrizados no tamanho da folha, resultante da secagem a 60°C.



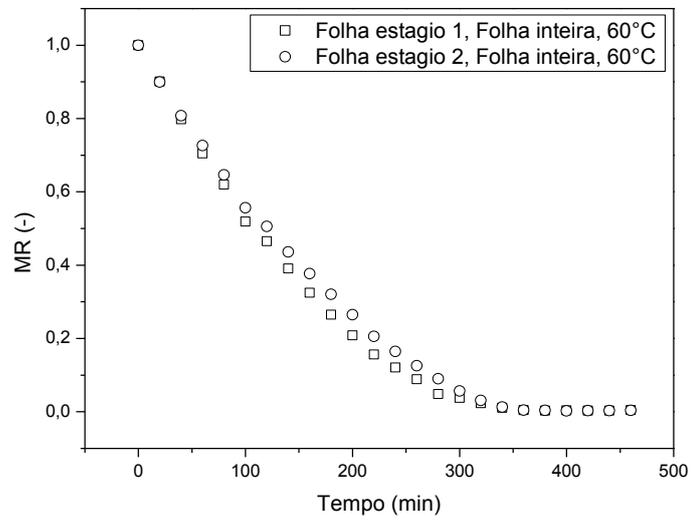
FONTE: Acervo pessoal

Figura A.8 - Umidade adimensional em função do tempo para os ensaios realizados à temperatura de 50°C, parametrizado no estágio da folha.



FONTE: Acervo pessoal

Figura A.9 - Umidade adimensional em função do tempo para os ensaios realizados à temperatura de 60°C, parametrizado no estágio da folha.

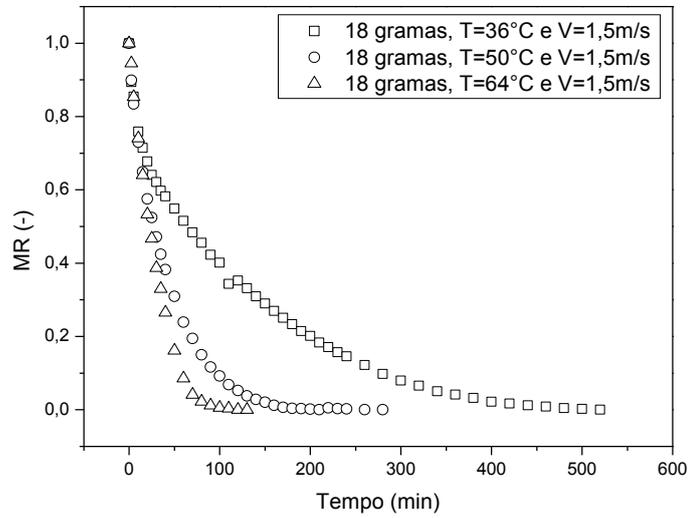


FONTE: Acervo pessoal

APÊNDICE B

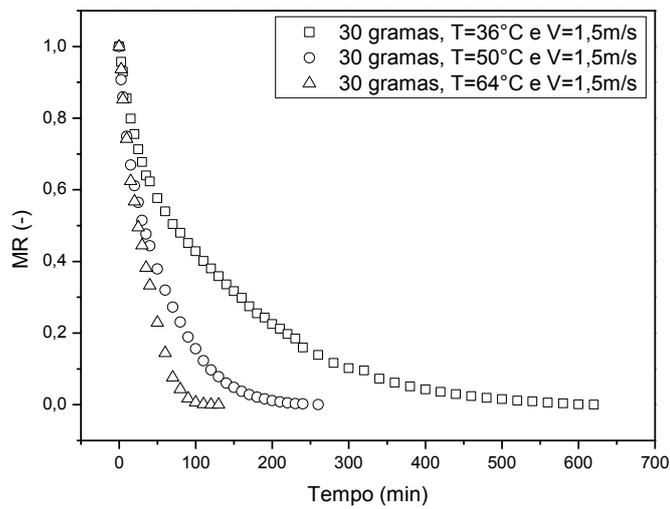
Curvas de razão de umidade em função do tempo para os ensaios realizados no secador convectivo

Figura B.1 - Gráficos de MR em função do tempo para as amostras com 18 gramas e velocidade do ar de 1,5 m/s, parametrizado na temperatura.



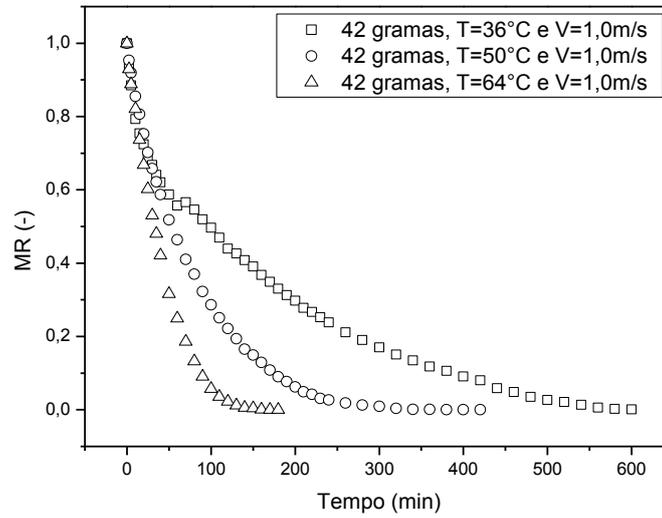
FONTE: Acervo pessoal

Figura B.2 - Gráficos de MR em função do tempo para as amostras com 30 gramas e velocidade do ar de 1,5 m/s, parametrizado na temperatura.



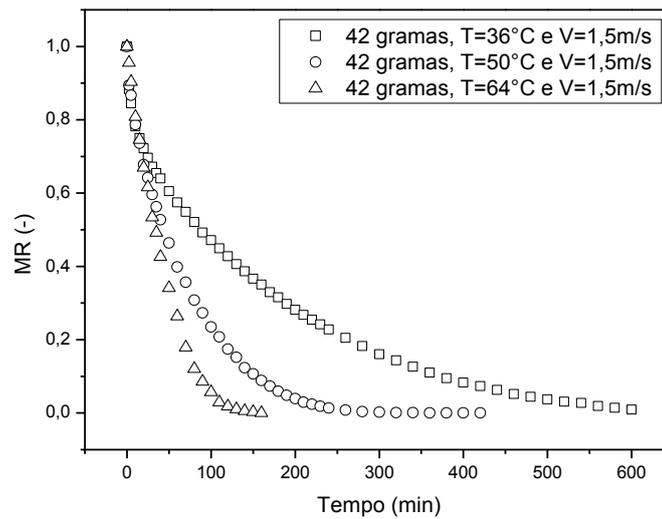
FONTE: Acervo pessoal

Figura B.3 - Gráficos de MR em função do tempo para as amostras com 42 gramas e velocidade do ar de 1,0 m/s, parametrizado na temperatura.



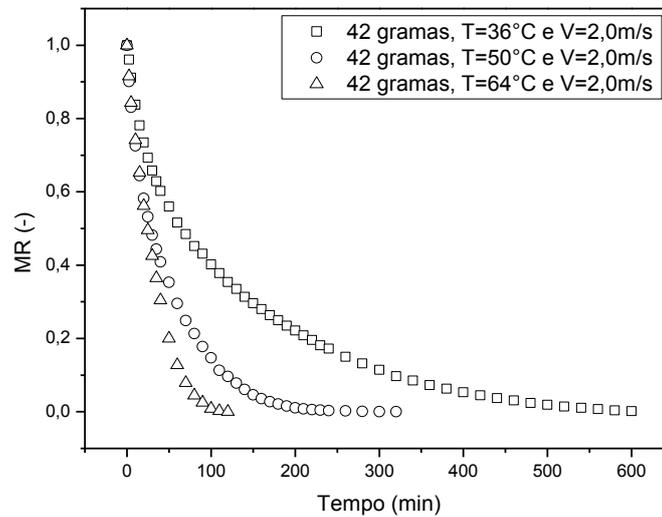
FONTE: Acervo pessoal

Figura B.4 - Gráficos de MR em função do tempo para as amostras com 42 gramas e velocidade do ar de 1,5 m/s, parametrizado na temperatura.



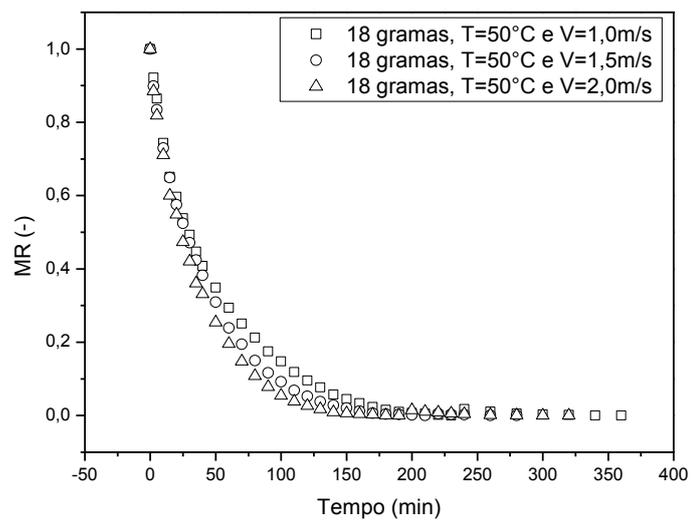
FONTE: Acervo pessoal

Figura B.5 - Gráficos de MR em função do tempo para as amostras com 42 gramas e velocidade do ar de 2,0 m/s, parametrizado na temperatura.



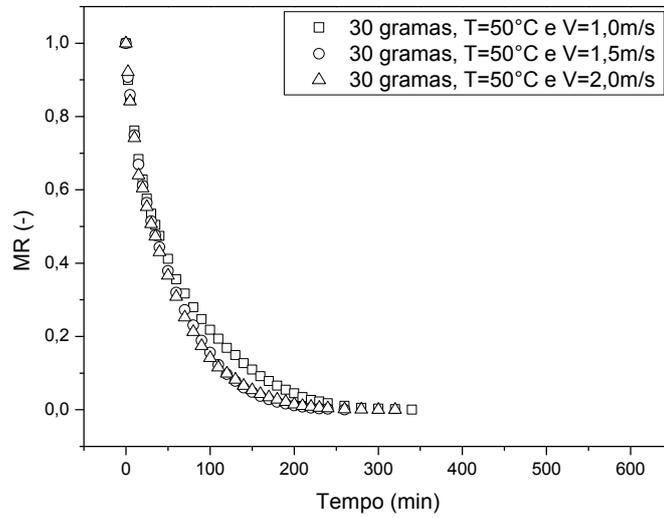
FONTE: Acervo pessoal

Figura B.6 - Gráficos de MR em função do tempo para as amostras com 18 gramas e temperatura do ar de 50°C, parametrizado na velocidade do ar.



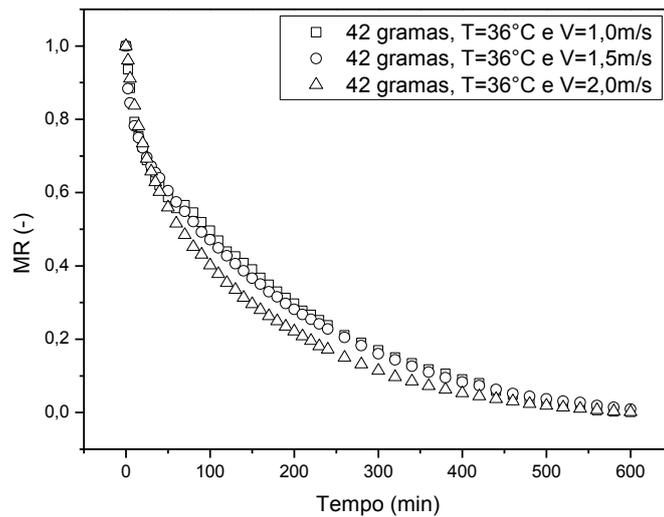
FONTE: Acervo pessoal

Figura B.7 - Gráficos de MR em função do tempo para as amostras com 30 gramas e temperatura do ar de 50°C, parametrizado na velocidade do ar.



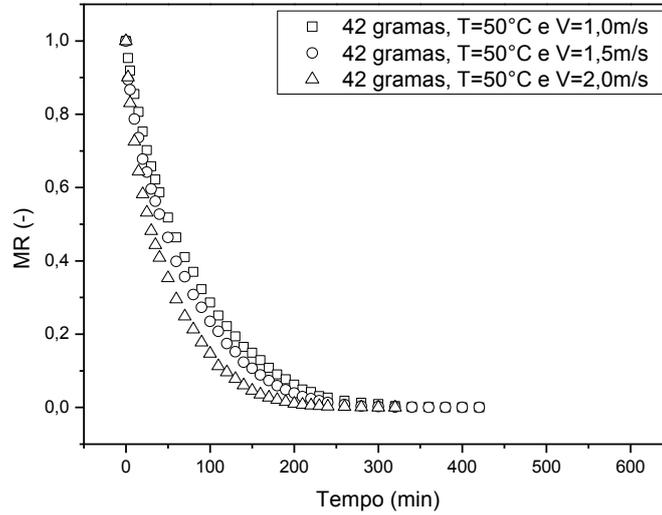
FONTE: Acervo pessoal

Figura B.8 - Gráficos de MR em função do tempo para as amostras com 42 gramas e temperatura do ar de 36°C, parametrizado na velocidade do ar.



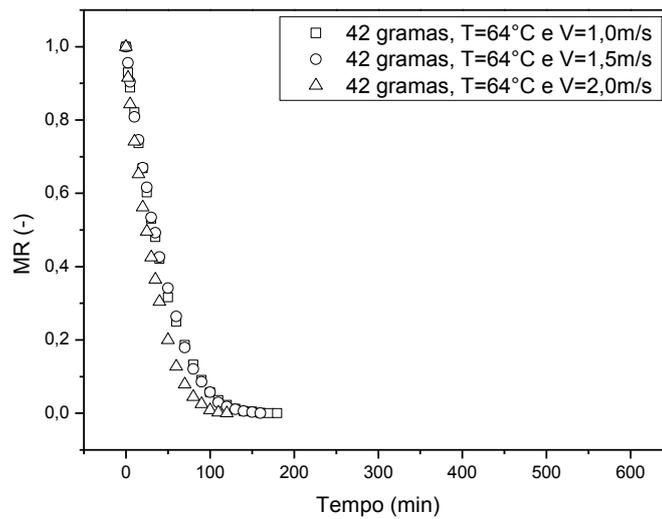
FONTE: Acervo pessoal

Figura B.9 - Gráficos de MR em função do tempo para as amostras com 42 gramas e temperatura do ar de 50°C, parametrizado na velocidade do ar.



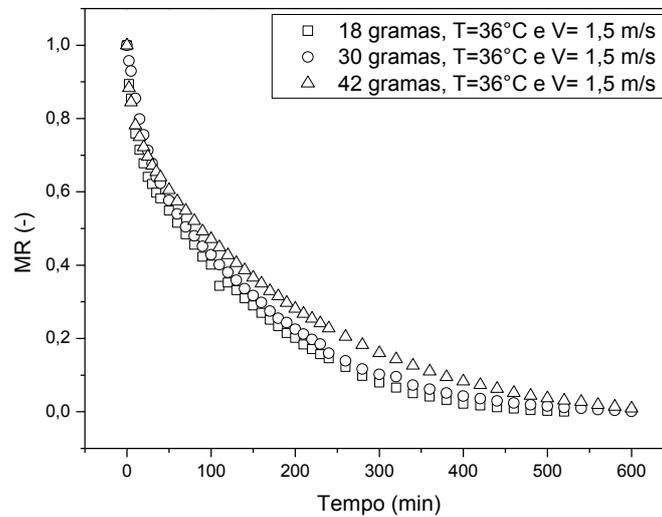
FONTE: Acervo pessoal

Figura B.10 - Gráficos de MR em função do tempo para as amostras com 42 gramas e temperatura do ar de 64°C, parametrizado na velocidade do ar.



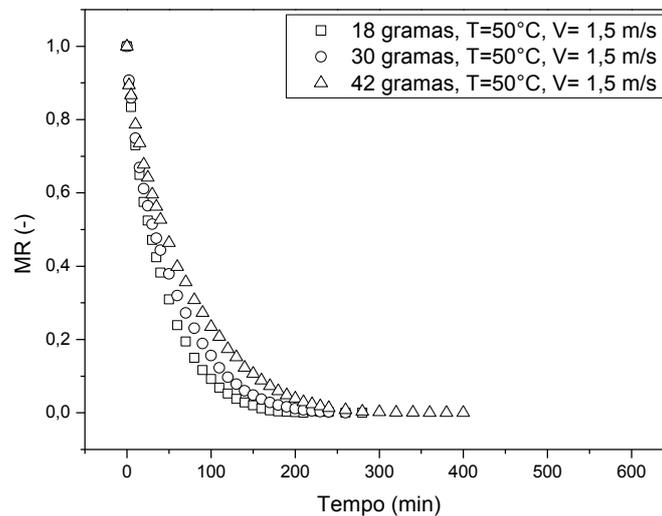
FONTE: Acervo pessoal

Figura B.11 - Gráficos de MR em função do tempo para os ensaios realizados à temperatura do ar de 36°C e velocidade do ar de 1,5m/s, parametrizado na massa da amostra.



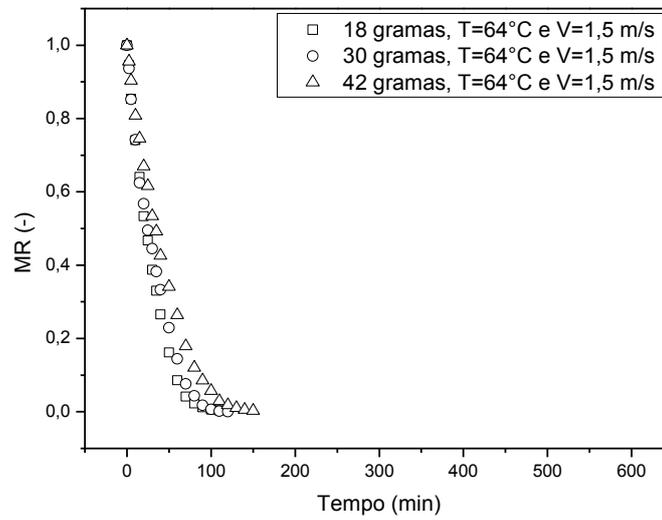
FONTE: Acervo pessoal

Figura B.12 - Gráficos de MR em função do tempo para os ensaios realizados à temperatura do ar de 50°C e velocidade do ar de 1,5m/s, parametrizado na massa da amostra.



FONTE: Acervo pessoal

Figura B.13 - Gráficos de MR em função do tempo para os ensaios realizados à temperatura do ar de 64°C e velocidade do ar de 1,5m/s, parametrizado na massa da amostra.



FONTE: Acervo pessoal