

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - UNIOESTE
CENTRO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO “STRICTO SENSU” EM
ENGENHARIA QUÍMICA – NÍVEL DE MESTRADO**

**ESTUDO, MODELAGEM MATEMÁTICA E CONTROLE DO PROCESSO DE
SECAGEM DE CRAMBE (*Crambe Abyssinica*) EM SECADOR DE LEITO FIXO
DE BANCADA**

FERNANDA PAOLA BUTARELLI CRUZ

TOLEDO – PR - BRASIL

2016

FERNANDA PAOLA BUTARELLI CRUZ

**ESTUDO, MODELAGEM MATEMÁTICA E CONTROLE DO PROCESSO DE
SECAGEM DE CRAMBE (*Crambe Abyssinica*) EM SECADOR DE LEITO FIXO
DE BANCADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em **Desenvolvimento de Processos.**

Orientador: Prof. Dr. Fernando Palú

Co-orientador: Prof. Dr. Edson A. da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Reginaldo Guirardello

TOLEDO – PR– BRASIL

2016

Catálogo na Publicação elaborada pela Biblioteca Universitária
UNIOESTE/Campus de Toledo.
Bibliotecária: Marilene de Fátima Donadel - CRB – 9/924

C957e Cruz, Fernanda Paola Butarelli
Estudo, modelagem matemática e controle do processo de
secagem de Crambe (*Crambe abyssinica*) em secador de leito fixo
de bancada / Fernanda Paola Butarelli Cruz. -- Toledo, PR : [s. n.],
2016.

xiii, 121 f. : il. (algumas color.), figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Palú
Coorientador: Prof. Dr. Edson Antonio da Silva
Coorientador: Prof. Dr. Reginaldo Guirardello
Dissertação (Mestre em Engenharia Química) - Universidade
Estadual do Oeste do Paraná. Campus de Toledo. Centro de
Engenharias e Ciências Exatas.

1. Engenharia química - Dissertações 2. Crambe (*Crambe
abyssinica*) 3. Sementes de crambe 4. Controle de processo 5.
Secagem industrial 6. Secagem - Desempenho energético 7. Leito
fixo (Engenharia química) 8. Modelagem matemática I. Palú,
Fernando, orient. II. . Silva, Edson Antonio da, orient. III.
Guirardello, Reginaldo, orient. IV. T

CDD 20. ed. 660.284267

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me carregar em suas mãos durante esse percurso.

Aos meus orientadores, Fernando Palu, Edson Silva por me direcionarem nessa caminhada, por me incentivarem, me aconselharem, por acreditarem em mim mesmo quando eu não acreditava mais, e principalmente por me entenderem como pessoa.

Aos professores Carlos Eduardo e Michele Mesomo, pelas imensas contribuições com esse trabalho.

Ao meu esposo, Igor, meu grande incentivador, pela compreensão nos momentos de ausência e por sempre acreditar em meu potencial.

Aos meus pais, Edineide e João, por serem exemplos de integridade e dedicação e por nunca medirem esforços em me ajudar nos momentos necessários.

Às minhas irmãs, Gianete, Adriana e Samira, e meus cunhados, Alex, Jackson e Filipe, pelos momentos juntos, pois apesar de poucos renovavam minhas energias.

Ao meu querido avô Aparecido, que perdi durante essa jornada. Com dor e lágrimas continuei e agora espero orgulhá-lo.

Aos meus amores, meus sobrinhos Marco Antônio, Giulia e João Lucas. A distância me fazia chorar, mas cada lembrança me dava ânimo em prosseguir.

Aos amigos que fiz durante essa caminhada, Jean Carlos, Andy Avimael e Joelmir pela amizade, pela companhia, pelas lágrimas e pelas risadas.

A todos que de alguma forma contribuíram para que esse sonho se realizasse.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	4
1.1.1	Objetivo geral	4
1.1.2	Objetivos específicos.....	4
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1	Crambe (<i>Crambe abyssinica</i>).....	5
2.1.1	Aplicações do Crambe	6
2.2	Secagem	7
2.2.1	Curvas de secagem.....	10
2.2.2	Tipos de Secadores.....	11
2.2.3	Trabalhos realizados com secagem de Crambe	15
2.3	Hidratação	16
2.3.1	Modelagem da cinética de hidratação de grãos	17
2.3.2	Trabalhos realizados com hidratação de grãos	19
2.4	Isotermas de sorção	20
2.4.1	Métodos para determinação das isotermas.....	24
2.4.2	O método estático	25
2.4.3	O método dinâmico	26
2.4.4	Os modelos de isotermas de sorção	26
2.5	Controle de Processos	32
2.5.1	Sistemas de Controle	34
2.5.2	Controlador PID.....	35
2.5.3	Sintonia dos controladores	38
2.5.4	Desempenho do controlador	43
2.5.5	Trabalhos realizados com controle de processo de secagem	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1	Caracterização das amostras.....	47
3.1.1	Determinação de massa seca	47
3.1.2	Granulometria.....	48
3.1.3	Composição Centesimal.....	49
3.1.4	Porosidade	49
3.2	Determinação da cinética de hidratação	50

3.3	Determinação da cinética de secagem.....	51
3.3.1	Módulo experimental	51
3.3.2	Cinética de Secagem	54
3.4	Determinação do Coeficiente de Difusividade e da Energia de Ativação.....	56
3.5	Determinação das isotermas de equilíbrio	58
3.6	Sistema de controle.....	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1	Caracterização da amostra	65
4.2	Cinética de Hidratação	66
4.3	Isotermas de sorção estáticas	67
4.3.1	Ajuste dos modelos de isotermas.....	69
4.4	Cinética de secagem	71
4.4.1	Avaliação dos efeitos das variáveis operacionais sobre a cinética de secagem.....	73
4.4.2	Ajuste dos modelos de cinética de secagem.....	78
4.5	Difusividade Efetiva	88
4.6	Controle do Processo	89
4.6.1	Sintonia dos parâmetros do controlador	90
4.6.2	Ajuste Fino do Controlador	97
5	CONCLUSÃO	102
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Crambe Abyssinica (Fonte: Klorane, 2015).....	5
Figura 2	<i>Crambe Abyssinica</i> coloração verde (Fonte: CASTRO, 2012).....	6
Figura 3	<i>Crambe Abyssinica</i> coloração amarelada (Fonte: CASTRO, 2012)...	6
Figura 4	Curva de Secagem [Fonte: adaptado de PARK, et. al (2007a)].....	10
Figura 5	Classificação de secadores segundo o modo de operação. [Fonte: Adaptado de PARK (2007b)].....	14
Figura 6	Os quatro tipos principais de isoterma (Adptado de Limousinet al.(2007)).....	21
Figura 7	Os cinco Tipos de isotermas de sorção [adaptado de MATHLOUTHI e ROGÉ, 2003].....	22
Figura 8	Isoterma geral de adsorção e dessorção paraproductos alimentícios [Fonte: adaptado de HELDMAN <i>et al.</i> 1992].....	23
Figura 9	Sistema em Malha aberta	35
Figura 10	Sistema em Malha fechada	35
Figura 11	Ação proporcional	36
Figura 12	Ação integrativa	36
Figura 13	Ação derivativa.....	37
Figura 14	Padrão de resposta ao degrau.....	40
Figura 15	Curva de Reação do processo para obtenção dos parâmetros T, θ e K.....	40
Figura 16	Período crítico da resposta (Pcr) em malha fechada.	41
Figura 17	Equipamento utilizado nos experimentos de secagem de crambe.	51
Figura 18	Aparato experimental utilizado para a secagem dos grãos de crambe.	52
Figura 19	Placa de controle Arduíno UNO	52
Figura 20	<i>Protoboard</i> de 830 furos.....	53
Figura 21	Ponte H L298	53
Figura 22	Recipiente utilizado nos experimentos para determinação do equilíbrio higroscópico dos grãos de crambe.	58
Figura 23	Diagrama que demonstra a estrutura do controlador PID implementado.....	61

Figura 24	Dimmer controlador de potência para alterar a tensão da resistência elétrica.....	62
Figura 25	Gráfico que demonstra o ajuste de modelo aos dados experimentais da cinética de hidratação de grãos de crambe.....	67
Figura 26	Isoterma de equilíbrio de sorção de água do grão de crambe nas temperaturas de 30°C, 45°C e 60°C.....	68
Figura 27	Isoterma de sorção de água em grãos de crambe na temperatura de 30°C ajustada pelo modelo de Smith modificado.....	70
Figura 28	Isoterma de sorção de água na temperatura de 45°C ajustada pelo modelo de Smith modificado.....	70
Figura 29	Isoterma de sorção de água na temperatura de 60°C ajustada pelo modelo de Smith modificado.....	71
Figura 30	Curvas de secagem para grãos de crambe à temperatura de 40°C.	72
Figura 31	Curvas de secagem para grãos de crambe à temperatura de 50°C.	72
Figura 32	Curvas de secagem para grãos de crambe à temperatura de 60°C.	73
Figura 33	Gráfico de Pareto dos efeitos de cada variável sobre o tempo de secagem.....	74
Figura 34	Superfície de Resposta dos dados experimentais da cinética de secagem.....	77
Figura 35	Curva de secagem de grãos de crambe na temperatura de 40°C, velocidade de ar de 1,5m/s, umidade do grão de 0,24, ajustadas pelo modelo Newton modificado – Potência 2 com dois parâmetros ajustados (B e N).....	82
Figura 36	Curva de secagem de grãos de crambe na temperatura de 40°C, velocidade de ar de 2,5m/s, umidade do grão de 0,24, ajustadas pelo modelo Newton modificado – Potência 2 com dois parâmetros ajustados (B e N).....	82
Figura 37	Curva de secagem de grãos de crambe na temperatura de 60°C, velocidade de ar de 1,5m/s, umidade do grão de 0,24, ajustadas pelo modelo Newton modificado – Potência 2 com dois parâmetros ajustados (B e N).....	83
Figura 38	Curva de secagem de grãos de crambe na temperatura de 60°C, velocidade de ar de 2,5m/s, umidade do grão de 0,24, ajustadas pelo	

	modelo Newton modificado – Potência 2 com dois parâmetros ajustados (B e N).....	83
Figura 39	Curva de secagem de grãos de crambe na temperatura de 40°C, velocidade de ar de 1,5m/s, umidade do grão de 0,38, ajustadas pelo modelo Newton modificado – Potência 2 com dois parâmetros ajustados (B e N).....	84
Figura 40	Curva de secagem de grãos de crambe na temperatura de 40°C, velocidade de ar de 2,5m/s, umidade do grão de 0,38, ajustadas pelo modelo Newton modificado – Potência 2 com dois parâmetros ajustados (B e N).....	84
Figura 41	Curva de secagem de grãos de crambe na temperatura de 60°C, velocidade de ar de 1,5m/s, umidade do grão de 0,38, ajustadas pelo modelo Newton modificado – Potência 2 com dois parâmetros ajustados (B e N).....	85
Figura 42	Curva de secagem de grãos de crambe na temperatura de 60°C, velocidade de ar de 2,5m/s, umidade do grão de 0,38, ajustadas pelo modelo Newton modificado – Potência 2 com dois parâmetros ajustados (B e N).....	85
Figura 43	Curva de secagem de grãos de crambe na temperatura de 50°C, velocidade de ar de 2,0m/s, umidade do grão de 0,31, ajustadas pelo modelo Newton modificado – Potência 2 com dois parâmetros ajustados (B e N).....	86
Figura 44	Curva de secagem de grãos de crambe na temperatura de 50°C, velocidade de ar de 2,0m/s, umidade do grão de 0,31, ajustadas pelo modelo Newton modificado – Potência 2 com dois parâmetros ajustados (B e N).....	86
Figura 45	Curva de secagem de grãos de crambe na temperatura de 50°C, velocidade de ar de 2,0m/s, umidade do grão de 0,31, ajustadas pelo modelo Newton modificado – Potência 2 com dois parâmetros ajustados (B e N).....	87
Figura 46	Comparação do processo com atuação e sem atuação de um controlador, com perturbação da resistência elétrica de 120V para 130V.....	89

Figura 47	Comparação do processo de secagem com atuação e sem atuação de um controlador, com perturbação da resistência elétrica de 120V para 110V.....	89
Figura 48	Curva de Reação do processo para determinação dos parâmetros do controlador	90
Figura 49	Ajuste de polinômio aos dados experimentais de obtenção da Curva de Reação.....	91
Figura 50	Curva de reação e a reta tangente ao ponto de inflexão.....	93
Figura 51	Comportamento do controlador PID com parâmetros sintonizados pelo método de Z&N, perturbação de 120V para 130V	95
Figura 52	Comportamento do controlador PID com parâmetros sintonizados pelo método de Z&N, perturbação de 120V para 110V	95
Figura 53	Comportamento do controlador PID com parâmetros sintonizados pelo método de C&C, perturbação de 120V para 130V	96
Figura 54	Comportamento do controlador PID com parâmetros sintonizados pelo método de C&C, perturbação de 120V para 110V	96
Figura 55	Comportamento do controlador PID com alteração no parâmetro $T_d = 0,3$. Pertubração 120V para 130V.....	98
Figura 56	Comportamento do controlador PID com alteração no parâmetro $T_d = 0,3$. Pertubração 120V para 110V.....	98
Figura 57	Comportamento do controlador PID com alteração no parâmetro $T_d = 0,5$. Perturbação 120,v para 130V.	99
Figura 58	Comportamento do controlador PID com alteração no parâmetro $T_d = 0,5$. Perturbação 120,v para 110V.	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Relação dos produtos com seus secadores mais adequados	13
Tabela 2	Valores sugeridos por Ziegler e Nichols para os ganhos do controlador PID em função da curva de resposta.	41
Tabela 3	Valores sugeridos por Ziegler e Nichols para os ganhos do controlador PID para o método em malha fechada.....	42
Tabela 4	Valores sugeridos por Cohen e Coon (1953) para as leis de controle P, PI e PID.	42
Tabela 5	Crítérios de desempenho de controle.....	44
Tabela 6	Níveis e valores decodificados de temperatura, velocidade do ar e umidade inicial da amostra para a secagem de Crambe	55
Tabela 7	Modelos analisados para a cinética de secagem de grãos de crambe	56
Tabela 8	Valores de U.R. para as concentrações de H ₂ SO ₄ em função das temperaturas	59
Tabela 9	Modelos analisados para isoterms de sorção de grãos de crambe.	60
Tabela 10	Temperaturas obtidas com variação da tensão da resistência elétrica a uma velocidade do ar constante igual a X m/s	62
Tabela 11	Medidas de ajuste manual para problemas encontrados no controlador	64
Tabela 14	Composição centesimal de grãos de crambe	65
Tabela 15	Experimento de hidratação de grãos de crambe em duplicata.	66
Tabela 16	Parâmetros ajustados dos modelos de equilíbrio para grãos de Crambe	69
Tabela 17	Tempo de secagem dos experimentos para obtenção da cinética de secagem.....	73
Tabela 18	Análise de Variância dos dados experimentais de secagem	74
Tabela 19	Tabela de efeitos para os fatores significativos para um modelo de 1ª ordem.....	75
Tabela 20	Análise de curvatura sobre o modelo	75
Tabela 21	Cálculo do Teste F para validação do modelo.	76

Tabela 22	Parâmetros ajustados dos modelos de secagem para grãos de crambe à temperatura de 40°C.....	79
Tabela 23	Parâmetros ajustados dos modelos de secagem para grãos de crambe à temperatura de 50°C.....	80
Tabela 24	Parâmetros ajustados dos modelos de secagem para grãos de crambe à temperatura de 60°C.....	81
Tabela 25	Valores dos coeficientes de difusão para cada experimento.	88
Tabela 26	Valores da temperatura em um intervalo de tempo selecionado para obtenção do ponto de inflexão	91
Tabela 27	Parâmetros do controlador PID sintonizado pelo Método Z&N	93
Tabela 28	Parâmetros do controlador PID sintonizado pelo Método Cohen e Coon.....	94
Tabela 29	Desempenho dos controladores sintonizados pelos métodos de Ziegler & Nichols e Cohen-Coon.....	97
Tabela 30	Análise de desempenho para o controlador com mudança no parâmetro Td para 0,3.....	99
Tabela 31	Análise de desempenho do controlador com alteração no parâmetros Td para 0,5.....	100

RESUMO

Em um cenário de aumento contínuo na demanda por biodiesel o Brasil tem apresentado grande potencial de produção a partir de oleaginosas. Entre as diversas culturas pesquisadas na atualidade, o crambe (*Crambe abyssinica*) tem destaque especial, sendo imprescindível a realização de estudos que garantam o bom desempenho dessa cultura no campo, assim como a manutenção da qualidade da semente e do óleo. Sabe-se que a qualidade da semente é um resultado de diversos fatores que precisam ser controlados, tais como características do plantio e colheita, processo de secagem, beneficiamento e condições de armazenagem. Entre esses fatores a secagem tem especial importância, uma vez que está diretamente ligada à qualidade do produto e eficiência energética do processo. A secagem industrial há muito tempo tem passado por um processo de automatização, sendo essencial para um melhor controle do processo. Para o projeto de um secador em escala industrial é fundamental estudos da cinética e de equilíbrio higroscópico. Neste sentido foram realizados ensaios para a obtenção das isotermas de grãos de *Crambe abyssinica* para as temperaturas de 30, 45 e 60 °C e diversas condições de umidade relativa. A determinação da umidade de equilíbrio foi realizada usando o método estático com o uso de soluções de ácido sulfúrico. Os modelos de Luikov, Keey, Henderson, Chung&Pfof, Henderson-Thompson, Halsey modificado, Oswin modificado e Smith modificado foram ajustados aos valores experimentais e recomendados aqueles que apresentaram os melhores coeficientes de determinação (R^2). Os grãos passaram por um processo de hidratação, realizado pelo método de embebição em água destilada em banho ultratermostático, sendo determinado um modelo empírico para determinação da cinética de hidratação dos grãos, possibilitando avaliar diferentes umidades do grão no processo de secagem. A cinética de secagem foi realizada em secador de leito fixo de bancada, foram realizados experimentos com objetivo de analisar a influência de três variáveis no processo: temperatura do ar, velocidade do ar e umidade inicial do grão. Os experimentos foram delineados através de um planejamento experimental completo, com três variáveis e dois níveis. A variável resposta analisada foi o tempo decorrido do início do processo até que não houvesse mais variação de massa significativa da amostra, considerado nesse trabalho como o tempo de secagem. Foi realizada a análise estatística para verificar o efeito de cada variável no processo, utilizando um p-valor de 0,05. Um modelo empírico foi encontrado e validado através do coeficiente de determinação do modelo (R^2). Os dados experimentais da cinética de secagem foram ajustados a modelos da literatura: Newton, Newton modificado, Newton modificado-potência e Difusivo. No processo de secagem foi implementado uma malha de controle do tipo PID (Proporcional Integrativo Derivativo), a sintonia dos parâmetros do controlador se deu através do método de Ziegler e Nichols e Cohen e Coon, ambos em malha aberta, através da análise da curva de reação. O refinamento do ajuste foi realizado manualmente. Para avaliar o desempenho dos controladores foram utilizados os critérios IAE (Integral do módulo do erro) e ISE (Integral dos erros ao quadrado). A análise do comportamento higroscópico demonstrou que a temperatura é um parâmetro que tem influência significativa nas faixas estudadas.

A umidade de equilíbrio apresentou comportamento típico, diminuindo com o aumento da temperatura do ar. A menor umidade de equilíbrio foi obtida com a temperatura de 60°C, a maior temperatura entre as três analisadas. O modelo de Smith modificado foi o que melhor descreveu as isotermas de sorção para as três temperaturas investigadas. As melhores condições para remoção da umidade de crumbe foram alcançada na temperatura de 60°C. Uma análise estatística dos dados experimentais foi realizada, demonstrando uma influência negativa da temperatura no tempo de secagem, e influência positiva da velocidade do ar, a variável umidade inicial do grão não teve efeito significativo. O modelo empírico encontrado foi um modelo de 1ª ordem, que representa 72% dos dados obtidos. O modelo de Newton modificado – potência 2, com dois parâmetros ajustados foi o que melhor descreveu a cinética de secagem para as três temperaturas avaliadas. Foi implementado um sistema de controle automático do tipo PID, para sintonia dos parâmetros do controlador foram utilizados os métodos de Ziegler & Nichols e Cohen & Coon em malha aberta, através da análise de desempenho os parâmetros encontrados pelo método de Cohen & Coon obteve melhores resultados. Foi realizada uma tentativa de melhoria no desempenho através de um ajuste fino manual, porém não houve melhora. O controlador implementado manteve a temperatura do ar próxima ao setpoint estabelecido, na presença de perturbações, sendo assim pode garantir no processo de secagem um produto mais padronizado, melhor qualidade e eficiência energética.

ABSTRACT

In a continuing increase in demand for biodiesel scenario in Brazil has experienced great potential for production from oil. Between different cultures researched at present, the crambe (*Crambe abyssinica*) has special prominence, it is imperative to carry out studies aimed at the proper performance of this crop in the field, as well as maintaining seed quality and oil. It is known that seed quality is a result of several factors that need to be controlled, such as planting and harvesting characteristics, drying, processing and storage conditions. These drying factors are especially important since it is directly linked to product quality and energy efficiency of the process. The long industrial drying has undergone an automation process, is essential for better process control. For the design of a dryer on an industrial scale is essential to conduct studies of the kinetics and equilibrium moisture content. Accordingly assays were performed to obtain the isotherms *Crambe abyssinica* beans to temperatures of 30, 45 and 60 ° C and different relative humidity conditions. The equilibrium moisture content was conducted using the static method with the use of sulfuric acid solutions. Models Luikov, Keey, Henderson, Chung & Pfost, Henderson-Thompson, modified Halsey, modified Oswin and Smith modified were fitted to the experimental values and recommended those with the best coefficients of determination (R^2). The beans passed through a hydration process, carried out by the method of immersion in distilled water ultrathermostatic bath was given an empirical model to determine the grain hydration kinetics, enabling the evaluation of different grain moisture in the drying process. The drying kinetics was held in dryer fixed bench bed, experiments were conducted in order to examine the influence of three variables in the process: air temperature, air velocity and initial moisture content of the grain. The experiments were designed through a complete experimental design with three variables and two levels. The considered response variable was the elapsed time from the beginning of the process until no more significant weight change of the sample considered in this work as the drying time. Statistical analysis was performed to verify the effect of each variable in the process, using a p-value of 0.05. An empirical model was found and validated by the model coefficient of determination (R^2). The experimental data of drying kinetics were fitted to literature models: Newton, Newton modified, modified Newton-power and the Forward. In the drying process was implemented a control loop PID (Proportional Integrative Derivative), tuning the parameters of the controller is given by Ziegler method and Nichols and Cohen and Coon, both open loop, by analyzing the curve reaction. The refinement of the adjustment was made manually. To evaluate the performance of controllers IAE criteria were used (error module Integral) and ISE (Integral errors squared). The hygroscopic behavior analysis showed that temperature is a parameter which has a significant influence in the studied groups. The equilibrium moisture content showed typical behavior, decreasing with increasing air temperature. The lowest equilibrium moisture content was achieved with a temperature of 60 ° C, the highest temperature among the three analyzed. The model modified Smith was the best described the sorption isotherms for the three temperatures investigated. The best conditions for crambe moisture removal were achieved at 60 ° C. A statistical analysis of experimental data was performed, demonstrating a negative influence of

temperature on drying time, and positive influence of the air speed, the variable initial grain moisture had no significant effect. The empirical model was found to be a model of 1st order, which represents 72% of the data. The modified Newton model - Power 2 with two parameters set was the best described the drying kinetics for the three evaluated temperatures. Has implemented an automatic control system PID, to tune the controller parameters were used methods of Ziegler & Nichols and Cohen & Coon open loop through performance analysis parameters found by Cohen & Coon method achieved better results . an attempt to improve the performance was carried out through a manual fine-tuning, but there was no improvement. The controller implemented kept the air temperature close to the setpoint established in the presence of disturbances, and thus can ensure drying process in a more standardized product, better quality and efficiency.

1 INTRODUÇÃO

A necessidade por fontes de energia renováveis tem se tornado iminente, com o mundo enfrentando uma crise energética de alta repercussão, as pesquisas por fontes alternativas têm sido ainda mais relevantes. Outro fator determinante é a necessidade de mitigação dos impactos ambientais causados pelos combustíveis fósseis. Diante desse cenário, as nações têm investido em pesquisas em busca de potenciais matérias-primas para produção de biodiesel. Esse combustível pode ser produzido, principalmente, a partir de gorduras animais e sementes oleaginosas.

Em 2004, o governo nacional lançou o Programa Nacional de Produção e uso do Biodiesel (PNPB) com objetivo de introduzir o biodiesel na matriz energética brasileira. A mistura de biodiesel ao diesel fóssil teve início em dezembro de 2004, e em janeiro de 2008, entrou em vigor a mistura legalmente obrigatória de 2% (B2), em todo o território nacional. Mais a frente esse percentual foi ampliado até atingir 5% (B5) em janeiro de 2010. Desde o lançamento do PNPB até o final de 2011, o Brasil produziu 8,3 bilhões de litros de biodiesel. Por fim, em 2014 foi sancionada a Lei nº 13.033, de 24 de setembro de 2014, que tornou obrigatório o percentual mínimo de 7% de biodiesel no diesel, (BRASIL, 2014).

Nesse cenário de contínuo aumento na demanda por biodiesel o Brasil tem apresentado grande potencial de produção a partir de oleaginosas. A soja, o milho, o girassol e a canola, oleaginosas já cultivadas no país, são potenciais fontes de biomassa para produção de biocombustíveis, porém existe uma forte vertente político-econômica que não incentiva culturas de fins alimentares para produção de biodiesel, uma vez que pode ocasionar a inflação do preço dos alimentos (SIMIONI, 2006). Dessa forma dá-se a importância na busca por matérias-primas que não concorrem com a produção de alimentos.

Entre as diversas culturas pesquisadas na atualidade, o crambe (*Crambe abyssinica*) tem destaque especial. De cultivo originário da região mediterrânea, o crambe é uma planta da família das Brassicaceae e entre suas características é possível destacar seu crescimento e produção em ciclo curto, variando entre 90 a 100 dias, elevado teor de óleo, além da alta resistência a alterações climáticas,

sendo possível cultivá-la em climas secos e frio intenso, sobrevivendo às geadas (OPLINGER *et al.*, 1991). Devido a essa característica peculiar o crambe é uma alternativa viável para o plantio da safrinha, realizada após a colheita da soja.

Além disso, é possível também destacar a possibilidade de utilizar o maquinário já empregado em outras culturas para o cultivo do crambe, tornando o processo totalmente mecanizado (PITOL *et al.*, 2010).

JASPER *et al.* (2010) compararam o custo de produção do crambe com outras oleaginosas (girassol, canola e soja) em sistema de plantio direto, e concluíram ao final do estudo que o custo de implantação e condução do crambe por hectare foi o menor entre as culturas estudadas.

Com relevante destaque como potencial matéria-prima para produção de combustível renovável, é imprescindível que estudos sejam feitos para garantir bom desempenho dessa cultura no campo, assim como a manutenção da qualidade da semente e do óleo. Sabe-se que a qualidade da semente é um resultado de diversos fatores que precisam ser controlados, tais como características do plantio e colheita, processo de secagem, beneficiamento, condições de armazenagem, entre outros.

A falha na armazenagem pode acarretar em uma deterioração precoce da semente, causando dano irreversível, e a secagem é um dos fatores de maior influência na manutenção da qualidade dos grãos durante o armazenamento. Para isso, o conhecimento das condições ideais de temperatura e de teor de água dos grãos se torna fundamental (ARAÚJO, 2004).

A secagem é uma das etapas no processamento de sementes que tem como objetivo remover o excesso de água contido no grão através da transferência simultânea de calor e massa entre o ar de secagem e a semente. Na secagem de grão, sementes e plantas medicinais as variáveis: temperatura, velocidade do ar, umidade relativa do ar dentro e fora do sistema de secagem, são os principais fatores que influenciam o processo (BROOKER *et al.*, 1992).

A umidade final do produto apresenta-se como o elemento de maior importância do processo industrial de secagem, onde as propriedades deste e o consumo de energia estão intimamente vinculados a esta variável (ABITANTE, 2007).

Os equipamentos utilizados para realização desse processo são chamados de secadores, e podem ser projetados de diferentes formas com particularidades de escoamento do ar, formas de operação, posicionamento do produto, entre outros. O objetivo é maximizar a qualidade do produto e melhorar a eficiência do processo, inclusive a eficiência energética. MUJUMDAR (1987) afirma que o objetivo de qualquer processo de secagem industrial é obter um produto com qualidade a um custo mínimo de processamento.

O processo de secagem há muito tempo tem passado por um processo de automatização, sendo que o controle manual do processo é, na maioria das vezes, inviável e ineficaz, pois não pode garantir a padronização do processo. LIMA (2004) afirma que controlar os processos é uma forma para melhorar a qualidade do produto, sua produção e também o custo, e o estudo do controle de um processo permite obter um ponto ótimo de desempenho.

O ajuste de forma manual além de estar suscetível ao erro humano, exige experiência do operador para controlar as variáveis, tornando o processo dependente do conhecimento operacional e possibilitando a existência de variações inerentes ao controle humano.

O processo de secagem apresenta um cenário de alta complexidade, uma vez que envolve transferência de massa e energia. Diversas variáveis precisam ser controladas, entre elas a temperatura do ar, a ventilação do ar e umidade do ambiente. O controle automático do processo é imprescindível para garantir maior eficiência dos recursos, a padronização do produto, e conseqüentemente a qualidade do produto final. O sistema de controle deve possuir alguns requisitos básicos para ser implementado, como por exemplo, ser estável, possuir velocidade de resposta razoavelmente rápida e ser capaz de reduzir erros a zero ou a valores pequenos toleráveis (OGATA, 2007).

Para realizar um estudo de secagem robusto se faz necessário conhecer as isotermas de equilíbrio do grão, as variáveis que influenciam no processo, assim como seus efeitos na variável de controle. E, por fim, fazer entender o comportamento do processo sob controle, implementando o controle automático do secador, avaliando e parametrizando os sistemas de controle no processo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Obter dados experimentais da cinética de secagem de Crambe em um secador de leito fixo, realizar a modelagem matemática do processo de secagem, obter dados de equilíbrio higroscópico das sementes de Crambe e realizar a modelagem matemática, implementar e avaliar sistemas de controle do processo de secagem.

1.1.2 Objetivos específicos

- Obter e modelar as isotermas de sorção da água no Crambe pelo método estático-gravimétrico;
- Delinear um conjunto de experimentos a serem realizados a fim de se obter um conjunto de dados experimentais suficientes para o estudo da cinética de secagem;
- Avaliar os efeitos temperatura e da velocidade do ar na secagem do Crambe em secador de bancada de leito fixo;
- Obter a modelagem matemática da cinética de secagem do Crambe em secador de leito fixo.
- Implementar e avaliar sistema de controle PID (Proporcional, Integrativo, Derivativo) do processo de secagem em secador de leito fixo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Crambe (*Crambe abyssinica*)

O crambe (*Crambe Abyssinica*) é um membro da família *Brassicaceae*, com características próximas à canola. O gênero crambe contém cerca de trinta espécies, distribuídas principalmente na região do Mediterrâneo (DESAI, 2004).

Planta herbácea anual (Figura 1), apresenta em torno de 1 (um) metro de altura, ramifica-se próxima ao solo para formar vários galhos, os quais também se ramificam formando galhos terciários. Suas folhas tem forma oval e são assimétricas, as flores são brancas e produzem alta quantidade de sementes (OPLINGER *et al.*, 1991).

A lâmina foliar possui aproximadamente 10 cm de comprimento e 7,6 cm de largura, com superfície lisa. O pecíolo possui aproximadamente 20 cm de comprimento e é pubescente, ou seja, coberto por pequenos pêlos macios (OPLINGER *et al.*, 1991).



Figura 1 Crambe Abyssinica (Fonte: Klorane, 2015)

Seu fruto é uma silíquia de forma esférica, distribuídos por todos os galhos da planta. Inicialmente apresenta coloração verde (Figura 2), tornando-se amarela com a maturidade (Figura 3). Cada fruto possui uma semente de cor verde ou marrom esverdeado com diâmetro que varia entre 0,8 a 2,5 mm (DESAI, 2004). A semente possui cerca de 38 % de óleo, o qual é constituído por até 57 % de ácido erúcido, componente que permite utilizá-lo na produção de diferentes produtos industrializados (PITOL *et al.*, 2010), e torna-o impróprio para o consumo humano. (LAZZERI *et al.*, 1997)



Figura 2 *Crambe Abyssinica* coloração verde (Fonte: CASTRO, 2012)



Figura 3 *Crambe Abyssinica* coloração amarelada (Fonte: CASTRO, 2012)

O Crambe foi adaptado das regiões secas e frias do Mediterrâneo, portanto é uma cultura de inverno. Suas raízes podem chegar a 15 cm de profundidade, portanto pode enfrentar grades períodos de seca. Apresenta grande tolerância a frios rigorosos, sobrevivendo inclusive à geadas, sendo uma alternativa à "safrinha", plantada após a colheita da soja (DUKE, 1983).

Outra característica de destaque é o curto ciclo, que varia entre 90 a 100 dias, sendo o período de maturação uniforme entre a cultura. (DUKE, 1983; OPLINGER *et al.*, 1991)

Há de se destacar ainda que a colheita do Crambe é mecanizada, sendo possível empregar os mesmos equipamentos das culturas tradicionais, portanto, dispensando investimento em novos maquinários (PANNO e PRIOR, 2009; PITOL *et al.*, 2010)

2.1.1 Aplicações do Crambe

Devido ao alto teor de ácido erúxico, o óleo de crambe tem bastante aplicação na área industrial, como lubrificante, ingrediente para fabricação da borracha sintética, filmes, plásticos, nylon (DOLACK, 1996).

GONÇALVES JR. *et al.* (2013) pesquisaram o Crambe como adsorvente para remoção de metais tóxicos do cádmio, chumbo e cromo de soluções contaminadas. De acordo com os resultados obtidos, o adsorvente foi eficaz na remoção dos metais avaliados em soluções aquosas, sendo possível o seu emprego como um material alternativo para a adsorção de metais.

O farelo de crambe é o subproduto gerado a partir da extração do óleo da semente. PRETTO *et al.* (2014) estudaram o farelo de crambe como uma potencial fonte proteica na nutrição animal, e concluíram que a retirada de compostos antinutrientes existentes no farelo melhora o valor nutricional quando fizer parte da alimentação de animais monogástricos.

A utilização do farelo de crambe como suplemento nutricional de animais ruminantes foi comparada com farelo de soja e de girassol, e os resultados obtidos demonstram equivalência nutricional. (ANDERSON *et al.*, 2000)

Os pesquisadores MENDONÇA *et al.* (2015) também estudaram a inclusão de subproduto do crambe na nutrição animal e ao final da pesquisa concluíram que a torta de crambe pode ser utilizada em até 20% de inclusão na matéria seca de dietas de bovinos de corte em confinamento.

CANOVA *et al.* (2015), estudaram a inserção da torta de crambe na alimentação de cordeiros, e o resultado confirmou que a torta de crambe pode ser utilizada como alimentação pois apresentou resultado similar com a proteína do farelo de soja.

ROSA *et al.* (2014) fizeram um estudo comparativo entre o consumo do diesel e do biodiesel de crambe e sua eficiência de conversão, concluíram que estatisticamente não foram observadas diferenças de eficiência entre os dois combustíveis.

2.2 Secagem

A secagem é uma operação na qual é empregado calor sob condições controladas com finalidade de eliminar grande parte de água livre presente no material através da evaporação (BROOKER *et al.*, 2004).

É possível classificar a secagem em dois métodos básicos: secagem natural, através do sol ou vento; e secagem artificial, na qual é necessário fornecer uma energia, diferente da solar (PARK *et al.*, 2001).

Segundo BROOKER *et al.* (2004) para que ocorra a secagem, o sistema precisa estar a uma temperatura acima da temperatura do sólido úmido, possibilitando a existência de um fluxo de calor e permitindo que a umidade seja vaporizada.

Quando o ar quente escoa sobre um material úmido, o calor é transferido para a superfície do material, ocasionando na evaporação da água do material. O vapor de água é difundido através de uma camada limite sendo levado pela corrente de ar. Dessa forma se cria uma região de baixa pressão de vapor de água na superfície do material e uma diferença de pressão de vapor de água é estabelecida entre o interior úmido do material e o ar seco (FELLOWS, 1988).

LUIZ (2012) afirma que o processo de secagem é uma das operações unitárias mais antigas que se tem conhecimento, e essa operação tem como objetivos básicos: a conservação para preservar da deterioração, a conservação das propriedades físico-químicas durante a estocagem e armazenamento, e também a redução de custos com transporte e armazenamento.

LUIZ (2012) ainda aponta as principais vantagens do processo de secagem em alimentos:

- Preservação e garantia da conservação dos alimentos;
- Aumento da vida de prateleira;
- Agregação de valor ao produto;
- Facilidade na conservação do produto;
- Fornecimento de produto com alta qualidade;
- Proteção contra degradação enzimática e oxidativa;
- Economia de energia por não necessitar de refrigeração e a disponibilidade do produto durante qualquer época do ano;
- Redução do seu peso, gerando economia no custo de embalagens, no armazenamento e no transporte do produto;

Nos grãos, o processo de secagem tem a finalidade principal de reduzir a atividade de água do produto, a fim de minimizar a atividade enzimática de fungos e microorganismos que causam a deterioração dos grãos e do óleo contido neles. Além disso, também contribui para a redução de infestação por insetos, que pode levar à perda dos produtos. E também a redução da massa obtida pelo processo de secagem acaba sendo uma grande vantagem, por reduzir custos de transporte e armazenamento dos grãos (PARK *et al.*, 2007a).

Grãos que apresentam elevado conteúdo de óleo em sua composição, sofrem o processo de oxidação de lipídios presentes quando mantido em

condições inapropriadas, tais como: elevado teor de água e elevadas temperaturas. Assim, o armazenamento dos grãos oleaginosos deve ser conduzido de forma adequada, visando minimizar processos deteriorativos que comprometam a qualidade dos grãos e do óleo (ARAÚJO, 2004).

Muitas variáveis fazem parte do processo de secagem e precisam ser consideradas: temperatura do ar, vazão do ar, umidade inicial do produto, umidade final do produto, coeficiente de difusão de massa, a área relativa de troca, calor específico, variação de volume, umidade de equilíbrio, alteração da propriedades termo-físicas, espessura do material, pressão de vapor do ar de secagem, temperatura e velocidade de difusão da água no produto, dentre outras (LUIZ, 2012).

Segundo ALONSO (2001) o movimento de água do interior do material até à superfície é analisado por mecanismos de transferência de massa, que irá indicar a dificuldade de secagem nos materiais. Durante a secagem, para que haja efetivamente evaporação de água da superfície do material ao ambiente, é necessário que a água do interior do sólido seja transportada até a sua superfície.

ALONSO (2001) destaca os mecanismos de transferência mais importantes:

- difusão líquida: ocorre devido à existência do gradiente de concentração;
- difusão de vapor: ocorre devido ao gradiente de pressão de vapor, causado pelo gradiente de temperatura;
- escoamento de líquido e de vapor: ocorrem devido à diferença de pressão externa, à concentração, à capilaridade e à alta temperatura.

A intensidade da secagem tem grande influência dos parâmetros do processo, tais como: temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do ar e também a geometria da partícula (STRUMILLO e KUDRA, 1986). A curva de secagem mostra a variação do conteúdo inicial e final (equilíbrio) de umidade do material em função do tempo, que depende da relação da água com a estrutura sólida e do transporte da água do interior do material até a sua superfície. Este fator não pode ser generalizado para todos os materiais biológicos, pois estes possuem características próprias e propriedades que podem sofrer importantes alterações durante a secagem (PARK *et al.*, 2001).

As características específicas de cada produto, associadas às propriedades do ar de secagem e ao meio de transferência de calor adotado, determinam diferentes condições de secagem. Porém, a transferência de calor e massa entre o ar de secagem e o produto é um fenômeno comum a qualquer condição de secagem. A taxa de secagem pode ser afetada tanto por condições externas como internas. Além da remoção da umidade por evaporação ser essencial para o processo de secagem, a migração de umidade dentro do material úmido também deve ser considerada, através da camada limite (PARK *et al.*, 2001).

2.2.1 Curvas de secagem

De acordo com PARK *et al.* (2007a) o processo de secagem é representado pela curva de secagem do material, que apresenta a umidade do material em função do tempo, e a curva de cinética de secagem que mostra a taxa de secagem em função da umidade do material (Figura 4).

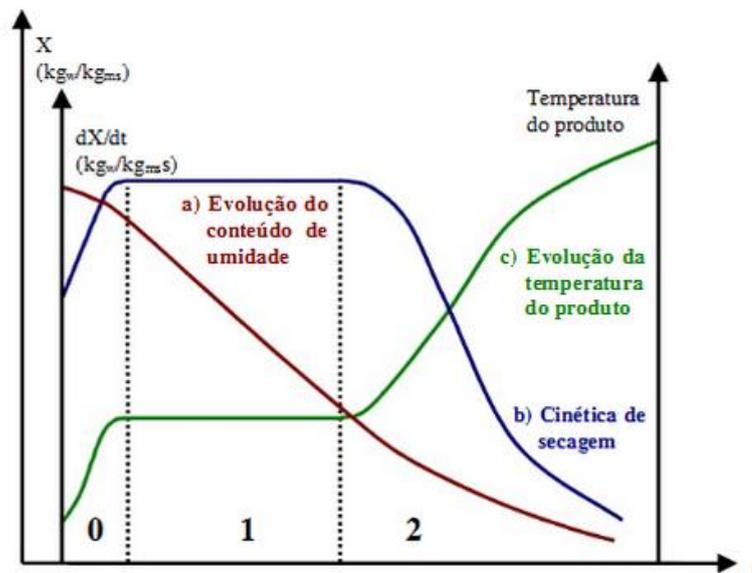


Figura 4 Curva de Secagem [Fonte: adaptado de PARK, *et al.* (2007a)]

A curva (a) mostra a evolução do conteúdo de umidade, representando a redução do teor de água do produto durante o processo em relação à evolução do tempo de secagem. Esta curva é obtida pesando o produto durante a operação numa determinada condição de secagem (PARK, *et al.* 2007a).

A curva **(b)** representa a cinética de secagem, demonstrando a velocidade (taxa) de secagem do produto em relação à evolução do tempo (PARK, *et al.* 2007a).

A curva de velocidade de secagem (curva **(b)**) resulta da derivação da curva de secagem em relação à quantidade de umidade (curva **(a)**), e pode ser dividida em período de taxa constante de secagem e período de taxa decrescente de secagem:

I. Período de taxa constante de secagem: é o representado pelo segmento "1". No período de taxa constante, a superfície do material é mantida num nível de umidade tal que a secagem ocorre como se fosse água pura evaporando. Quando o sólido é poroso, a maioria da água evaporada no período de taxa constante é proveniente do interior do sólido. Este período só continua desde que a água seja provida à superfície tão rápido quanto é evaporada (PARK *et al.*, 2007a).

II. Período de Taxa Decrescente de Secagem: Este período compreende o segmento "2". Quando a quantidade de água na superfície do produto começa a diminuir há a redução progressiva da pressão parcial de vapor da água na superfície e, conseqüentemente, a velocidade de secagem também diminui, até que, ao final desse período, a umidade do sólido está em equilíbrio com a umidade do ar e a taxa de secagem torna-se nula (PARK *et al.*, 2007a).

A curva **(c)** representa a variação da temperatura do produto durante a secagemem relação à evolução do tempo, ou seja, é a curva obtida medindo a temperatura do produto durante a secagem (PARK *et al.*, 2007a).

O movimento interno da umidade no material sólido é função da natureza física do sólido, sua temperatura e conteúdo de umidade. Esse processo manifesta-se sob um comportamento típico, que pode ser observado na curva de secagem. Cada sólido possui uma curva característica (PARK *et al.*, 2007a).

2.2.2 Tipos de Secadores

A investigação da secagem e o cálculo das dimensões do equipamento de secagem devem levar em conta diversos problemas nas áreas de mecânica dos

fluidos, da química das superfícies e da estrutura dos sólidos, além dos problemas de velocidade de transferência de energia (FOUST *et al.* 1982).

Em muitos casos, o projeto perfeitamente cotado do secador é impossível, pois estes fenômenos físico-químicos são muito complicados e não completamente compreendidos (FOUST *et al.*, 1982). De acordo com PIAIA (2009) para modelar o funcionamento de secadores, os fatores significativos que devem ser considerado são as propriedades físicas dos sólidos: tamanho, forma, densidade e teor de umidade da partícula; e as condições de operação: fluxo e temperatura de alimentação, temperatura, velocidade e umidade.

DIAZ (2009) afirma que a primeira geração de secadores industriais utilizados foram do tipo de bandejas, os de túnel e os de rolos de secagem. Nesses equipamentos o ar quente fluía sobre uma extensa área do produto e era usado para remover a água superficial, sendo esses secadores muito úteis na desidratação de grãos. Esses secadores ainda são empregados tanto em processos contínuos quanto em bateladas.

Em seguida uma nova geração de secadores foi composta pelos atomizadores (spray-dryers), desenvolvidos para a secagem de soluções. Esse método de secagem é conhecido como secagem instantânea, pois utiliza tempos curtos de processo quando comparado aos outros tipos de secadores. Atualmente é aplicado em larga escala em produtos alimentícios, farmacêuticos e biológicos (DIAZ, 2009).

A terceira geração de secadores fez uso do método de liofilização, desenvolvida para superar danos estruturais e perdas de compostos voláteis, como aroma e sabor. E, por fim, secadores pertencentes à última geração em tecnologia de secagem, empregaram métodos de alto-vácuo, ultra-temperatura, extrusão, leiteo fluidizado, micro-ondas ou radiofrequência (DIAZ, 2009).

Cada secador atende às diferentes necessidades de processo, que, em geral estão intrinsecamente vinculadas ao produto. O conhecimento das propriedades do material a ser seco é a primeira exigência para dimensionamento de um secador (PARK *et al.*, 2007b).

Segundo BRUIN e LUYBEN (1980), o custo de energia seria o principal constituinte do custo total de secagem, pois a desidratação de produtos é um processo que demanda intensa energia, sendo assim, a escolha do secador também deve se ater à sua eficiência energética.

Para o projeto apropriado de um secador são necessários o conhecimento do comportamento dos secadores e sua adequação aos processos, além do conhecimento das características do produto a ser seco (ALONSO, 2001). Em geral, os processos estão diretamente relacionados ao produto.

Cada tipo de secador operando de um modo diferente atende às exigências de processo de diferentes produtos (ALONSO, 2001). Para cada produto é possível selecionar um secador mais adequado. ALONSO (2001) propôs uma tabela que relaciona os produtos com seus secadores mais adequados, conforme exemplificada na Tabela 1.

Tabela 1 – Relação dos produtos com seus secadores mais adequados

Secador	Filme	Granulares	Lama	Líquido	Lodo ou Pasta	Pasta Compacta	Pré-formados	Sólido Fibroso
Agitado		x	x	x	x			
Bandeja	x	x			x	x	x	x
Com ar Circulado		x					x	x
Esteira	x	x	x		x	x	x	
Fluidizado		x			x		x	x
Pneumático		x			x		x	x
Rotativo Direto		x						x
Rotativo Indireto		x				x		x
Spray			x	x	x			
Tambor	x		x	x	x			

Fonte: Adaptado de Alonso (2001)

Os secadores são classificados de diversas formas, entre elas o modo de operação e condições de serviço. O método de operação está alinhado à forma de alimentação, podendo ser contínuo ou em bateladas. Uma outra classificação proposta por NONHEBEL e MOSS (1971) separa os tipos de secadores de acordo com o método de transferência de calor: convecção ou condução. BAKER (1997) acrescenta uma segmentação dos secadores industriais relacionada à forma de acomodação do material no interior do equipamento, podendo ser por camadas ou disperso. Além dos secadores por condução e convecção, é possível considerar na classificação outros tipos especiais de aquecimento, como a radiação solar e micro-ondas (BAKER, 1997).

PARK (2007b) propôs uma classificação dos secadores conforme o método de operação, demonstrado na Figura 5.

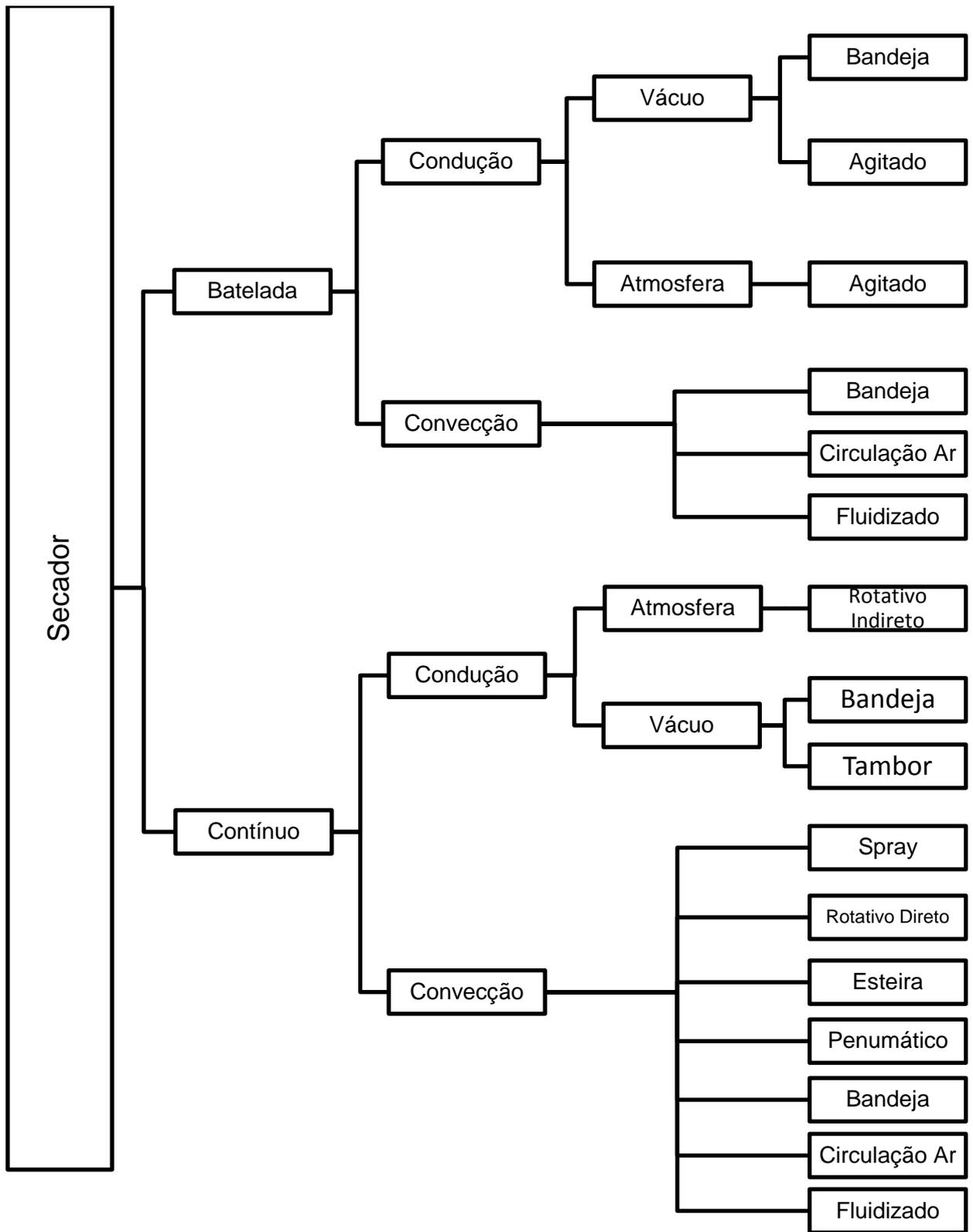


Figura 5 Classificação de secadores segundo o modo de operação. [Fonte: Adaptado de PARK (2007b)]

2.2.3 Trabalhos realizados com secagem de Crambe

COSTA *et al.* (2011) realizaram a secagem de sementes de crambe em diferentes condições de ar, e ajustaram modelos matemáticos ao processo. A secagem do produto foi realizada sob condições controladas nas temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70 °C e umidades relativas de 37,4; 22,3; 14,0; 8,3 e 5,1%, respectivamente. Concluíram com o estudo que o aumento da temperatura do ar ocasiona a redução no tempo de secagem das sementes de crambe. O modelo de Wang e Singh apresentou o melhor ajuste nas diferentes condições de secagem.

FARIA *et al.* (2012) estudaram a cinética de secagem de sementes de crambe e avaliaram o ajuste de nove modelos matemáticos em tratamentos constituídos de cinco teores de água (0,11; 0,13; 0,17; 0,25 e 0,28 b.s.) e cinco temperaturas do ar de secagem (30; 40; 50; 60 e 70 °C). Para verificação do ajuste dos modelos estudados fez-se análise de regressão não-linear, pelo método Quasi-Newton. Os autores concluíram que o modelo da aproximação por difusão foi o que melhor se ajustou aos dados de secagem obtidos e o aumento da temperatura de secagem promove maior taxa de remoção da água do produto.

OLIVA *et al.* (2012) verificaram o efeito imediato da secagem natural e artificial (com ar aquecido e não aquecido) sobre a germinação de sementes de crambe. Os tratamentos realizados foram: secagem das sementes à sombra com ventilação natural, secagem artificial com ar aquecido, secagem artificial com ar não aquecido, secagem em terreiro e secagem na planta. De acordo com os resultados, os métodos de secagem estudados não causaram efeito imediato na qualidade das sementes de crambe.

FARIA *et al.* (2014) avaliaram a qualidade fisiológica de sementes de crambe submetidas à secagem. Para tanto, foram avaliadas sementes com cinco teores de água (10; 12; 15; 20; 22% b.u), submetidas a cinco temperaturas de secagem do ar (30; 40; 50; 60 e 70 °C). Os testes utilizados para análise foram: teste de germinação, primeira contagem da germinação, comprimento de plântulas e condutividade elétrica. Concluíram que a temperatura entre 40 a 60 °C propiciou melhor desempenho fisiológico nos testes de viabilidade e vigor de sementes de crambe. A temperatura de 70 °C foi prejudicial ao desempenho fisiológico das sementes de crambe. Teores de água acima de 12% b.u. sob

faixas de temperaturas entre 40 a 60 °C, podem interferir positivamente na quebra de dormência das sementes de crambe.

FURQUIN *et al.* (2010) avaliaram a qualidade do óleo durante a secagem das sementes de crambe. O teor de óleo observado não foi afetado significativamente pelas condições de secagem, encontrando-se entre 29,92 a 36,01%. Por meio dos resultados analisados, concluíram que a temperatura de secagem das sementes de crambe não afeta a qualidade do óleo.

SILVA (2013) analisou os efeitos dos sistemas de secagem de crambe na qualidade dos grãos e também do óleo para produção de biodiesel. Cinco métodos de secagem foram avaliados, os resultados demonstraram que os métodos de secagem influenciaram o rendimento do óleo, no entanto não afetaram significativamente sua qualidade.

2.3 Hidratação

A reidratação de materiais é um processo complexo que tem como objetivo reconstituir as características originais do produto, quando submetido ao contato com uma fase líquida (BILBAO- SÁINZ *et al.*, 2005). A cinética de hidratação tem sido amplamente caracterizada por produtos como grãos de cereais e leguminosas (ABU-GHANNAM e MCKENNA, 1997).

O processo de hidratação de grãos está presente na caracterização da qualidade fisiológica do grão, na extração de algum constituinte de interesse, no cozimento, na redução ou eliminação de fatores antinutricionais existentes nos grãos e na melhora da digestibilidade (OMOTO *et al.*, 2009). Também tem sido uma etapa importante em estudos de secagem em escala de bancada (BARROZO *et al.*, 2000) assim como em estudo da capacidade germinativa dos grãos (BECKERT *et al.*, 2000).

A hidratação tem sido entendida como um processo físico diretamente relacionado com as características de permeabilidade do envoltório (pericarpo) e as propriedades dos colóides constituintes dos grãos (WOODSTOCK, 1988).

A taxa de absorção de água depende da diferença entre o teor de água de saturação e o teor de água em um determinado tempo, chamada força motriz

(RESIO *et al.*, 2005). Durante a embebição, a água é difundida para o interior da semente, promovendo o aumento do seu volume, sendo influenciada, principalmente, pela temperatura da solução de embebição (BAYRAM *et al.*, 2004). A hidratação das sementes é influenciada por três fatores principais: natureza do material, diferença do potencial hídrico entre a semente e o meio, e temperatura do ambiente. Estes fatores influenciam, principalmente, a velocidade de embebição (BEWLEY e BLACK, 1994). Apesar de a temperatura influenciar fortemente na germinação das sementes, o comportamento varia entre as espécies, não havendo uma temperatura ótima e uniforme para todas. A faixa de 20°C a 30°C tem sido adequada para germinação de um grande número de espécies subtropicais e tropicais (BORGES e RENA, 1993).

COUTINHO *et al.*, (2005) afirmam que a umidificação pode ser realizada de diversas maneiras, destacando-se: imersão de grãos em água líquida, exposição dos grãos a uma atmosfera de vapor de água saturado, e percolação de um leito de grãos por ar úmido.

Estudos de hidratação têm frequentemente utilizados métodos de imersão em água destilada (RESENDE e CORRÊA, 2007; FRACASSO, 2011; COUTINHO, 2005). RESENDE e CORRÊA (2007) pesquisaram a hidratação de feijão, e utilizaram o método de embebição em água destilada em diferentes temperaturas e as amostras eram retiradas da imersão e deixadas sobre papel toalha para que a água superficial fosse retirada. FRACASSO (2011) estudou a cinética de hidratação da soja, e para isso fez a embebição da soja em bequer com uma solução de benzoato de sódio 1 g/L, em água destilada, os ensaios foram realizados em banho termostático com temperatura controlada.

2.3.1 Modelagem da cinética de hidratação de grãos

A umidificação depende de variáveis, como a temperatura e o teor de água inicial do grão. Dados de variação do teor de água de grãos em função do tempo podem ser empregados para descrever o comportamento dos dados de hidratação e interpretá-los por intermédio de dois tipos básicos de modelos: empíricos e fenomenológicos (LISBÔA *et al.*, 2015).

A modelagem matemática permite prever e simular o comportamento de determinado parâmetro e processos. A utilização de modelos matemáticos para a hidratação de grãos é importante, pois estabelece a relação entre a umidade absorvida pelos grãos em função do tempo (LISBÔA *et al.*, 2015).

Na hidratação de grãos, modelos fenomenológicos são obtidos por balanços de massa em um elemento diferencial do volume do grão (CRANK, 1975). HSU (1983) utilizou modelos fenomenológicos para a análise do fenômeno de hidratação. Seu modelo tem sido utilizado em diversos trabalhos para prever o fenômeno de hidratação de grãos.

O modelo de difusão líquida é o mais comum entre os modelos teóricos aplicados ao processo de hidratação. Tal modelo é aplicado em processos de secagem e de hidratação de sólidos considerando-se, como mecanismo principal, a difusão líquida baseada na Lei de Fick, que estabelece uma relação entre as taxas de variação temporal e espacial da concentração de água, por meio do coeficiente de difusão (LISBÔA *et al.*, 2015).

Os modelos empíricos geralmente são obtidos a partir de simples correlações matemáticas dos dados experimentais. Estes modelos são freqüentemente preferidos frente aos modelos fundamentais devido à facilidade nos cálculos e na interpretação (LISBÔA *et al.* 2015).

PELEG (1988) propôs um modelo empírico (Equação 1) para descrever a sorção de umidade, obtendo elevados coeficientes de correlação. Esse modelo tem sido utilizado por diversos pesquisadores para representação desse fenômeno. Segundo FERRAZ (2008), o modelo de Peleg avalia os dados através da relação entre o inverso da razão da umidade em relação ao tempo, em horas.

$$X(t) = X_0 + \frac{t}{(K_1 + K_2 t)} \quad (1)$$

Onde:

$X(t)$ – teor de água no tempo t , (decimal b.s.);

X_0 – teor de água inicial, (decimal b.s.);

t – Tempo de hidratação

K_1 - taxa constante de Peleg, (h decimal b.s.⁻¹);

K_2 – capacidade constante de Peleg, (decimal b.s.⁻¹).

O modelo de Peleg é um modelo de três parâmetros, sendo K_2 inversamente relacionado à umidade de equilíbrio e K_1 inversamente relacionado à taxa inicial de absorção de água (GOWEN *et al.*, 2007). A equação é uma soma quando o processo envolve absorção, e uma subtração quando o processo envolve dessorção (FERRAZ, 2008).

2.3.2 Trabalhos realizados com hidratação de grãos

OMOTO *et al.* (2009) desenvolveram um modelo matemático para estimar a concentração de água em grãos de ervilha durante sua hidratação, obtido a partir de um balanço de massa em regime transiente, utilizando-se dados experimentais de hidratação de grãos de ervilha a 20, 30, 40, 50 e 60 °C.

COUTINHO *et al.* (2005) desenvolveram um modelo fenomenológico de parâmetros concentrados para a hidratação de grãos de soja, obtido a partir de um balanço de massa em regime transiente nos grãos, levando em consideração a variação do diâmetro destes ao longo do processo. Os resultados das simulações deste modelo foram comparados com as previsões de modelos empíricos encontrados em literatura. Tanto o modelo fenomenológico quanto os modelos empíricos foram validados frente a dados experimentais de hidratação de grãos de soja, obtidos no trabalho nas temperaturas de 10, 20, 30, 42 e 49°C.

LISBÔA *et al.* (2015) estudaram o fenômeno de hidratação em grãos de alpiste em diferentes temperaturas. Foram utilizados grãos secos de alpiste, embebidos em água destilada, nas temperaturas de 10, 25 e 45 °C. O aumento da temperatura resultou em aumento da taxa de absorção de água e o modelo de Peleg se ajustou aos dados experimentais.

ARAGÃO *et al.* (1999) estudou os efeitos da hidratação, seguida da secagem, na qualidade fisiológica de sementes de feijão. As sementes foram submetidas a tratamentos de hidratação por períodos de 0, 6, 12 e 24 horas, as quais atingiram quatro teores de água. Após os tratamentos de hidratação, as sementes foram secadas até a umidade inicial. As avaliações de germinação e vigor indicaram que o tratamento 24 de horas de hidratação não diferiu estatisticamente entre si.

RESENDE e CORREA (2007) estimaram e avaliaram as curvas de hidratação do feijão, ajustaram o modelo de Peleg aos valores experimentais e determinaram o coeficiente de difusão na hidratação em diversas temperaturas. Grãos de feijão foram submetidos à embebição em água destilada nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50°C. Concluíram que a taxa de absorção de água do feijão aumenta com a elevação da temperatura de embebição, sendo o modelo de Peleg capaz de representar a cinética do fenômeno.

BOTELHO *et al.* (2010) estudaram o fenômeno de hidratação em grãos de arroz para diferentes temperaturas. Foram utilizados grãos de arroz em casca embebidos em água destilada nas temperaturas de 35, 45, 55 e 75 °C. O aumento da temperatura resultou em aumento da taxa de absorção de água e o modelo de Peleg ajustou-se satisfatoriamente aos dados experimentais.

2.4 Isotermas de sorção

As isotermas de sorção de água relacionam a umidade de equilíbrio do sólido em função da umidade relativa do ar a uma dada temperatura. Elas podem ser de sorção ou de dessorção, caso a determinação da umidade do produto tenha sido feita ao longo de um processo de umedecimento ou secagem (TEIXEIRA NETO, 1997).

As isotermas de sorção são fundamentais para o projeto de secadores, no armazenamento de grãos e também para o cálculo do calor de dessorção. As sementes cedem ou absorvem água do ar que as envolve. Esta dinâmica de troca hídrica é controlada pela diferença de pressão de vapor da água contida na semente e a pressão de vapor da água dispersa no ar. Quando a pressão da água da superfície da semente se iguala à pressão de vapor do ar ambiente, obtêm-se o equilíbrio higroscópico (NELLIST e HUGUES, 1973)

Para HALL (1980) as curvas de equilíbrio higroscópico são importantes para definir limites de desidratação do produto, estimar as mudanças do teor de água sob determinada condição de temperatura e umidade relativa do ambiente e para definir os teores de água adequados ao início de atividade de micro-organismos, que podem provocar deterioração do produto.

Cada produto apresenta suas próprias isotermas de sorção a diferentes temperaturas. Essa diferença no comportamento se dá pelas particularidades de cada produto, suas propriedades físicas, composição química e o tipo de ligação da água que está presente. (BROOKER *et al.*, 1992)

Segundo BROOKER *et al.* (1992) grãos com elevado teor de óleo adsorvem menor quantidade de água do ambiente do que os grãos com alto teor de amido.

GILES *et al.* (1974) propuseram uma modelagem geral de isotermas de sorção, em que quatro casos particulares são usados como as quatro formas principais de isotermas comumente observados. As isotermas são divididas em quatro classes (C, L, H, e S). LIMOUSIN *et al.* (2007) apresentaram um esquema que demonstra os quatro subgrupos das isotermas de Giles na Figura 6.

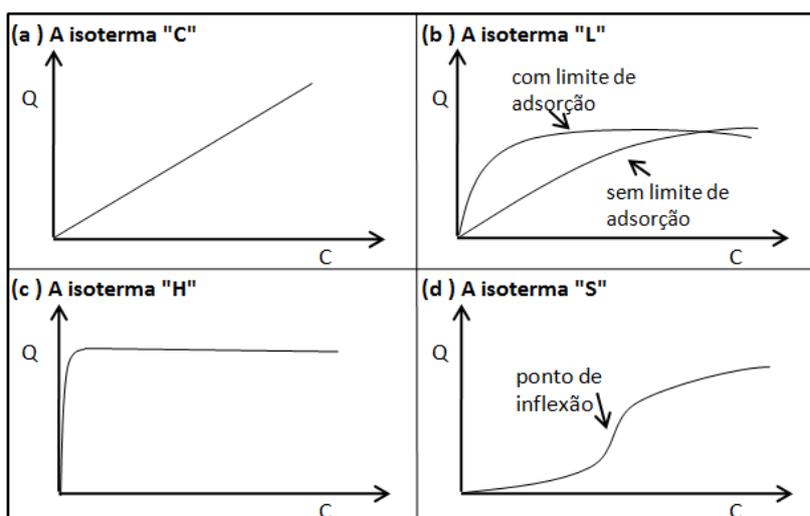


Figura 6 Os quatro tipos principais de isoterma (Adptado de Limousin *et al.* (2007))

No subgrupo "C" a curva é uma linha reta que passa pela origem. Indica que a quantidade adsorvida é proporcional a concentração do fluido, dando à curva um aspecto linear. Caracterizam uma partição entre o soluto e o adsorvente. Essa curva é obtida para partição de um soluto em dois solventes imiscíveis (LIMOUSIN *et al.*, 2007).

As isotermas do subgrupo "L" mostram que quanto mais sítios de sólido são preenchidos, maior é a dificuldade de se preencher sítios vagos por outras moléculas de soluto, nesse caso as moléculas de soluto não são orientadas

verticalmente, ou não existe uma forte interação com o solvente. Possui inclinação não linear e côncava em relação à abscissa (LIMOUSIN *et al.*, 2007).

O subgrupo “H” é considerado apenas um caso particular do subgrupo “L” no qual o declive inicial é muito elevado, porque os compostos exibem às vezes uma alta afinidade com o sólido.

Por fim o subgrupo “S” apresenta isotermas nas quais a curva é sigmoideal e, portanto, tem um ponto de inflexão, a adsorção inicial é baixa e aumenta à medida que o número de moléculas adsorvidas aumenta. Este tipo de isoterma é o resultado de pelo menos dois mecanismos opostos. (LIMOUSIN *et al.*, 2007)

BRUNAUER *et al.* (1938) classificaram as isotermas de sorção (classificação de BET) em cinco tipos gerais descritos por BRUNAUER *et al.* (1940) (Figura 7).

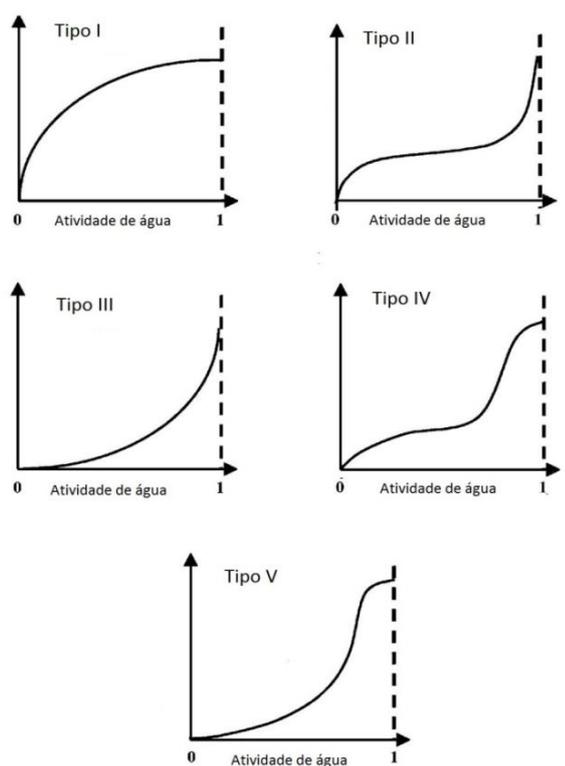


Figura 7 Os cinco Tipos de isotermas de sorção [adaptado de MATHLOUTHI e ROGÉ, 2003]

O tipo I representa a bastante conhecida isoterma de Langmuir, obtidas pela adsorção monomolecular de gás por sólidos porosos com um volume finito de espaços vazios, detém grande quantidade de água com baixa atividade de água. O tipo II é a isoterma sigmoideal, apresenta uma estrutura em forma de S,

obtida em produtos solúveis e mostra uma tendência assintótica conforme a atividade de água tende para 1. O tipo III, conhecida como a isoterma de Flory-Huggins, representa a adsorção de um solvente ou plastificante, como glicerol, por exemplo, acima da temperatura de transição vítrea, descreve a isoterma de material cristalino como açúcares e sais. O Tipo IV descreve a isoterma de adsorção por sólido hidrofílico que se incha até atingir o máximo de hidratação dos sítios. O tipo V representa a isoterma de adsorção multicamada de B.E.T. (Brunauer, Emmett e Teller, 1938), observada para a adsorção de vapor de água sobre carvão e está relacionada com as isotermas tipos II e III. As duas isotermas mais frequentemente encontradas para produtos alimentares são os tipos II e IV. (AL-MUHTASEB, 2002)

As isotermas de sorção podem ser de adsorção ou dessorção. As isotermas de adsorção podem ser obtidas pela adição de água à amostra seca. Enquanto que as isotermas de dessorção são obtidas através da retirada de água da amostra. (AL-MUHTASEB, 2002)

A Figura 8 apresenta uma isoterma de sorção cujo formato é típico da maioria das isotermas obtidas para alimentos. Nesta figura, as curvas estão separadas em três zonas definidas pelas retas verticais tracejadas: zonas A, B e C. As curvas de adsorção e dessorção, quando representadas em um mesmo gráfico, podem mostrar o fenômeno de histerese. O fenômeno é definido como a diferença existente entre as duas curvas. A isoterma de dessorção não se sobrepõe à de adsorção. Verifica-se que em um dado valor de atividade de água, o conteúdo de umidade da mostra é maior durante a dessorção do que durante a adsorção (HELDMAN *et al.* 1992).

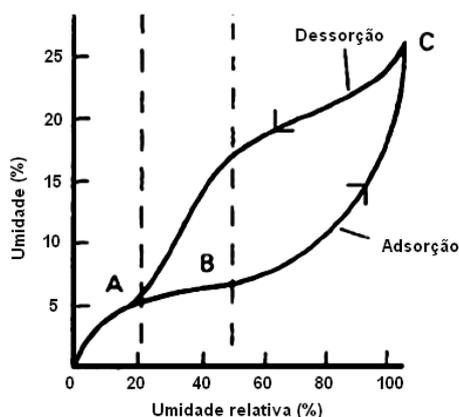


Figura 8 Isoterma geral de adsorção e dessorção para produtos alimentícios [Fonte: adaptado de HELDMAN *et al.* 1992]

Segundo AL-MUHTASEB (2002) uma isoterma de adsorção é obtida submetendo um material completamente seco a uma atmosfera em diferentes umidades relativa do ar, medindo o ganho de peso devido a absorção de água; uma isoterma de dessorção é encontrada colocando um material inicialmente úmido sob as mesmas umidades relativas, e medindo a perda de peso .

2.4.1 Métodos para determinação das isotermas

Muitos métodos estão disponíveis para a determinação das isotermas de sorção. GAL (1981) classifica estes métodos em três categorias: método gravimétrico; método manométrico; e método higrométrico.

I - Método gravimétrico: envolve a medição do peso, que sofrerá mudanças. Pode ser determinada de forma contínua e descontínua, em sistemas dinâmicos ou estáticos.

II - Método manométrico: mede a pressão de vapor água no volume de vapor em torno do alimento. Todo o sistema é mantido a uma temperatura constante e a amostra de alimento perde água para equilibrar com o volume de vapor, que será indicado pela diferença de altura no manômetro (GAL,1981).

III - Método higrométrico: mede o equilíbrio relativo de umidade do ar em contato com um material, a um determinado teor de umidade. Higrômetros de ponto de orvalho detectam a condensação do vapor de água, enquanto higrômetros elétricos medem a variação na condutância ou capacitância (GAL,1981).

O comportamento higroscópico de diversos produtos agrícolas tem sido estudado por vários pesquisadores, que descrevem modelos diferenciados para expressar o teor de água de equilíbrio em função da temperatura. SILVA *et al.* (2000) mostram que são utilizados principalmente dois métodos gravimétricos para determinação da umidade de equilíbrio: o método estático e o método dinâmico.

2.4.2 O método estático

A técnica estático-gravimétrica foi desenvolvida e padronizada pelo grupo de atividade de água na Europa (WOLF *et al.*, 1985). Diversos dados de sorção de umidade para produtos alimentares têm sido obtidos e publicados na literatura através da aplicação desta técnica em várias temperaturas e atividades de água (KAYMAK-ERTEKIN e SULTANOGLU, 2001). O método apresenta algumas vantagens, como:

- Determinação exata do peso seco da amostra;
- Registra a mudança de peso da amostra em equilíbrio com as respectivas pressões de vapor de água;
- Atinge equilíbrio higroscópico e térmico entre as amostras e o meio;

De acordo com LUIZ (2012) é o método mais aplicado e utiliza compostos químicos, como soluções aquosas de sais ou de ácido sulfúrico. Cada solução apresenta um grau de ajuste de umidade relativa que são obtidos através da variação de concentrações nas soluções a temperaturas diversas. ROSSI e ROA (1980), citam três métodos convencionais: soluções aquosas saturadas de diferentes sais, soluções aquosas de diferentes concentrações de ácidos e métodos mecânicos.

O procedimento é simples, realizado em recipiente fechado e a amostra permanece em repouso, suspensa, exposta a uma solução saturada, porém sem contato direto. Esse sistema é submetido a um ambiente com temperatura controlada, comumente utilizada uma estufa (LUIZ, 2012). No método estático o equilíbrio higroscópico entre o produto e o ambiente sob condições controladas é atingido sem movimentação do ar (CHEN, 2000). Amostra é pesada periodicamente até atingir um peso constante, sendo determinada assim a umidade de equilíbrio (LUIZ, 2012). O teor de água da amostra em equilíbrio com as condições de temperatura e umidade relativa interna ao frasco hermético pode ser obtido pelo método da estufa (BRASIL, 1992).

A desvantagem desse método está na lentidão do processo, uma vez que a transferência de massa ocorre apenas por difusão molecular (LUIZ, 2012). O tempo para atingir o equilíbrio pode se prolongar por mais de 21 dias no caso de grãos (BARROZO, 1998). O uso das soluções salinas é mais comum devido à

segurança no manuseio e pela facilidade de se manter a umidade relativa constante, que é uma das vantagens deste método.

2.4.3 O método dinâmico

No método dinâmico o grão é submetido a fluxos de ar sob condições controladas de temperatura e umidade relativa até que seja atingido o equilíbrio (CHEN, 2000). Segundo Luiz (2012) este método consiste em alocar o produto ocupando o maior espaço possível dentro de um recipiente, junto a um sensor capaz de informar diretamente a umidade relativa do ar.

As condições controladas de umidade relativa e temperatura são obtidas por meio de pulverização de água, vaporização de água por meio de resistências elétricas, injeção direta de vapor ou alimentação de duas correntes, uma com ar saturado e outra com ar ambiente, regulando as vazões de forma a se obter a umidade do ar desejada. Neste método, a velocidade com que a umidade do grão caminha para o equilíbrio é maior quando comparado com o método estático. Para alguns grãos, o tempo médio é de 5 h, sendo esta a vantagem deste método quando comparado com o método estático (BARROZO, 2000).

Como o produto apresenta uma umidade muito maior que o ar, uma pequena troca de umidade que ocorre é suficiente para que o equilíbrio seja alcançado (LUIZ, 2012).

2.4.4 Os modelos de isotermas de sorção

Os dados experimentais de umidade de equilíbrio em função da umidade relativa do ar e a temperatura permitem estimar parâmetros de equações e comparar com modelos disponíveis na literatura. Um bom ajuste do modelo permite prever a umidade de equilíbrio do material a partir de uma determinada umidade relativa e temperatura do ar. O ajuste realizado entre os valores encontrados pelo experimento e os valores preditos pelos modelos é analisado estatisticamente (RESENDE *et al.*, 2006).

As numerosas expressões matemáticas reportadas na literatura podem ser classificadas como modelos empíricos, semi-empíricos e teóricos. Cada classe de modelo consegue reproduzir os dados de equilíbrio de umidade, dependendo da

faixa de atividade de água ou do tipo de alimento (CORZO e FUENTES, 2004). Existem vários modelos capazes de prever o comportamento de sorção de diversos produtos (AL-MUHTASEB *et al.*, 2004).

Apesar dos diversos modelos disponíveis, IGLESIAS (1976a) afirma que nenhuma equação dá resultados precisos ao longo de toda a faixa de atividade de água e para todos os tipos de alimentos. LABUZA (1975) observou que nenhum modelo de isoterma de sorção pode prever dados sobre toda a gama de umidade relativa, porque a água está associada com a matriz de alimento por diferentes mecanismos em diferentes regiões de atividade de água.

Na literatura são encontradas mais de 200 equações propostas para representar o fenômeno de equilíbrio higroscópico dos produtos agrícolas. Estes modelos diferem tanto em sua base teórica ou empírica quanto na quantidade de parâmetros envolvidos (MULET *et al.*, 1999). As equações teóricas são baseadas nas conhecidas teorias cinéticas de adsorção de Kelvin, Langmuir e BET (Brunauer, Emmett e Teller) (LEHN e PINTO, 2004).

Existem muitas equações empíricas que correlacionam os dados experimentais das isotermas de sorção de materiais biológicos. Para o caso das isotermas de grãos, as equações usuais são os polinômios de variados graus, sendo que para a maioria das isotermas, os polinômios de segundo grau têm demonstrado bons resultados (PARK. *et al.*, 2008).

Para definir as isotermas que representam a relação de equilíbrio são mais utilizados modelos matemáticos empíricos, uma vez que nenhum modelo teórico desenvolvido tem sido capaz de estimar com precisão o teor de água de equilíbrio para uma ampla faixa de temperatura e umidade relativa do ar (CORRÊA *et al.*, 2005).

2.4.4.1 Modelo BET (Brunauer, Emmett e Teller)

Entre os diversos modelos utilizados, o Modelo BET (Equação) considera a natureza química da umidade do produto para camadas polimoleculares de produtos agrícolas (PARK e NOGUEIRA, 1992). A equação geral da isoterma de BET é representada pela Equação 2.

$$X_e = \frac{(X_m \cdot C \cdot a_w) \cdot [1 - (n + 1) \cdot a_w^n + n \cdot a_w^{n+1}]}{(1 - a_w) \cdot [1 + (C - 1) \cdot a_w - C \cdot a_w^{n+1}]} \quad (2)$$

Em que,

X_e – conteúdo de umidade de equilíbrio, kg.kg-1;

X_m – conteúdo de umidade na monocamada molecular, kg.kg-1;

UR – umidade relativa, decimal;

c e n – parâmetros que dependem do material analisado.

2.4.4.2 Modelo de Chung Pfost

O modelo de CHUNG PFOST (1967) apresenta uma equação que permite estimar, com determinada precisão, os valores de umidade de equilíbrio de grãos e cereais na faixa de 20 a 90% de umidade relativa (CORDEIRO *et al.*, 2006). Esta equação é apresentada pela Equação 3.

$$X_e = a - b \cdot \ln[-(T + c) \cdot \ln(a_w)] \quad (3)$$

2.4.4.3 Modelo de Halsey

HALSEY (1948) desenvolveu um modelo para a condensação das camadas a uma distância relativamente grande da superfície, conforme Equação 4.

$$X_e = a \left[T \cdot \ln\left(\frac{1}{a_w}\right) \right]^{\frac{-1}{c}} \quad (4)$$

2.4.4.4 Modelo de Chen

No modelo de Chen, a análise é baseada no período transiente da secagem e é limitada a situações em que a difusão é o principal modo de transporte de massa (CHEN, 1971). É dado pela Equação 5.

$$a_w = \exp[k + A \cdot \exp(B \cdot X_e)] \quad (5)$$

2.4.4.5 Modelo de Chen Clayton

CHEN E CLAYTON (1971) tentaram relacionar a dependência das isotermas com a temperatura, obtendo a Equação 6.

$$X_e = \left(\frac{1}{-c \cdot T^D} \right) \ln \left(\frac{\ln a_w}{-bT^a} \right) \quad (6)$$

2.4.4.6 Modelo de Oswin

A equação de Oswin considera o efeito da temperatura na dependência do conteúdo de umidade de equilíbrio e a atividade de água do produto (AL-MUHSTABE *et al.*, 2002), conforme mostra a Equação 7.

$$X_e = A \cdot \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^B \quad (7)$$

2.4.4.7 Modelo de Peleg

O modelo de Peleg é um modelo empírico de quatro parâmetros, que tenta conjugar duas tendências em uma equação (PELEG, 1993). É dado pela Equação 8.

$$X_e = k_1 \cdot a_w^{n_1} + k_2 \cdot a_w^{n_2} \quad (8)$$

A restrição para esta equação é que $n_1 < 1$ e $n_2 > 1$.

2.4.4.8 A equação de GAB (Guggenheim, Anderson e de Bôer)

Segundo PARK e NOGUEIRA (1992) a equação de GAB (Equação 9) permite um melhor ajuste dos dados de sorção de alimentos até uma atividade de água de 0,9, pois é uma equação tri-paramétrica.

$$X_e = \frac{(X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w)}{(1 - K \cdot a_w) \cdot [1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w]} \quad (9)$$

2.4.4.9 Modelo de Henderson

De acordo com AL-MUHSTABE *et al.* (2002) um dos modelos mais utilizados em matéria de atividade de água para quantidade de água absorvida é a equação empírica de Henderson (Equação 10).

$$X_e = \left[\frac{\ln(1 - a_w)}{(-a \cdot T + 273,16)} \right]^{\frac{1}{c}} \quad (10)$$

2.4.4.10 Modelo de Henderson Modificado

AL-MUHSTABE *et al.* (2002) também apresenta a modificação da equação de Henderson (Equação 11).

$$X_e = \left\{ \frac{\ln(1 - UR)}{[-a \cdot (T + b)]} \right\}^{\frac{1}{c}} \quad (11)$$

2.4.5 Pesquisas realizadas com isotermas

WANG e BRENNAN (1991) pesquisaram os dados de equilíbrio de umidade de batatas por dessorção e adsorção a temperaturas pré-determinadas a 40, 50, 60 e 70° C. O método experimental aplicado foi um método estático-gravimétrico com soluções de ácido sulfúrico, o experimento foi feito em duplicata. Os resultados obtidos demonstraram que a temperatura tem um efeito sobre as isotermas de sorção, o equilíbrio da umidade aumenta com a diminuição da temperatura na atividade de água constante. Em relação ao ajuste de modelos concluíram que as equações de GAB e Oswin são adequadas para representar a relação entre a atividade de água e umidade de equilíbrio nas atividades de água que variam entre 0 - 88 %, e a Equação de BET nas atividades de água entre 0-60 %.

LUIZ (2012) realizou um estudo através do método estático para determinar as isotermas de sorção de tomate, com temperaturas de 40, 50, 60, 70, 80, 90°C. Utilizou soluções salinas saturadas, o modelo de GAB mostrou o melhor ajuste aos dados experimentais.

ETHMANE KANE *et al.* (2008) determinaram as isotermas de adsorção de *Mentha pulegium* e *Mentha rotundifolia* a 30, 40 e 50 ° C utilizando o método gravimétrico estático. Os modelos de GAB , Halsey modificado e Peleg foram ajustados aos dados experimentais e apresentaram um bom ajuste.

GOMES *et al.* (2002) determinaram as isotermas de adsorção de umidade da polpa de acerola em pó nas temperaturas de 20°C, 25°C e 30°C, por meio do

método estático, utilizando-se soluções saturadas de sais. Os dados experimentais das isotermas foram ajustados com as equações de BET, GAB, Oswin e Smith. Entre os modelos testados, o de GAB resultou nos melhores ajustes aos dados experimentais, podendo representar satisfatoriamente as isotermas de adsorção de umidade da polpa de acerola em pó.

NUNES *et al.* (2009) determinaram pelo método dinâmico as isotermas de equilíbrio higroscópico do amido de inhame a 25, 30, 35, 40 e 45°C. Aos dados experimentais foram ajustados alguns modelos matemáticos, dentre os quais o que melhor se ajustou às isotermas foi o modelo de Chung- Pfof. Concluíram ainda que, para a faixa de temperatura de 25 a 45°C, o amido de inhame deve ser manipulado e/ou armazenado em ambientes com umidades relativas maiores que 40%, para que sejam evitadas deteriorações químicas, enzimáticas e microbiológicas do produto.

SOUSA *et al.* (2013) estudaram as isotermas de dessorção das sementes de nabo forrageiro e ajustaram modelos matemáticos aos dados experimentais obtidos pelos métodos estático e dinâmico. No método estático foram utilizados dessecadores contendo as amostras e soluções salinas saturadas. Aos dados experimentais foram ajustados modelos matemáticos disponíveis na literatura. Segundo os parâmetros estatísticos de análise, o modelo de Copace foi o que melhor descreveu as isotermas das sementes de nabo forrageiro obtida pelo método dinâmico e, para o método estático, os modelos de Sigma Copace, Oswin, Halsey Modificado e Copace foram os que melhor se ajustaram.

RAMOS *et al.* (2014) obtiveram as isotermas através da medição de atividade de água, nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C. A análise estatística provou que somente a atividade de água apresentou influência significativa nos dados das isotermas. Entre os modelos matemáticos testados, o que melhor descreveu o comportamento higroscópico das isotermas foi o de Smith.

COSTA *et al.* (2013) determinaram as isotermas de sorção dos frutos de crambe e obtiveram os valores do calor isostérico de dessorção em função do teor de água de equilíbrio. Para obtenção do teor de água de equilíbrio higroscópico utilizaram soluções salinas e o método estático-gravimétrico. Baseando-se em parâmetros estatísticos, os modelos de Copace e Oswin Modificado foram os que melhor representaram a higroscopicidade dos frutos de crambe quando comparados com os demais modelos testados.

COSTA *et al.* (2015) determinaram as isotermas de sorção dos frutos de crambe pelo método dinâmico para diversas condições de temperatura e atividades de água e ajustaram diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais. Os modelos analisados apresentaram bom ajuste aos dados experimentais, sendo o modelo de Sigma Copace o que melhor representou os dados experimentais.

2.5 Controle de Processos

Segundo OGATA (2007), o controle automático desempenha um papel fundamental no avanço da engenharia e da ciência. De acordo com CAMPOS e TEIXEIRA (2006), no atual mercado competitivo, as empresas se vêem na obrigação de melhorar continuamente a produtividade de suas plantas industriais, e uma das áreas tecnológicas fundamentais para se aumentar a rentabilidade é a de controle, automação e otimização de processos.

As empresas têm atribuído cada vez maior importância aos seus processos produtivos, em um cenário de alta competitividade e inovação os processos se tornaram foco em melhoria para alcançar maior produtividade. Devido a diversos fatores internos e externos as companhias têm buscado equipamentos cada vez mais automatizados e com maior nível de complexidade, assim os processos têm se tornado mais robustos e têm sido exigidas técnicas de controle cada vez mais eficazes.

O processo de secagem nas indústrias tem sido alvo de estudos por diversos fatores, entre eles a preocupação com a eficiência energética, sendo a secagem um processo que demanda uma fonte energética, as empresas têm interesse em atuar na melhoria de sua eficiência, por estar diretamente relacionado aos seus custos industriais e conseqüentemente na produtividade. Além do fator econômico também existe a preocupação com a qualidade do produto final, que precisa atender padrões internos e exigências regulamentadoras.

Muitos processos de secagem ainda são dependentes do conhecimento tácito operacional para controle das variáveis, porém esse sistema pode ser ineficiente e também ineficaz, pois não pode garantir a padronização do processo.

O ajuste operacional de forma manual é um método que apresenta alguns pontos negativos, pois além de estar suscetível ao erro humano, exige experiência do operador para controlar as variáveis, torna o processo dependente do conhecimento operacional e pode apresentar variações inerentes ao controle humano.

Segundo LIMA (2004), uma maneira de melhorar a qualidade de um produto, sua produção e o seu custo é controlar os processos, onde os avanços nesta área propiciam a obtenção de um ponto ótimo de desempenho dos sistemas dinâmicos.

Os controladores são equipamentos utilizados em processos industriais e têm a função de manter os processos em seus pontos operacionais mais eficientes e econômicos, ou seja, em seus valores ótimos, além de prevenir condições instáveis no processo que podem pôr em risco pessoas e/ou equipamentos (FILHO, 2014).

Para PHILLIPS e HARBOR (1996) os controladores são instrumentos que auxiliam a filtrar o sinal de erro de um sistema, sendo este a diferença entre a resposta do sistema e o sinal de referência deste (resposta desejada), de modo que certos critérios, como rejeição a distúrbios, erros de sistema estacionário, características da resposta transitória e sensibilidade às mudanças de parâmetros da planta, sejam satisfeitos.

De acordo com AGUIRRE (2004), o estudo da engenharia de controle permite desenvolver mecanismos para avaliar as características fundamentais de um processo e com isso, obter o modelo matemático desejado.

Os processos industriais caracterizam-se por uma grande variedade em suas formas de aplicação e desempenho e uma das principais características é pela quantidade de entrada e saídas. O controlador de um processo mede o valor da variável que se quer controlar e compara com um valor desejado (pré-determinado) da variável, a partir dessa comparação determina o erro (diferença entre o valor atual e o valor desejado) e gera um sinal de correção ao sistema, aplicando ao sistema de forma a eliminar o desvio e conduzir a variável ao valor desejado.

Para realizar o experimento de controle é necessário colocar o sistema no ponto de operação e aguardar que atinja o regime permanente. Em seguida

aplica-se uma brusca variação na variável de controle. A mudança na variável de controle deve ser suficientemente grande para conseguir um máximo sinal em relação à amplitude dos ruídos. (ASTRÖM e HÄGGLUND, 1995).

O sistema de controle deve possuir alguns requisitos básicos para ser implementado, como por exemplo, ser estável, possuir velocidade de resposta razoavelmente rápida e ser capaz de reduzir erros a zero ou a valores pequenos toleráveis (OGATA, 2007).

Obter um produto com valores de umidade inferiores aos níveis recomendados implica em um consumo desnecessário de energia e, como consequência, incrementa-se o custo de operação (ABITANTE, 2007).

JANKOWSKY (2000) afirma que é necessário medir com exatidão as variáveis do processo para proporcionar meios de manter constantes as variáveis de controle do secador.

2.5.1 Sistemas de Controle

O sistema de controle, constituído do processo e do controlador do processo, tem seu comportamento definido a partir do sinal de controle gerado pelo controlador para se obter um sinal de saída especificado através de referências e considerando o conhecimento do processo. Os sistemas podem operar em duas configurações básicas: malha aberta e malha fechada (OGATA, 2007).

2.5.1.1 - Sistemas em malha aberta

Num sistema de controle em malha aberta o sinal de controle é baseado em experiências do operador (humano) (Figura 9). Como não é utilizado sensor para se medir a informação do valor de saída não é possível corrigir de forma automática o sinal de entrada para alcançar um sinal de saída desejado, devido a perturbações no sistema. Em outras palavras, a partir da aplicação de um sinal de controle $u(t)$ predefinido, a variável controlada $y(t)$ (sinal de saída) apresenta um determinado comportamento ou valor, sem que seja feita medição do sinal de saída. Este Sistema tem a vantagem de ser simples se o operador conhece profundamente o processo, desde que não haja nenhuma perturbação. Porém há

a desvantagem de que como o processo fica sujeito a perturbações sem a capacidade de recuperação automática dos erros e desvios (ADÃO, 2011).

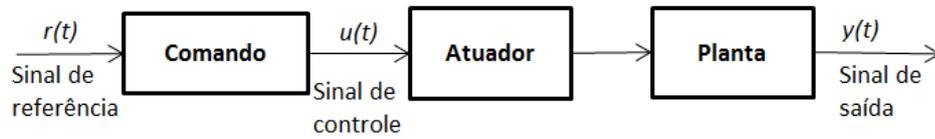


Figura 9 Sistema em Malha aberta

2.5.1.2 Sistema Malha Fechada

No controle em malha fechada, contrariamente, utiliza a informação do processo para efetuar o controle do mesmo (Figura 10). Ou seja, o sinal de saída $y(t)$ é utilizado como base para o sinal de controle $u(t)$ que deve ser aplicado ao processo a cada instante de tempo. O sinal de saída é medido através de um sensor, e consecutivamente é comparado com um sinal de referência $r(t)$. A diferença entre os dois sinais, que é o sinal de erro $e(t)$, é o fator utilizado para a definição do sinal de controle que deve ser aplicado para corrigir o desvio entre os sinais $r(t)$ e $y(t)$ (OGATA, 2007; PHILLIPS e HARBOR, 1996).

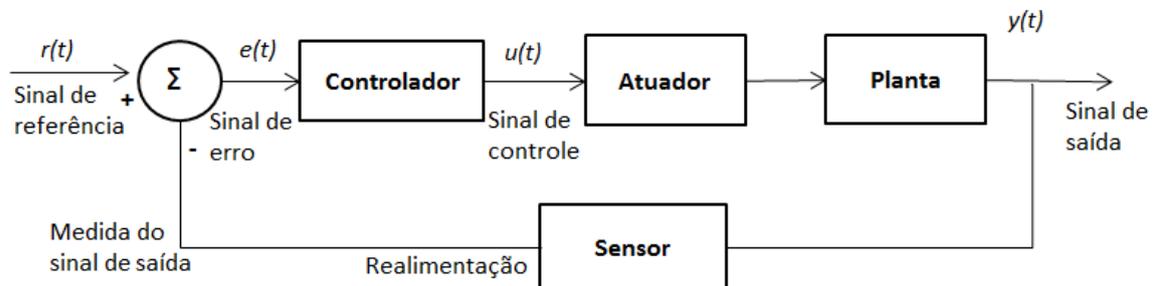


Figura 10 Sistema em Malha fechada

2.5.2 Controlador PID

O controlador PID é um sistema de controle tradicional que combina ações proporcional, integral e derivativa, sendo possível também combinar as ações separadamente.

2.5.2.1 Controle Proporcional

O controle proporcional é o modo mais simples de controle contínuo que reduz as oscilações de uma malha de controle (Figura 11). Mais efetivo que o controlador do tipo *on-off* (liga e desliga). O controle proporcional tem as seguintes características (FRANCHI, 2011):

- Saída do controlador proporcional ao erro;
- Apresenta *offset* após perturbação na carga;

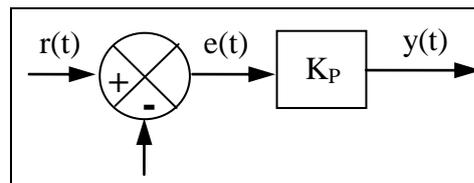


Figura 11 Ação proporcional

O controle proporcional atua na resposta transitória do sistema de forma a diminuir o tempo de subida, diminuindo adicionalmente o erro de regime permanente. Neste caso a relação entre a saída do controlador $y(t)$ e o sinal erro atuante $e(t)$ é proporcional a sensibilidade proporcional ou ganho ajustável:

$$y(t) = K_P \cdot e(t) \quad (13)$$

2.5.2.2 Controle Integral

A ação de controle integral tem como finalidade remover o erro que permanece no controle, enquanto houver erro a saída do controlador irá alterar a variável manipulada para eliminá-lo (Figura 12) (FRANCHI, 2011).

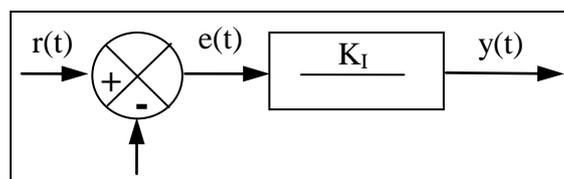


Figura 12 Ação integrativa

O valor de saída do controlador $y(t)$ varia em uma taxa no tempo que é proporcional ao sinal de erro atuante $e(t)$:

$$y(t) = K_I \int_0^t e(t).dt \quad (14)$$

2.5.2.3 Controle Derivativo

O objetivo da ação derivativa é aplicar ganho para eliminar atrasos na malha de controle, ele antecipa para onde o processo está indo, através da análise da taxa de variação do erro (de/dt). A ação derivativa pode ser vista na Figura 13 (FRANCHI, 2011).

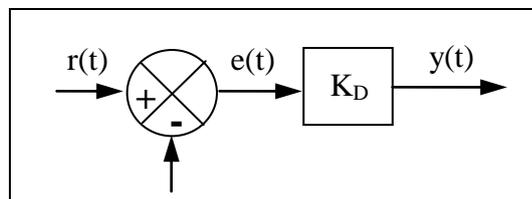


Figura 13 Ação derivativa

A ação derivativa tem o efeito de aumentar a estabilidade do sistema, reduzindo o sobressinal e o tempo de estabilidade, com isso melhorando a resposta transitória. O valor de saída do controlador $y(t)$ é proporcional á taxa de variação do sinal de erro atuante $e(t)$ no tempo:

$$y(t) = K_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (15)$$

2.5.2.4 Controle Proporcional- Integrativo-Derivativo

A estrutura do controlador PID é uma união das ações proporcional, integrativa e derivativa do sinal de erro (LIMA, 2004).

$$y(t) = K_P \cdot e(t) + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt} + K_I \cdot \int_0^t e(t).dt \quad (16)$$

Seu principal objetivo é apresentar um período de resposta semelhante ao controlador proporcional, porém sem *offset*. A ação derivativa tem a finalidade de aumentar a velocidade de resposta necessária para reduzir o tempo de atraso de resposta do controlador, resultante da ação integral.

Os controladores do tipo PID possuem como característica o uso de baixa computação numérica e a implementação simples. A maioria dos controladores industriais em uso, atualmente, utiliza este tipo de estratégia de controle (OGATA, 2007).

KUMAR et al (2011) afirma que entre os controladores utilizados a estimativa é de que mais de 90% sejam do tipo PID. MISHRA (2014) atribui esse fator à sua simplicidade e eficácia.

A aplicação do controlador PID se faz necessária quando é preciso melhorar tanto a resposta transitória quanto a resposta em regime estacionário do sistema de controle (PHILLIPS e HARBOR 1996).

Os parâmetros do controlador, K_p , ganho proporcional, K_I , constante de tempo integral e K_D , constante de tempo derivativo, devem ser especificados pelo projeto, onde um ou dois ganhos deste podem ser escolhidos como zero para um projeto particular (PHILLIPS e HARBOR 1996).

2.5.3 Sintonia dos controladores

O principal objetivo da sintonia de malhas de controle é fazer a identificação de que forma a dinâmica de um determinado processo reage aos esforços de controle, e baseado no desempenho determinar a dinâmica necessário ao algoritmo PID a fim de eliminar os erros (VANDOREN, 2006).

As técnicas clássicas de sintonia do controlador PID obtêm analiticamente ou graficamente alguma característica do processo, e posteriormente utiliza para definir as configurações do controlador. No geral as técnicas clássicas são simples e rápidas de se implementar (BANSAL et al, 2012).

Existem vários métodos de ajuste de controle, conhecidos e utilizados na prática (OGATA, 2007). Esses métodos variam quanto a sua complexidade e precisão. Os métodos mais utilizados têm se mostrado bastante eficazes e de simples implementação. Estes métodos podem ser classificados como métodos

empíricos, analíticos ou obtidos através de algum tipo de otimização (MISHRA, 2014).

ZIEGLER e NICHOLS (1942) desenvolveram metodologias de sintonia de controladores PID, que inicialmente busca caracterizar a dinâmica do processo por três parâmetros e através de fórmulas simples. Vários outros modelos variantes do método Ziegler & Nichols foram desenvolvidos, porém, no geral, os métodos utilizam as três etapas seguintes para sintonizar o controlador (JOHNSON e MORADI, 2005):

1. Submeter o processo à perturbação no sinal de controle;
2. Analisar e quantificar a resposta do sistema ao distúrbio;
3. Sintonizar os parâmetros PID com base na análise da resposta e desempenho do sistema;

2.5.3.1 Método de Ziegler & Nichols

O método de Ziegler e Nichols é um dos mais conhecidos e populares métodos (MISHRA, 2014). ZIEGLER e NICHOLS (1942) propuseram regras heurísticas de sintonia que permitem o ajuste dos parâmetros K_p , K_i e K_d . OGATA (2007) destaca este método como sendo uma técnica que objetiva a determinação dos valores do ganho proporcional, de tempo integral e de tempo derivativo, fundamentadas nas características da resposta temporal de uma dada planta.

Suas regras são baseadas em experimentos de resposta ao degrau em malha aberta (primeiro método), ou em experimentos baseados no ganho de um controlador proporcional que leva o sistema à estabilidade marginal em malha fechada (segundo método). No primeiro método deve-se obter uma resposta experimental da planta em malha aberta. Caso a resposta exiba um aspecto em “S”, como ilustrado na Figura 14, esse método pode ser aplicado. Esse comportamento ocorre, normalmente, quando a planta não contém integradores, é estável e não possui pólos dominantes pouco amortecidos.

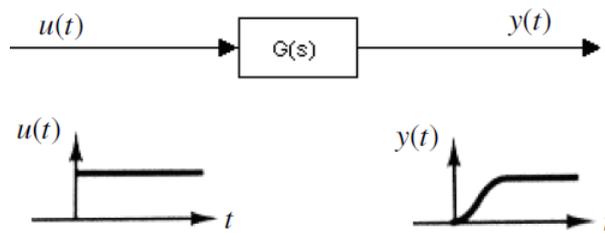


Figura 14 - Padrão de resposta ao degrau

Se a resposta satisfaz essa condição de aspecto, o modelo linear da planta pode ser considerado aproximadamente a Equação 17.

$$G(s) = \frac{K}{\tau_s + 1} e^{-\theta \cdot s} \quad (17)$$

Em que θ é o tempo morto aparente, τ a constante de tempo e K o ganho da função de transferência. Esses valores podem ser extraídos diretamente da curva de resposta, como indicado na Figura 15.

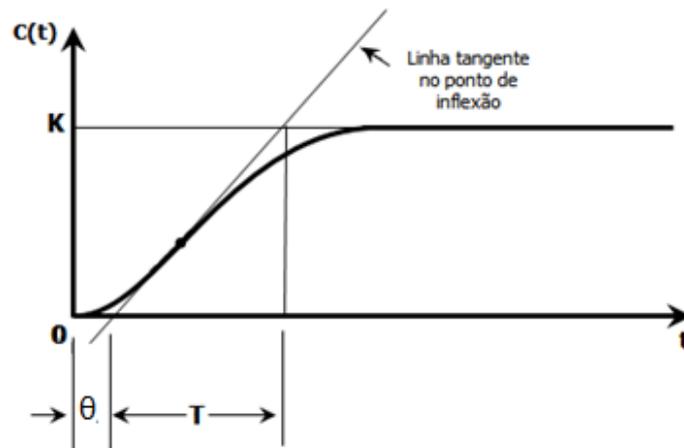


Figura 15 – Curva de Reação do processo para obtenção dos parâmetros T , θ e K .

A partir da curva de reação do processo, é necessário traçar uma linha tangente ao ponto de inflexão para determinar os parâmetros L , T e θ . A Tabela 2 apresenta os valores sugeridos por Ziegler e Nichols (1942) para os ganhos do controlador PID em função dos valores obtidos pela curva de resposta.

Tabela 2 - Valores sugeridos por Ziegler e Nichols para os ganhos do controlador PID em função da curva de resposta.

	Kp	Ti	Td
P	τ/θ	∞	0
PI	0,9. (τ/θ)	$\theta/0,3$	0
PID	1,2. (τ/θ)	2. θ	0,5. θ

No segundo método procede-se um teste inicial em malha fechada com a constante integrativa igual a um valor muito alto, tendendo ao infinito, e a constante derivativa igual a zero. Em seguida vai aumentando-se o valor de K_p desde zero até seu valor crítico K_{cr} , até que a saída exiba uma oscilação auto-sustentada de período P_{cr} , como ilustrado na figura 16.

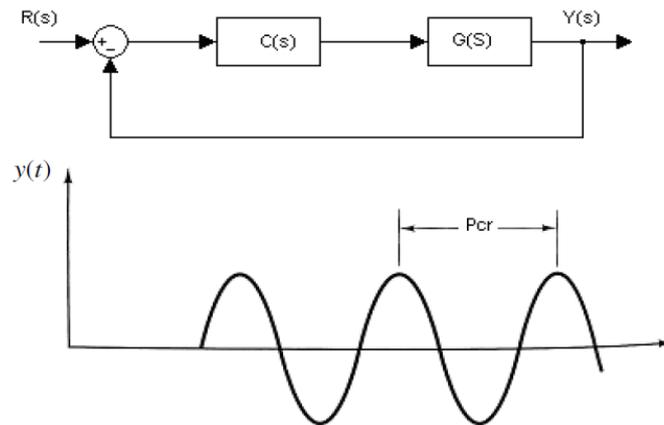


Figura 16 – Período crítico da resposta (P_{cr}) em malha fechada.

Caso a saída não exiba oscilação auto-sustentada para nenhum valor de K_p , então esse método não se aplica. Os valores sugeridos por Ziegler e Nichols (1942) no método em malha fechada, também conhecido como limiar da oscilação estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores sugeridos por Ziegler e Nichols para os ganhos do controlador PID para o método em malha fechada

	Kp	Ti	Td
P	$0,5. K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45. K_{cr}$	$(1/1,2). P_{cr}$	0
PID	$0,6. K_{cr}$	$0,5. P_{cr}$	$0,125.P_{cr}$

O método de Ziegler e Nichols obtém uma estimativa inicial para os parâmetros do controlador, sendo necessário em diversos casos, um ajuste fino posteriormente (GUIMARÃES, 2013).

2.5.3.2 Método de Cohen-Coon

O método Cohen e Coon (1953) é uma alternativa ao método proposto por Ziegler e Nichols (1942). Da mesma forma como o primeiro método de Ziegler e Nichols, o modelo aproximado da planta é considerado uma função de transferência de primeira ordem com tempo morto.

A Tabela 4 apresenta as sintonias proposta por COHEN e COON (1953) para as leis de controle P, PI e PID.

Tabela 4 - Valores sugeridos por Cohen e Coon (1953) para as leis de controle P, PI e PID.

	Kp	Ti	Td
P	$1/K.(\tau/\theta + 1/3)$	0	0
PI	$1/K.(0,9.\tau/\theta + 1/12)$	$3\theta.[(10+\theta/\tau)/(9+20.\theta/\tau)]$	0
PID	$1/K.(4\tau/3.\theta + 1/4)$	$\theta.[(32+6.\theta/\tau)/(13+8.\theta/\tau)]$	$4.\theta/(11+2.\theta/\tau)$

Segundo CAMPOS E TEIXEIRA (2006) é muito comum no método de Cohen e Coon acontecerem sintonias agressivas, então na prática é sugerido diminuir inicialmente os ganhos de sintonia e aumentar posteriormente estes ganhos em função da observação do comportamento do processo.

ADÃO (2011) afirma que o objetivo desse método é obter respostas em malha fechada com uma razão de decaimento de $\frac{1}{4}$ (aproximadamente 20% de overshoot), sendo que esse tipo de resposta consegue rejeitar distúrbios na carga com maior eficiência.

Bansal et al (2012) afirmaram que apesar de apresentar melhores resultados, os resultados obtidos pelo método de Cohen Coon não tem desempenho com melhoria tão significativa em relação ao método de Ziegler Nichols.

2.5.4 Desempenho do controlador

Para avaliação de desempenho do ajuste dos controladores existem algumas técnicas, como análise do tempo de subida e estabilização e erro de regime permanente. Outras técnicas podem ser utilizadas, como por exemplo, a análise da variabilidade. O principal critério para ajuste do controle de um processo é a estabilidade do mesmo (WILTON, 2000).

Segundo SILVA (2010) alguns critérios mais utilizados são:

- Tempo morto: é o tempo de um atraso entre o momento que ocorre uma mudança ou variação da variável de processo e quando essa mudança vem a ser observada;

- Tempo de subida: é o tempo que o sistema leva para ir de 10% a 90% do valor do estado estacionário, ou valor final (ou valor de SP);

- Tempo de estabilização: tempo necessário para que a variável do processo chegue dentro de um patamar de porcentagem (normalmente 5%) do valor final.

- Erro de regime permanente: diferença final entre as variáveis do processo e o SP em regime permanente. Note que a definição exata de algumas dessas quantidades varia na indústria.

Um importante critério de análise do sistema é o erro de regime permanente. Estes critérios podem ser calculados através do acompanhamento da trajetória da variável controlada em relação ao valor de referência (*set-point*) desejado. Segundo CAMPOS e TEIXEIRA (2006), alguns índices de desempenho, e suas definições, são listados na Tabela 5.

Tabela 5 – Critérios de desempenho de controle

Índice de Desempenho	Significado	Expressão	
IAE	Integral do módulo do erro	$\int e(t) dt$	(18)
ISE	Integral dos erros ao quadrado	$\int e^2(t)dt$	(19)
ITAE	Integral do módulo do erro vezes o tempo	$\int t e(t) dt$	(20)

Fonte: [CAMPOS e TEIXEIRA, 2006]

Nestes índices, $e(t)$ é a diferença entre o valor medido da variável controlada e o set-point em cada instante (t) ao longo da janela de avaliação.

O critério integral do erro absoluto (IAE), dado pela equação (18), tem por característica proporcionar peso similar a erros tanto pequenos quanto grandes. No critério integral do erro absoluto ponderado pelo tempo (ITAE), apresentado na equação (20), o erro em tempos mais recentes tem maior ponderação. O critério integral do erro quadrático (ISE) dado pela equação (19) proporciona grande peso a erros grandes e pequeno peso para erros pequenos.

Para BALESTRINO et al. (2006), o critério IAE é uma boa medida econômica do desempenho, pois o tamanho e comprimento do erro em ambas direções é proporcional a perda de rendimento.

Nem todos os critérios de desempenho podem ser utilizados ao mesmo tempo. Logo, é necessário estabelecer uma métrica de erro, pois o sistema de controle deve ser robusto e econômico.

2.5.5 Trabalhos realizados com controle de processo de secagem

O controlador PID é o mais aplicado na indústria. Cerca de 90% a 95% das malhas industriais utilizam este controlador (ÅSTRÖM e WITTENMARK, 2006).

BERTO *et al.* (2004) testou três sintonias para o controlador PID-*feedback* e verificou qual apresentou melhor resultado para manter a temperatura de entrada da água de aquecimento no *set-point* desejado, em um processo de pasteurização.

TEIXEIRA *et al.* (2007) realizou um estudo com controladores PI e PID para avaliar a melhoria do processo de reaquecimento de placas de aço nas principais malhas de vazão e temperatura que o compõem.

No trabalho de ABITANTE (2007), o controlador do tipo PID se mostrou ideal para controlar o processo de secagem de folhas de erva-mate, onde com sua utilização a variável controlada alcançou o *setpoint* rapidamente e, além disso, o sistema se manteve estável, sem exceder os limites conferidos às folhas na saída do secador.

MOURA (2009) implementou um sistema de controle do processo de secagem de rejeito de maracujá. Foi feita a sintonia do controlador PID utilizando o método de síntese direta e admitindo uma trajetória de primeira ordem. A variável controlada foi a temperatura do ar de secagem na alimentação do secador. Os ensaios realizados em malha fechada permitiram verificar um desempenho satisfatório da estratégia de controle implementada.

PRATES *et al.* (2011) implementaram um sistema de controle de temperatura e velocidade do ar, em um secador de plantas medicinais, foram realizadas de controle PID, e por fim comparou-se os dois métodos de controle de velocidade: manual e automático. Verificou-se redução de 63 % no consumo de energia elétrica quando foi utilizado o método automático.

TUSSOLINE (2014) estudou a secagem de folhas e ramos de erva-mate em leito de camada delgada. Um controlador PID foi empregado para controle de umidade de descarga de folhas de erva-mate por manipulação da velocidade da esteira. A validade da estratégia de controle por realimentação foi verificada por comparação entre respostas experimentais e valores desejados de umidade em malha fechada através de perturbação do sistema (alteração do set-point) em diferentes condições de operação do secador de esteira.

Prates *et al.* (2011) implementaram um controle automático na velocidade do ar para secagem de plantas medicinais. Foi realizada a comparação entre dois métodos de controle de velocidade: manual e automático. Verificou-se redução de 63 % no consumo de energia elétrica quando foi utilizado o método automático.

Mohammadzaheri *et al.* (2015) propuseram um sistema de controle híbrido para resolver o controle de temperatura de um secador por infravermelho. Os resultados experimentais demonstraram desempenho superior quando em comparação com os resultados de um controlador PID.

Yang et al (2016) estudaram uma estratégia de controle simultânea para melhorar a precisão do superaquecimento e da temperatura de secagem, pois a estabilidade da temperatura de secagem garante a qualidade do material de secagem. O sistema de secagem por bomba de calor foi controlado através de dois controladores fuzzy e um controlador PID. Os resultados demonstraram que o sistema híbrido pode diminuir as não-linearidades do superaquecimento e temperatura de secagem.

Zanoelo et al (2008) propuseram um sistema de controle para secagem de erva mate. Foi comparado o desempenho de um sistema PID (proporcional integral-derivativo) e um PI (proporcional-integral) através de respostas em circuito aberto e fechado. O método simplex foi aplicado durante o procedimento de ajuste dos parâmetros do controlador, minimizando o erro integral quadrado (ISE) da saída do processo quando foi imposta uma mudança radical no set-point.

Ceylan et al (2007) estudaram a secagem de frutas tropicais e utilizou um sistema de controle PID para controlar a temperatura do ar, a temperatura de secagem utilizada foi de $70 \pm 3^{\circ}\text{C}$, com tempo de secagem em média de 5 horas.

Hofmann et al (2012) utilizaram um controlador PID para manipular a velocidade da correia transportadora, a fim de manter a temperatura dos flocos de soja na descarga do secador próxima a 61°C , sem exceder a saída aceitável faixa de umidade 9,9-12,3% em base seca. Para ajustar o conjunto de parâmetros do controle PID foi utilizada a técnica ISE e o método de otimização simplex.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e equipamentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho, bem como a metodologia empregada.

Os testes realizados foram divididos em etapas: determinação da massa seca do produto, determinação da cinética de hidratação das sementes, determinação de isotermas de equilíbrio, determinação da cinética de secagem, implementação de controle do processo de secagem.

Os experimentos de hidratação, obtenção de isoterma, cinética de secagem e controle de processo foram realizados no Laboratório de Controle de Processos do Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

3.1 Caracterização das amostras

Foi utilizada, como matéria-prima para a realização dos experimentos de hidratação, isotermas e determinação da cinética de secagem, sementes de *Crambe Abyssinica in natura*, fornecida pela Fundação MS, safra de 2014.

3.1.1 Determinação de massa seca

O teor de umidade do produto em análise, o crambe *in natura*, foi determinado pelo método de estufa a 105°C por 24 horas, conforme descrito por BRASIL (1992). Foram utilizadas placas de petri de vidro contendo, aproximadamente 2 g de amostra, colocados em estufa com circulação de ar (CIENLAB CE-220), com a temperatura controlada a 105±3°C por 24 horas. Após o período de secagem, as amostras foram pesadas e o teor de umidade determinado pelas equações 21 e 22 (CANHA, 2000). As medidas foram realizadas em triplicata.

- Base úmida:

$$X_{\%b.u.} = \left(\frac{m_{\text{água+amostra}} - m_{\text{amostra seca}}}{m_{\text{água+amostra}}} \right) \quad (21)$$

- Base seca:

$$X_{\%b.s.} = \left(\frac{m_{\text{água+amostra}} - m_{\text{amostra seca}}}{m_{\text{amostra seca}}} \right) \quad (22)$$

3.1.2 Granulometria

A análise granulométrica dos grãos de crambe foi obtida classicamente através da utilização de um conjunto de peneiras padronizadas série Tyler e um agitador.

Ao se efetuar a análise granulométrica, as peneiras foram empilhadas, de modo que sobre uma peneira estivesse outra de furos maiores. Sob a peneira do fundo foi inserido um coletor e fixou-se o conjunto de peneiras na máquina vibratória.

As peneiras do sistema Tyler utilizados foram: 28, 12, 9, 7 e 6 mesh seqüencialmente.

Através do diâmetro de abertura das peneiras e da fração em massa retida (ϕ_n) em cada peneira, foi possível calcular o diâmetro médio das partículas (D_n), através da equação de diâmetro médio de Sauter.

$$D_{Sauter} = \frac{1}{\sum_{n=1}^n \frac{\Delta\phi_n}{\bar{D}_n}} \quad (23)$$

$$\bar{D}_n = \frac{D_{n-1} + D_n}{2} \quad (24)$$

Onde:

ϕ_n - fração de massa retida sobre a peneira n

D_n - diâmetro de abertura da peneira n.

E a partir dos dados foi encontrado o diâmetro médio dos grãos de crambe.

3.1.3 Composição Centesimal

Para conhecer a composição química dos grãos de Crambe as amostras foram submetidas à análise no Laboratório de Qualidade de Alimentos da Universidade estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Campus Toledo/PR.

O procedimento para determinação de lipídeos foi realizado em uma amostra de 3 gramas, pela extração com solvente, através de um aparelho Soxhlet, seguido de evaporação do solvente empregado (éter).

A determinação da matéria seca e cinzas é feita com 2 gramas de amostra. Inicialmente foi realizada a secagem pelo método tradicional em estufa a 105°C, após a pesagem da massa seca esse material foi levado à mufla até 550°C e permaneceu na mufla até a queima total da matéria orgânica por 4 horas.

O índice de proteína foi determinado pelo processo de digestão Kjeldahl, baseado na determinação de nitrogênio. Para a digestão foram pesados 100 mg de amostra e adicionados 5 mL de solução digestora, esse material foi levado ao bloco digestor submetido a uma temperatura inicial de 50°C com aumentos periódicos de 50°C a cada 30 minutos até atingir 450 °C. Em seguida foi adicionado 15 mL de água destilada e feito o processo de destilação no equipamento destilador. Ao final foi realizada titulação com ácido sulfúrico 0,02M.

A determinação da energia foi realizada inserindo 0,5 gramas de amostra no equipamento e obtendo a análise e valor da energia.

3.1.4 Porosidade

A porosidade do leito foi determinada a partir das massas específicas real e aparente, conforme a Equação 25 (ALSINA et al., 2009).

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{real}}{\rho_{aparente}} \quad (25)$$

Em que:

ϵ é a porosidade;

ρ real é a massa específica real (g/cm³);

ρ aparente é a massa específica aparente (g/cm³).

3.2 Determinação da cinética de hidratação

A umidificação artificial dos grãos foi necessária no trabalho para possibilitar o estudo da secagem e a avaliação de diferentes umidades iniciais do grão na cinética de secagem.

A metodologia adotada nesta etapa foi proposta por COUTINHO *et al.* (2005) e adaptada por OMOTO *et al.* (2009).

O equipamento utilizado foi um banho ultratermostático com controle de temperatura, modelo MA184, fabricante Marconi, dentro do qual foram colocados 3 béqueres de 500ml, e no seu interior estavam dispostas as amostras de crambe embebidas em água destilada.

Primeiramente regulou-se o banho ultratermostático para operar a 30 °C e aguardou-se até que este alcançasse a condição de regime permanente. Em seguida foram colocados os béqueres sobre o banho termostático e acrescentados 200 ml de água destilada em cada béquer na mesma temperatura do banho. Adicionaram-se aproximadamente 20 g de crambe no interior de cada béquer. Dessa forma procedeu-se com a retirada de uma amostra de aproximadamente 3 a 4 g de crambe do recipiente, em intervalos de tempo pré-determinados: 1, 5, 10, 20, 30, 50, 70, 90, 120, 150 e 180 minutos.

A amostra retirada era espalhada sobre papel toalha para retirar a água superficial, e eram imediatamente encaminhadas para determinação da umidade em base seca, de acordo com a Equação 18, medindo-se o peso da amostra da amostra antes e depois da secagem pelo método clássico de secagem em estufa a 105 °C durante 24 horas;

3.3 Determinação da cinética de secagem

Para obtenção da cinética de secagem foi desenvolvido um módulo experimental a fim de realizar os experimentos de secagem, em seguida um planejamento experimental foi delineado para que os experimentos pudessem ser avaliados estatisticamente e também foram propostos alguns modelos da literatura para fazer o ajuste dos dados experimentais. Esses assuntos serão tratados nos próximos tópicos.

3.3.1 Módulo experimental

Para a secagem convectiva, as amostras de crambe foram submetidas a um sistema de secagem através de um secador de leito fixo de bancada, composto por um tubo galvanizado de 2500 mm de comprimento e 120 mm de diâmetro, uma resistência elétrica de 4000 Watts e um ventilador com potência 25 Watts (Figura 17).

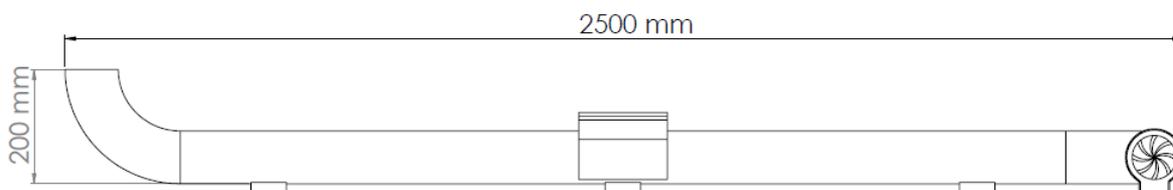


Figura 17- Equipamento utilizado nos experimentos de secagem de crambe.

O ventilador foi alocado na parte externa do secador, proporcionando um fluxo do ar externo para dentro do secador. A resistência foi instalada após o *cooler*, possibilitando a passagem do ar na resistência antes de incidir na amostra. Em seguida o ar aquecido fazia contato com a amostra. A resistência e o ventilador foram ligados a um sistema de controle operacionalizado no pacote computacional Matlab para regular a temperatura no interior do secador. Através de uma abertura lateral as amostras eram inseridas no secador e a porta lateral era fechada, vedando a vazão de ar para o meio externo. A temperatura foi medida através de um sensor com comunicação ao programa de controle. O fluxo de ar gerado no *cooler* escoava através da resistência elétrica e incide diretamente na amostra, que foi acondicionada dentro de um suporte metálico colocado no

centro do secador. Na saída do secador o ar quente era escoado, nesse ponto era realizada a medida da velocidade do ar através do anemômetro. Na Figura 18 é apresentado o aparato experimental empregado na determinação das curvas cinéticas de secagem.

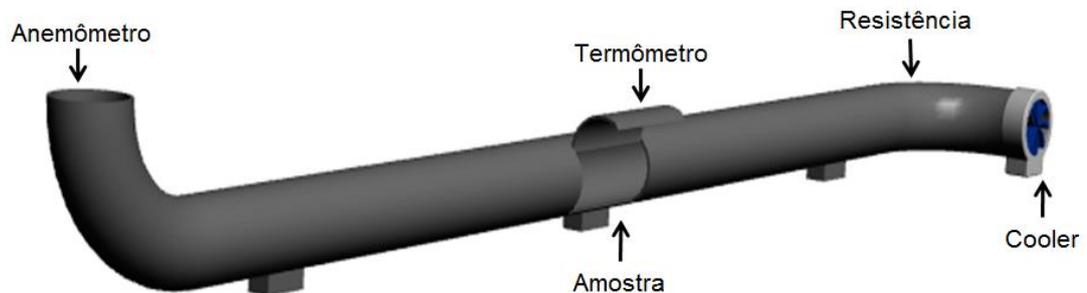


Figura 18– Aparato experimental utilizado para a secagem dos grãos de crumbe.

Foram implementadas conexões eletrônicas para possibilitar o controle e interligação da velocidade do ar, tensão da resistência elétrica e temperatura no interior do secador, para viabilizar esse sistema foi utilizada uma placa de controle, tornando possível a recepção de informações e os comandos de controle. A placa utilizada é do tipo Arduino UNO R3, possui 14 pinos de entrada/saída digital (dos quais 6 podem ser usados como saídas analógicas PWM), 6 entradas analógicas, uma conexão USB e uma entrada para alimentação. Sua voltagem operacional é de 5V, e a voltagem de alimentação recomenda é de 7 -12V (Figura 19).



Figura 19- Placa de controle Arduino UNO

Para alimentar o sistema foi utilizada uma fonte de corrente alternada, com tensão de alimentação de 12 V.

Para permitir a montagem do circuito com a interligação dos sensores, cooler e resistência elétrica com a placa de controle foi utilizada uma Protoboard,

uma matriz de contato que permite interconectar dispositivos eletrônicos, como circuitos integrados, resistores, transistores, e a ligação é feita através de encaixes simples, a *protoboard* utilizada (Figura 20) contém 830 furos, com orifícios distribuídos em linhas e colunas, sua capacidade de corrente é cerca de 1A. A placa é dividida em duas partes, possuindo uma cavidade que a separa. As colunas possuem cinco orifícios que estão conectados entre si. As linhas, por outro lado, são independentes eletricamente, ou seja, não há conexão elétrica entre os fios de uma linha e de outra.

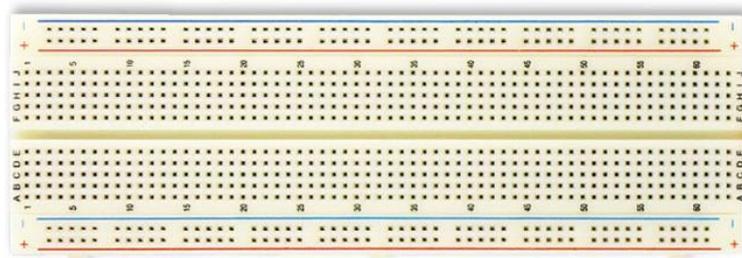


Figura 20 – *Protoboard* de 830 furos

Para realizar o controle do ventilador, foi necessário utilizar uma ponte H (Figura 21), o modelo utilizado foi um módulo de Ponte H dupla modelo L298, na qual é possível controlar dois motores DC ou um motor de passo bipolar. Com este módulo é possível controlar o sentido de rotação de motores DC de 3V a 30V. Este circuito integrado consegue lidar com 20W de potência.

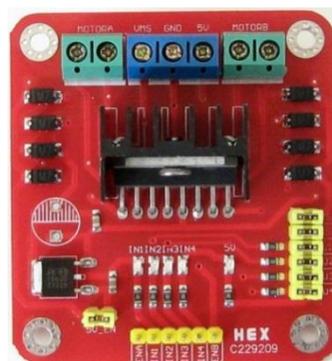


Figura 21- Ponte H L298

Uma fonte de bancada de tensão 24V foi utilizada para o acionamento do motor do ventilador. Para realizar as conexões desejadas utilizaram-se terminais de tensão. Ao final de todas as conexões executadas pode-se controlar a velocidade do ar que passa pelo secador, assim como a temperatura no seu

interior, por meio de um programa escrito através do pacote computacional Matlab, utilizando para isso um hardware do tipo notebook, processador intel core i3, memória RAM 6Gb e 500 Gb de HD.

3.3.2 Cinética de Secagem

As amostras de crambe foram retiradas do secador em intervalos pré-determinados de tempo para a determinação da massa em balança analítica (Shimadzu, AXU220, com precisão de 0,001 g), sendo recolocada no secador imediatamente após a pesagem. As amostras permaneceram no secador até atingir o equilíbrio.

Foram selecionadas três temperaturas, três velocidades para o ar de secagem e três umidades iniciais para as amostras. As combinações de temperatura, da velocidade do ar e umidade inicial das amostras foram as variáveis do experimento de determinação da cinética de secagem.

No experimento foram analisadas as temperaturas de 40°C e 60°C, a temperatura mínima foi estabelecida para garantir uma temperatura maior que a temperatura ambiente e a escolha da temperatura máxima deu-se por restrições do equipamento. As velocidades do ar foram estabelecidas em 1,5 m/s e 2,5 m/s, a escolha das velocidades do ar deu-se integralmente por restrições do *cooler*, uma vez que a velocidade máxima era de 2,5 m/s e trabalhar com velocidade abaixo de 1,5 m/s ocasionava aquecimento do motor. Para analisar a variável de umidade da amostra foram escolhidos os níveis de 24% e 38%, a escolha do teor de umidade mínimo e máximo se deu através de consulta na literatura, pela qual constatou-se que a umidade do crambe na colheita pode variar significativamente, GONÇALVES (2012) fez a colheita dos frutos com o teor de água em $27,0 \pm 1,0$ (% b.u.), PITOL *et al.* (2010) apontou que é possível fazer a colheita com umidade de sementes próximas de 15%, enquanto REGINATO (2014) afirma que é possível colher as sementes com teor de água de 40%, caso colhido com 94 dias após a semeadura, o que exigiria uma secagem artificial para o armazenamento, porém caso se aguarde mais dias para a colheita esse teor cai significativamente pela secagem natural, dependendo do clima e do solo. Dessa forma, foram selecionadas como umidade mínima e máxima, 24% e 38%, respectivamente, com um ponto central em 31%.

O experimento foi delineado através de um plano fatorial completo para 3 variáveis em 2 níveis com triplicata no ponto central. O planejamento fatorial resultou em 11 experimentos, sendo que cada nível do planejamento possui um valor codificado. Na Tabela 6 é possível ver a matriz com os níveis e seus respectivos valores decodificados.

Tabela 6 - Níveis e valores decodificados de temperatura, velocidade do ar e umidade inicial da amostra para a secagem de Crambe

Experimento	Temperatura (°C)		Velocidade do ar (m/s)		Umidade inicial da amostra (%)	
	Nível	Valores	Nível	Valores	Nível	Valores
1	-	40	-	1,0	-	24
2	-	40	+	2,0	-	24
3	+	60	-	1,0	-	24
4	+	60	+	2,0	-	24
5	-	40	-	1,0	+	38
6	-	40	+	2,0	+	38
7	+	60	-	1,0	+	38
8	+	60	+	2,0	+	38
9	0	50	0	1,5	0	31
10	0	50	0	1,5	0	31
11	0	50	0	1,5	0	31

A variável resposta analisada foi o tempo em que não havia mais variação significativa na massa da amostra, tomando-se no trabalho como o tempo de secagem. Foi tomado o tempo de secagem quando a variação de peso era inferior a 0,01 grama.

A partir dos dados obtidos experimentalmente foi realizada a análise estatística do processo de secagem obtendo o efeito de cada variável a partir da tabela de efeitos e análise de variância (ANOVA), para verificar se houve diferença significativa entre os tratamentos. Também foi utilizada a metodologia de superfície de resposta, empregando-se o software Statistica 7. O intervalo de confiança adotado para considerar o efeito estatisticamente significativo foi de 95%.

Em seguida foi obtido um modelo empírico para descrever o processo nos intervalos estudados, a partir dos efeitos de cada variável.

Posteriormente, foram testados modelos existentes na literatura, apresentados na Tabela 7.

Tabela 7- Modelos analisados para a cinética de secagem de grãos de crambe

Modelo	Expressão Matemática	
Newton	$X(t) = (X_0 - X_e)exp(-B.t) + X_e$	(26)
Newton modificado	$X(t) = A(X_0 - X_e)exp(-B.t) + X_e$	(27)
Newton modificado – potência	$X(t) = A(X_0 - X_e)exp(-B.t^n) + X_e$	(28)
Newton modificado – potência	$X(t) = (X_0 - X_e)exp(-B.t^n) + X_e$	(29)
Newton modificado – potência	$X(t) = A(X_0 - X_e)exp(-K.U_r) + (1 + exp(-B.t))X_e$	(30)
Difusivo	$X(t) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} exp[-(2n+1)^2 \cdot \pi^2 D_{ef} \cdot t \cdot (X_0 - X_e) + X_e]$	(31)

3.4 Determinação do Coeficiente de Difusividade e da Energia de Ativação

Foi utilizado o modelo da difusão com a 2ª Lei de Fick para descrever os dados de secagem e determinar o coeficiente de difusividade das sementes, conforme a Equação 32.

$$\frac{dX}{dt} = D_{ef}(\nabla^2 X) \quad (32)$$

Em que: D_{ef} é o coeficiente de difusividade efetiva (m^2/s).

Esta forma da Lei de Fick é simplificada, já que ela despreza a interdifusão, mas esta hipótese é justificada, uma vez que a água migra dentro de uma matriz fixa. Assume-se, na solução da Equação 32, as seguintes condições iniciais e de contorno:

Condição inicial, $t = 0$ e $0 \leq z \leq$ espessura (L): $X = X_0$

Condição de contorno na base do sólido, $z = 0$ e $t \geq 0$: $= 0$

Condição de contorno na superfície do sólido, $z = L$ e $t \geq 0$: $X_L = X_e$

As soluções analíticas para a condição inicial e as duas condições de contorno do sólido, respectivamente, são dadas pela Equação 33 (CRANK, 1975).

$$\frac{X(t) - X_e}{(X_0 - X_e)} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \cdot \pi^2 D_{ef} \cdot t}{4L^2}\right] \quad (33)$$

Para ajustar os parâmetros desse modelo, considerou-se que, para tempos longos de secagem, considera-se $n=1$ e a Equação 33 pode ser reduzida a apenas o primeiro termo da série, representado pela equação 34:

$$\frac{X(t) - X_e}{(X_0 - X_e)} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D_{ef} \cdot t}{4L^2}\right] \quad (34)$$

Em que: L é a metade da espessura da amostra (m).

Linearizando a essa equação, e plotando-se o gráfico de $\ln(X)$ em função do tempo obtém-se a inclinação (K_0), a partir da qual é possível determinar a difusividade efetiva (D_{ef}) para cada condição de secagem de acordo com a Equação 35.

$$K_0 = \frac{\pi^2 D_{ef}}{4L^2} \quad (35)$$

A Equação 36 foi utilizada para o cálculo da energia de ativação.

$$D_{ef} = D_0 \exp\left[-\frac{E_{act}}{RT}\right] \quad (36)$$

Em que:

D_0 é o fator pré-exponencial da equação de Arrhenius (m^2/s);

R é a constante universal dos gases ($8,314 \text{ J/mol K}$);

T é a temperatura absoluta (K) e;

E_{act} é a energia de ativação (kJ/mol).

3.5 Determinação das isotermas de equilíbrio

Para a obtenção dos dados de equilíbrio, adotou-se o método estático-gravimétrico, utilizando soluções de ácido sulfúrico.

Os experimentos de equilíbrio higroscópico foram desenvolvidos primeiramente com a umidificação artificial das amostras em 24%. Em seguida foram inseridas em recipientes plásticos com pequenos orifícios laterais e estes foram colocados de forma suspensa em recipientes de vidro, com 140 mm de altura e 85 mm de diâmetro, hermeticamente fechados e com temperatura controlada, garantindo uma atmosfera constante. A Figura 22 ilustra os recipientes utilizados nos ensaios de equilíbrio.

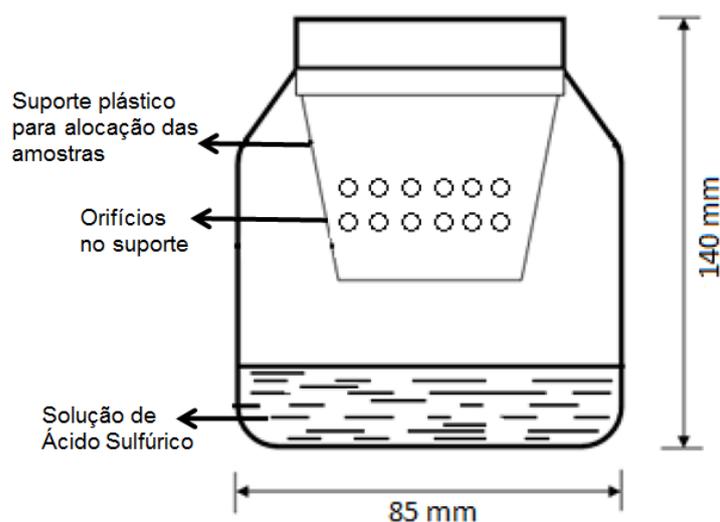


Figura 22- Recipiente utilizado nos experimentos para determinação do equilíbrio higroscópico dos grãos de crambe.

No interior de cada recipiente de vidro havia 25 ml das soluções de ácido sulfúrico, em dez concentrações diferentes, variando de 25 a 70%, em intervalos de 5%. Esta variação na concentração do ácido garantiu uma umidade relativa diferente para cada uma das concentrações. Os valores da umidade relativa correspondente a cada concentração de ácido sulfúrico são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores de U.R. para as concentrações de H₂SO₄ em função das temperaturas

Conc. H ₂ SO ₄	30°C	45°C	60°C
25%	0,817	0,824	0,830
30%	0,747	0,753	0,776
35%	0,666	0,674	0,682
40%	0,565	0,574	0,584
45%	0,461	0,470	0,488
50%	0,355	0,366	0,388
55%	0,260	0,267	0,287
60%	0,170	0,178	0,199
65%	0,097	0,102	0,124
70%	0,045	0,049	0,061

Fonte: PERRY e CHILTON (1983).

Os recipientes permaneceram em estufa de secagem (SP Labor, SP-102) e foi determinada a sua massa periodicamente até atingirem o equilíbrio, quando não havia variação significativa na massa. Utilizou-se uma massa inicial variando de 1 a 3 g. As pesagens foram realizadas semanalmente em balança analítica (Shimadzu, AUX-220, com precisão de 0,0001 g). Os experimentos foram realizados em três temperaturas diferentes, sendo 30°C, 45°C e 60°C. Os ensaios foram realizados em triplicatas.

A partir dos valores obtidos para a massa de equilíbrio e massa seca foi possível calcular as umidades de equilíbrio das amostras (X_e), conforme equação 21 e 22. Com estes resultados, foram geradas as isotermas de equilíbrio. Para determinação do equilíbrio foi utilizada uma variação máxima de 0,2% de diferença entre as duas últimas pesagens. O software Statistica 7 foi utilizado no ajuste de parâmetros dos modelos de isoterma dispostos na Tabela 9.

Tabela 9 - Modelos analisados para isotermas de sorção de grãos de crambe.

Modelo	Expressão Matemática
Luikov	$X_e = \frac{A}{1 + BT \ln\left(\frac{1}{U_r}\right)} \quad (37)$
Keey	$X_e = \frac{A}{1 + BT^3 \ln\left(\frac{1}{U_r}\right)} \quad (38)$
Henderson (1952)	$X_e = A \left(\frac{1}{T}\right) \ln\left(\frac{1}{1 - U_r}\right)^B \quad (39)$
ChungePfof	$X_e = -\frac{1}{A} \ln\left(\frac{T}{-B} \ln(U_r)\right) \quad (40)$
Henderson-Thompson	$X_e = \left(\frac{\ln\left(\frac{1}{1-U_r}\right)}{A(T+B)}\right)^{\frac{1}{C}} \quad (41)$
Halsey modificado	$X_e = \left(\frac{\exp(AT+B)}{-\ln(U_r)}\right)^C \quad (42)$
Oswin modificado	$X_e = (A + BT) \left(\frac{U_r}{1 - U_r}\right)^C \quad (43)$
Smith modificado	$X_e = (A + BT) - (C + DT)(1 - U_r)^C \quad (44)$

O método de otimização paramétrica empregado foi o Levenberg–Marquardt, com critério de convergência 10^{-6} . Os melhores modelos foram escolhidos com base nos maiores valores do coeficiente de determinação (R^2).

3.6 Sistema de controle

A malha de controle implementada foi do tipo PID. O sistema de controle foi obtido por meio do controle da tensão da resistência elétrica e a velocidade de ventilação. Para o controlador, utilizou-se uma estratégia de controle do tipo feedback.

A robustez para os sistemas de controle é desejada à medida que espera-se uma boa operação do controlador em caso de variações paramétricas e possíveis distúrbios aplicados ao sistema.

As variáveis da malha de controle implementada foram:

MV- Variável Manipulada

PV – Variável de Processo

SP – *Setpoint* desejado

A MV para a malha de controle implementada foi a velocidade do ar, a variável de processo que (PV) foi a temperatura do ar interno do secador, sendo medida através de um sensor de temperatura Ds18b20, sendo o valor desejado estabelecido como *set point* (SP), igual a 50°C. O controle feedback permitiu avaliar a saída real, comparando-a com o valor desejado (*set point*) e atuando para eliminar o erro existente entre estes valores. Para avaliação do sistema de controle foi estabelecida uma variável para ser perturbada, no caso a tensão da resistência elétrica.

O diagrama do sistema (Figura 23) representa a estrutura do controlador PID implementado. Ele é constituído por três partes, cada uma representando uma de suas ações de controle (ação proporcional, ação integral e ação derivativa). Todas elas são baseadas no sinal de erro e suas saídas são somadas resultando na saída de controle.



Figura 23- Diagrama que demonstra a estrutura do controlador PID implementado

A resistência elétrica foi controlada por um dimmer controlador de potência, conforme a Figura 24.



Figura 24- Dimmer controlador de potência para alterar a tensão da resistência elétrica

Estabelecendo a velocidade do ar inicial igual 1,5 m/s e calibrando-se o dimmer fazendo a medição da tensão elétrica através de um multímetro verificou-se os dados apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Temperaturas obtidas com variação da tensão da resistência elétrica a uma velocidade do ar constante igual a X m/s

Tensão Elétrica (V)	Temperatura do ar interno ao secador (°C)
110	40
120	50
130	60

Estabelecido o set point desejado, com a tensão da resistência elétrica em 120V e velocidade do ar igual a 1,5 m/s, após estabilização do processo o mesmo foi submetido à perturbação na resistência elétrica, sendo as perturbações realizadas em dois métodos distintos:

- 1 – Perturbar o sistema a uma tensão elétrica maior, de 120V para 130V;
- 2 – Perturbar o sistema a uma tensão elétrica menos, de 120 V para 110V.

A partir da perturbação o sistema de controle toma uma ação, através da variável manipulada (velocidade do ar), para manter a variável do processo no *set point* desejado.

Um algoritmo de controle foi implementado para calcular a saída do controlador, medida por meio do sensor de temperatura. Assim, realizaram-se testes no secador. O algoritmo de controle PID implementado é apresentado pela equação 45.

$$p_k = \bar{p} + K_c \left(e_k + \frac{\Delta t}{\tau_I} \sum_{j=1}^k e_j + \frac{\tau_D}{\Delta t} (e_k - e_{k-1}) \right) \quad (45)$$

Onde:

p_k é o novo valor da velocidade do ar;

\bar{p} é o valor inicial estabelecido para a velocidade do ar;

K_c é um parâmetro do controlador (constante proporcional);

e_k é o erro referente à diferença entre a temperatura medida e a temperatura desejada;

Δt é o intervalo de tempo de medição da temperatura;

τ_I é um parâmetro do controlador (constante integral);

τ_D é um parâmetro do controlador (constante derivativa);

e_{k-1} é o erro referente à temperatura medida e a temperatura desejada no instante de tempo anterior;

O algoritmo de controle contém parâmetros que precisam ser ajustados (K_c, τ_I, τ_D) a fim de obter melhor desempenho do sistema. Para realizar a sintonia dos parâmetros foi preciso definir o método mais adequado para o sistema. Para isso, foram utilizados os seguintes métodos para estudo:

- 1 - Método de Z&N (Ziegler e Nichols – 1942);
- 2 - Método de CC (Cohen e Coon – 1953);

Após a sintonia, foi realizada a análise de desempenho do controlador avaliando a malha de controle sintonizada pelos dois métodos. O método que obteve melhor desempenho foi utilizado para definição dos parâmetros de controle. Para a avaliação de desempenho dos sistemas de controle foram utilizados os critérios IAE e ISE, sendo considerado com melhor desempenho o controlador que apresentar menores valores de IAE e ISE.

Muitas vezes é conveniente realizar um ajuste fino após o ajuste inicial dos parâmetros, tendo em conta o desempenho do controlador. O refinamento pode

ser feito através de um ajuste manual, sendo necessário conhecer o efeito de cada ação de controle no desempenho do processo (ADÃO, 2011).

Os problemas encontrados no controlador e as medidas que devem ser tomadas para ajustá-lo são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Medidas de ajuste manual para problemas encontrados no controlador

Problema	Medida de Ajuste
Resposta muito lenta	Aumentar ganho proporcional
Resposta muito oscilatória	Aumentar tempo derivativo
Sobre passagem excessiva	Reduzir taxa integral
Resposta inicialmente rápida e em seguida muito lenta	Aumentar taxa integral

Fonte: ADÃO (2011)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos em cada experimento realizado.

4.1 Caracterização da amostra

Foi determinada a massa seca dos grãos de crambe. O teor de umidade inicial em base úmida foi obtido de acordo com a Equação (21).

$$X_{\%b.u.} = 7,01 \pm 0,2\%$$

O cálculo do teor de umidade inicial em base seca, obtido pela Equação (22), apresentou o seguinte resultado:

$$X_{b.s.} = 7,53 \pm 0,23\%$$

Através da análise granulométrica, utilizando-se da equação de Diâmetro de Sauter, foi encontrado o diâmetro médio dos grãos de crambe igual a 2,7615 mm.

A partir de experimentos foi calculada a porosidade do leito para grãos de crambe.

$$\varepsilon = 0,429724$$

A análise composição centesimal dos grãos de crambe foi realizada e os resultados estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 12 – Composição centesimal de grãos de crambe

Parâmetro	%
Umidade e Substâncias Voláteis	8,69
Resíduo Mineral fixo	7,31
Proteína Bruta	24,43
Lipídeos Totais	20,05
Fibra Bruta	33,07
Carboidratos	6,45

4.2 Cinética de Hidratação

A metodologia adotada foi proposta por COUTINHO *et al.* (2005) e adaptada por OMOTO *et al.* (2009). O banho ultratermostático foi regulado para operar a 30 °C. O experimento foi realizado em duplicata. Os resultados estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 13 – Experimento de hidratação de grãos de crambe em duplicata.

Tempo de Hidratação	MÉDIA
	Umidade (b.s.) %
1	30,68 ± 0,73 %
5	38,01 ± 3,88 %
10	38,42 ± 3,72 %
20	48,79 ± 0,65 %
30	52,16 ± 1,87 %
50	62,57 ± 9,00 %
70	65,74 ± 4,82 %
90	68,05 %
120	77,61 ± 2,91 %
150	83,10 ± 3,77 %
180	91,14 ± 8,02 %

No tempo igual a 90 minutos o resultado do segundo experimento foi descartado, devido um visível desvio no resultado.

Após a realização do experimento conforme metodologia adotada foi ajustado um modelo que determina a cinética de hidratação dos grãos através do software matemático Origin 8. O gráfico que demonstra o ajuste de um modelo polinomial aos dados experimentais da cinética de hidratação está apresentado na Figura 25. Os pontos demonstram os valores médios experimentais e a linha apresenta o modelo ajustado.

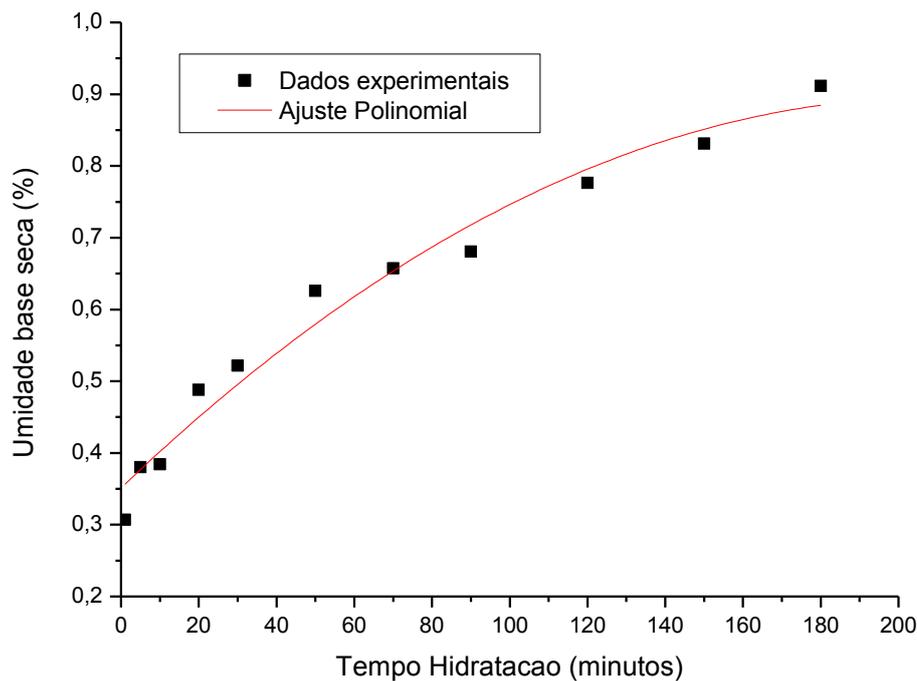


Figura 25 - Gráfico que demonstra o ajuste de modelo aos dados experimentais da cinética de hidratação de grãos de crambe

O modelo obtido para representar a cinética de hidratação, é apresentado a seguir.

$$Y(x) = -1,23E-05x^2 + 0,00518x + 0,35121$$

Sendo:

$Y(x)$ = Umidade do grão em base seca (%) em função do tempo de hidratação do grão

X = tempo de hidratação do grão (minutos)

O coeficiente de determinação do modelo encontrado foi igual a $R^2 = 0,968$, é um valor satisfatório, demonstrando que o modelo representa 96,8% dos dados experimentais.

4.3 Isotermas de sorção estáticas

Para a determinação das isotermas, foram realizadas medidas de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 30, 45 e 60°C. Com base nos dados da umidade de equilíbrio média, obtidos nos experimentos, e com a umidade relativa

para o ácido sulfúrico, em cada temperatura empregada (PERRY e CHILTON, 1983), apresentados na Tabela 8, foi possível determinar as curvas de equilíbrio.

Na Figura 26, apresenta-se as isotermas de equilíbrio de sorção nas temperaturas de 30°C, 45°C e 60°C para os grãos de crambe.

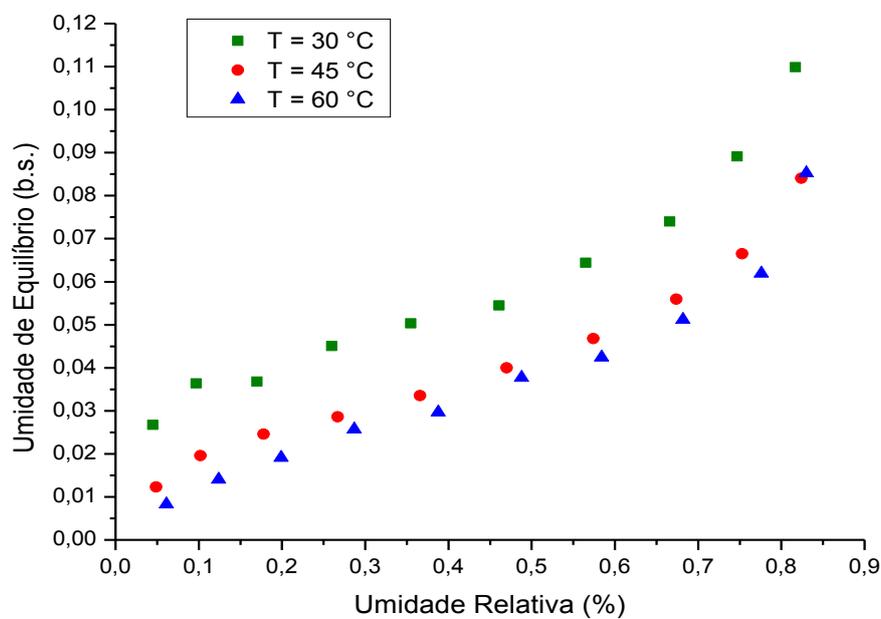


Figura 26- Isoterma de equilíbrio de sorção de água do grão de crambe nas temperaturas de 30°C, 45°C e 60°C.

As curvas apresentam comportamento típico, sendo que a análise dos dados revela que a umidade de equilíbrio diminui com o aumento da temperatura do ar em equilíbrio. Resultados semelhantes foram encontrados para outros grãos tais como ervilha (BARROZO *et al.*, 2000), trigo (CORREA *et al.*, 2005), arroz (LEHN e PINTO, 2004) e também nos grãos de crambe (COSTA *et al.*, 2015a). Este comportamento ocorre devido ao aumento da temperatura do ar que proporciona a elevação da pressão de vapor no interior das amostras, aumentando a velocidade da transferência de umidade contida no produto.

COSTA *et al.* (2013) estudaram as isotermas de dessorção dos frutos de crambe. Encontraram na pesquisa que o teor de água de equilíbrio higroscópico dos frutos de crambe é diretamente proporcional à atividade de água e decresce com o aumento de temperatura, para um mesmo valor de umidade relativa de

equilíbrio. Os modelos de Copace e Oswin Modificado obtiveram melhores resultados ao representara higroscopicidade dos frutos de crambe.

4.3.1 Ajuste dos modelos de isotermas

Os valores experimentais da umidade de equilíbrio de crambe, para as temperaturas empregadas e diversos incrementos de umidade relativa foram correlacionados, ajustados e avaliados, utilizando-se os modelos de Luikov, Keey, Henderson, Chung e Pfost, Henderson-Thompson, Halsey modificado, Oswin modificado e Smith modificado.

Os parâmetros dos modelos foram estimados para cada temperatura e calculado o desvio médio e o coeficiente de correlação (R^2). Na Tabela 16, apresentam-se os resultados do ajuste dos modelos.

Tabela 14 - Parâmetros ajustados dos modelos de equilíbrio para grãos de Crambe

MODELO	A	B	C	D	R ²
Luikov	0,138	0,065	-	-	0,979
Keey	0,098	0,000	-	-	0,896
Henderson	2,488	0,541	-	-	0,946
Halsey modificado	-0,028	-4,754	0,553	-	0,983
Oswin modificado	0,079	-0,001	0,392	-	0,975
Smith modificado	-0,157	0,000	-0,205	0,001	0,985
Chung e Pfost	Não Ajustou				
Henderson-Thompson	Não Ajustou				

De forma geral, o modelo de Smith modificado apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais, com coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,985, representando 98,5% dos dados experimentais. O ajuste do modelo Smith modificado é apresentado nas Figuras 27, 28 e 29 em que os pontos representam os dados experimentais e as linhas os resultados obtidos pela utilização do modelo.

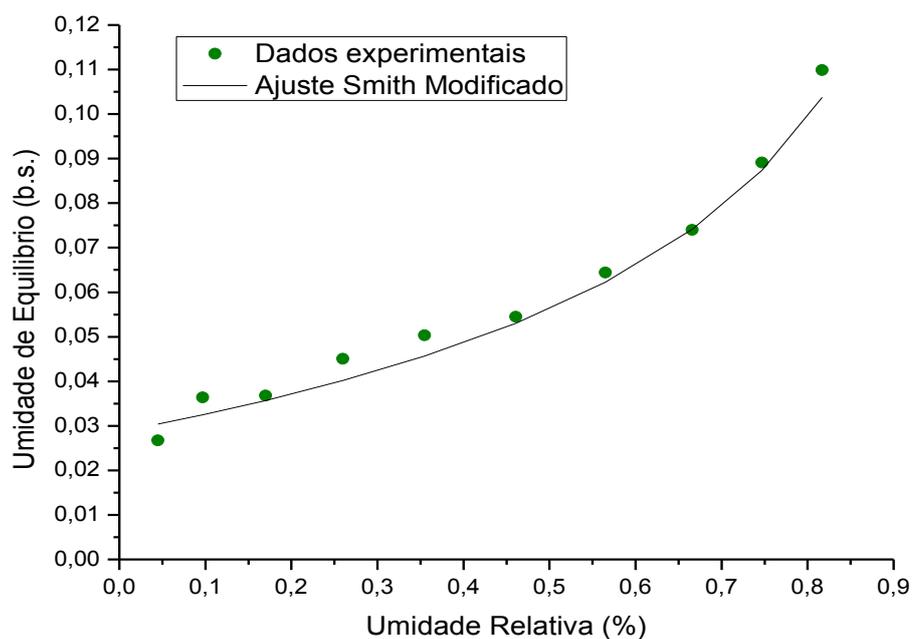


Figura 27 - Isoterma de sorção de água em grãos de crambe na temperatura de 30°C ajustada pelo modelo de Smith modificado.

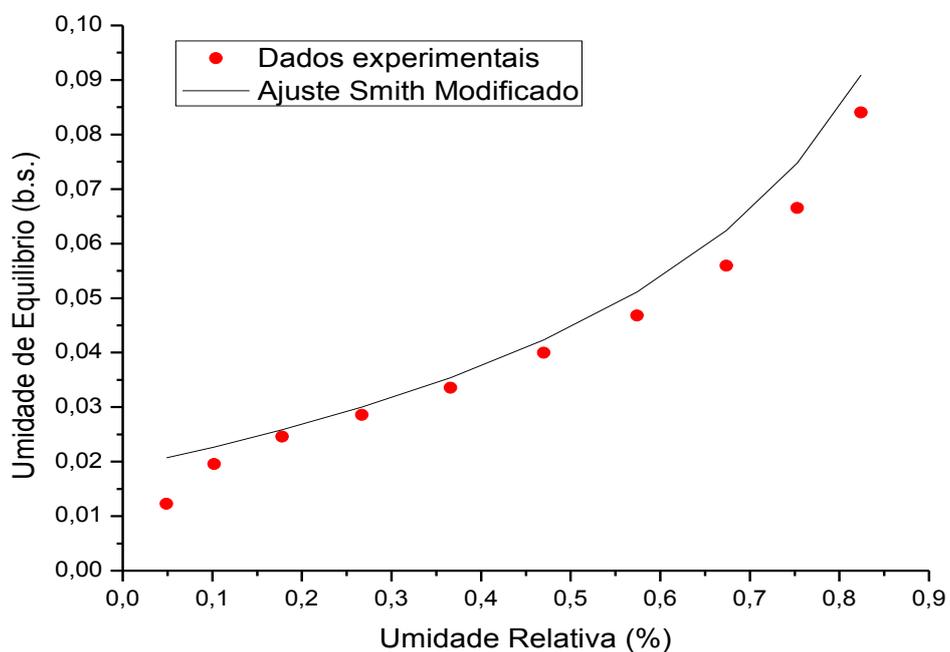


Figura 28 - Isoterma de sorção de água na temperatura de 45°C ajustada pelo modelo de Smith modificado.

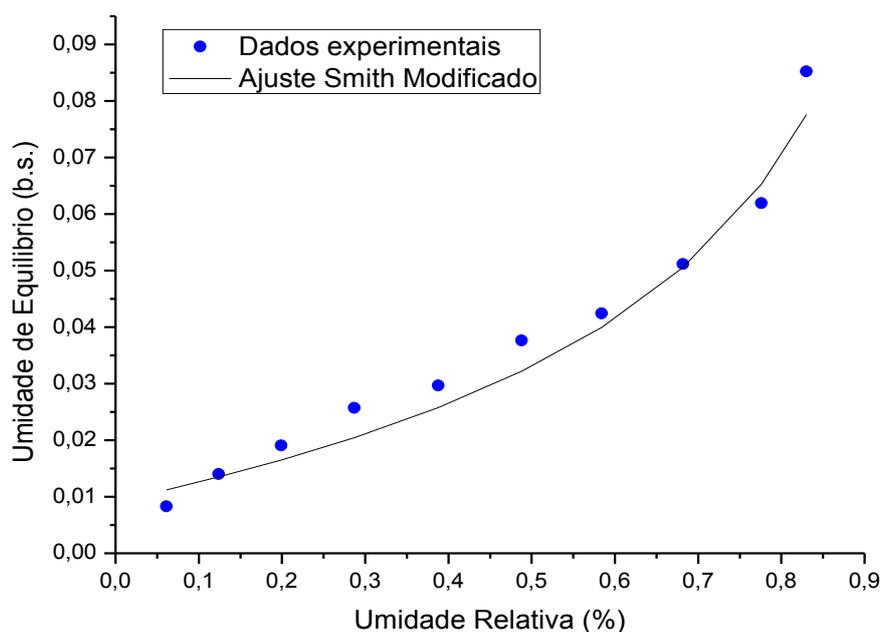


Figura 29 - Isoterma de sorção de água na temperatura de 60°C ajustada pelo modelo de Smith modificado.

4.4 Cinética de secagem

Para a determinação das curvas cinéticas de secagem, neste experimento, foram realizadas medidas de massa em função do tempo da amostra nas temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C, obtidas com a velocidade de ar de 1,5 m/s, 2,0 m/s e 2,5m/s, e variando a umidade do grão em 0,24, 0,31 e 0,38, base seca, conforme planejamento experimental. Nas curvas de secagem observa-se um efeito da temperatura sobre a taxa de secagem, ou seja, a taxa de remoção de umidade do material processado aumenta com o aumento da temperatura, alcançando-se a condição de equilíbrio mais rapidamente (Figuras 30, 31 e 32). Na temperatura de 40°C o tempo de secagem foi de até 400 minutos, à 50°C esse tempo foi reduzido para até 320 minutos, enquanto a 60° em três experimentos o tempo de secagem foi de 260 minutos e um experimento com 320 minutos.

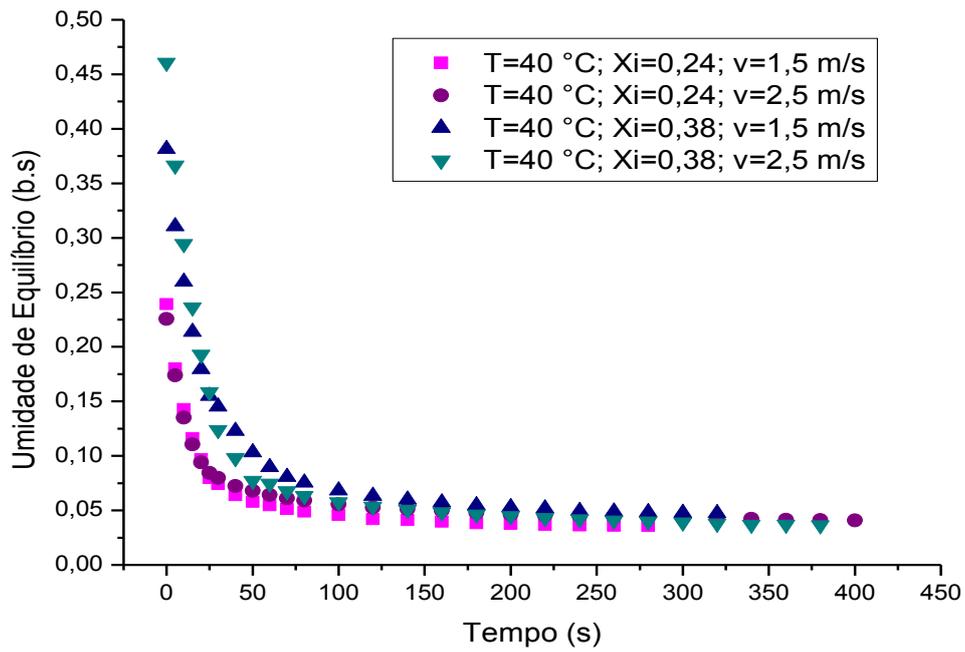


Figura 30 - Curvas de secagem para grãos de crambe à temperatura de 40°C.

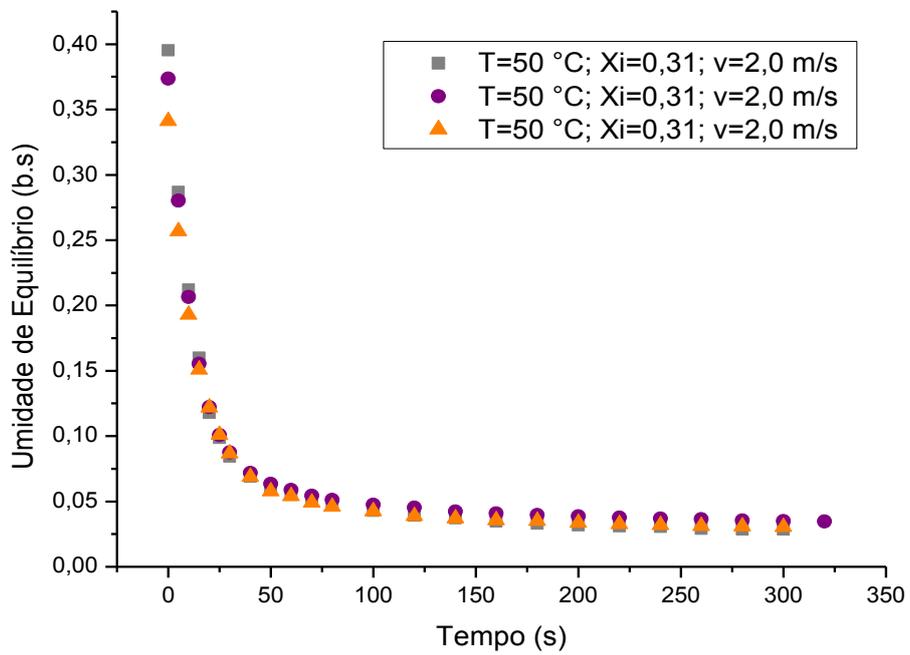


Figura 31 - Curvas de secagem para grãos de crambe à temperatura de 50°C.

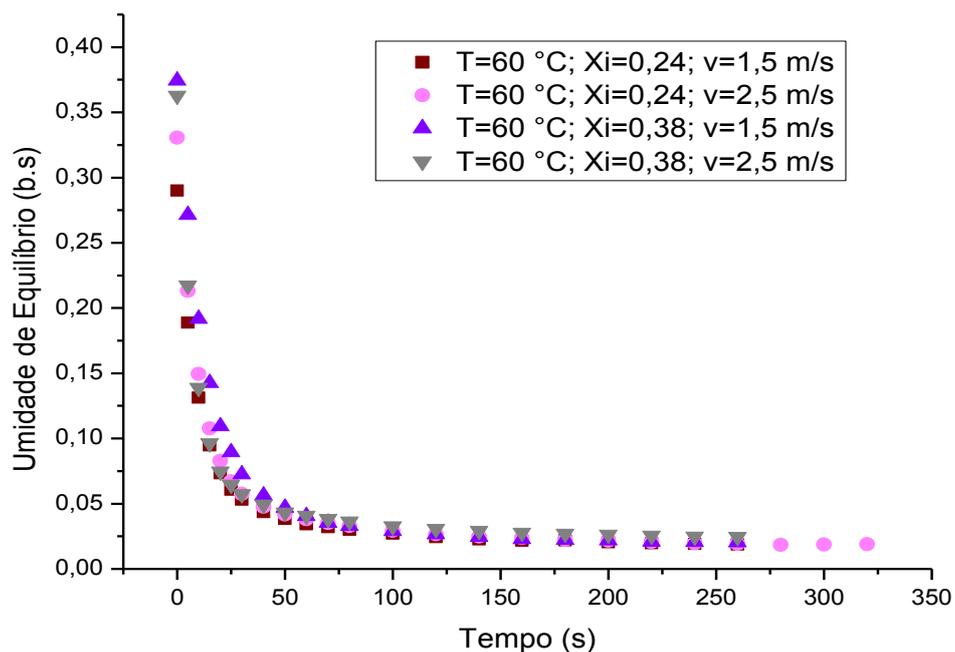


Figura 32 - Curvas de secagem para grãos de crambe à temperatura de 60°C.

4.4.1 Avaliação dos efeitos das variáveis operacionais sobre a cinética de secagem

A análise dos resultados obtidos para a cinética de secagem, tendo como resposta o tempo de secagem em minutos (tempo para umidade entrar em equilíbrio) foi realizada através de métodos estatísticos utilizando-se o programa STATISTIC versão 7.0 de acordo com o planejamento fatorial 2^3 com três repetições no ponto central. Os resultados seguem na Tabela 17.

Tabela 15 – Tempo de secagem dos experimentos para obtenção da cinética de secagem

Experimento	Temperatura -T (°C)	Velocidade do ar - V (m/s)	Umidade do Grão -U (% b.s.)	Variável Resposta (min)
1	40	1,5	24	280
2	40	2,5	24	400
3	60	1,5	24	260
4	60	2,5	24	320
5	40	1,5	38	320
6	40	2,5	38	380
7	60	1,5	38	260
8	60	2,5	38	260
9	50	2	31	300
10	50	2	31	320
11	50	2	31	300

Os resultados dos efeitos de cada variável sobre o processo de secagem pode ser visualizado no gráfico de Pareto na figura 33. Nesse gráfico interpreta-se como um efeito significativo apenas os fatores que ultrapassam a linha sublinhada do p-valor igual a 0,05.

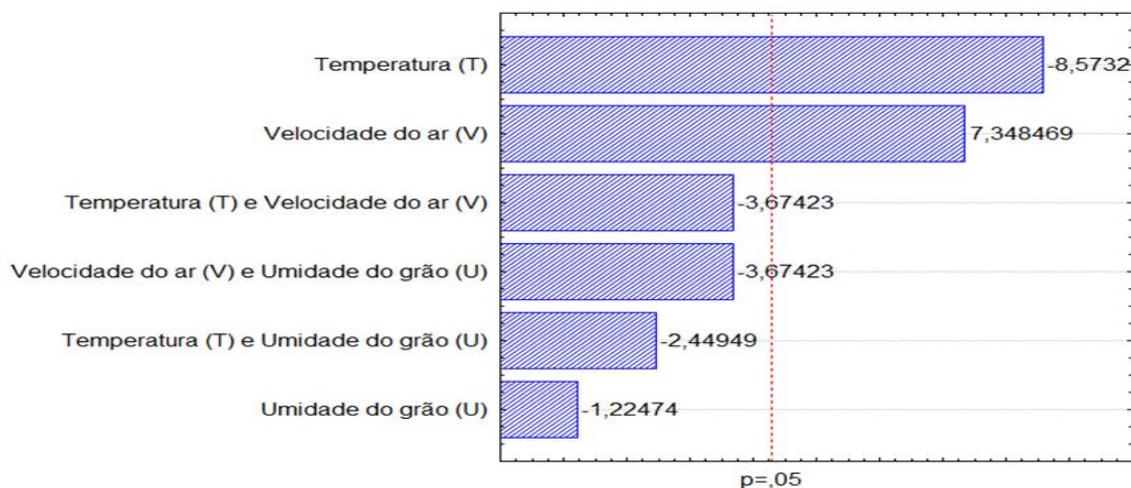


Figura 33 – Gráfico de Pareto dos efeitos de cada variável sobre o tempo de secagem

Através da análise de variância (ANOVA), utilizando-se o erro puro na análise foram identificados os fatores significativos, que apresentaram p-valor abaixo de 0,05, conforme Tabela 18. É possível concluir pelos resultados que a falta de ajuste não foi significativa, demonstrando que houve ajuste do modelo empírico e confirmando que este pode prever os dados experimentais.

Tabela 16 – Análise de Variância dos dados experimentais de secagem

Fatores	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	p-valor
Temperatura (T)	9800,00	1	9800,000	73,50000	0,013334
Velocidade do ar (V)	7200,00	1	7200,000	54,00000	0,018019
Umidade do grão (U)	200,00	1	200,000	1,50000	0,345346
T x V	1800,00	1	1800,000	13,50000	0,066743
T x U	800,00	1	800,000	6,00000	0,133975
V x U	1800,00	1	1800,000	13,50000	0,066743
Falta de Ajuste	24,24	2	12,121	0,09091	0,916667
Erro Puro	266,67	2	133,333		
Total Soma Quadrática	21890,91	10			

O parâmetro é considerado significativo quando p-valor < 0,05. Alguns efeitos avaliados não foram considerados significativos no modelo: a umidade inicial do grão (U), assim como as interações entre os três fatores analisados.

Logo, é possível ignorar esses fatores para análise dos efeitos e apresentação do modelo empírico.

A Tabela 19 apresenta os efeitos significativos, para um modelo de 1ª ordem, considerando o nível de confiança de 95%, considerando o erro puro na análise.

Tabela 17 – Tabela de efeitos para os fatores significativos para um modelo de 1ª ordem

Efeitos Estimados: R² = 0,77658; Ajuste: 0,72072				
Fatores	Desvio Padrão		t(4)	p-valor
	Efeito	Erro puro		
Média/Interação	309,0909	3,481553	88,77960	0,000127
Temperatura (T)	-70,0000	8,164966	-8,57321	0,013334
Velocidade do ar (V)	60,0000	8,164966	7,34847	0,018019

O modelo empírico tem caráter preditivo pois a falta de ajuste foi considerada não-significativa estatisticamente, porém o valor do coeficiente de determinação do modelo, R² não é considerado um valor excelente, sendo o R² igual a 0,77658 e o R² ajustado igual a 0,72072.

Uma análise de curvatura foi realizada e os resultados são apresentados na Tabela 20, demonstrando que a curvatura não é estatisticamente significativa e, portanto o modelo se mantém como um modelo de 1ª ordem.

Tabela 18 – Análise de curvatura sobre o modelo

Fatores	Desvio Padrão		t(4)	p	Limite Confiança (-95%)	Limite Confiança (+95%)
	Efeito	Erro puro				
Média/Interação	310,0000	4,08248	75,93418	0,000173	292,434	327,5655
Curvatura	-6,6667	15,63472	-0,42640	0,711325	-73,937	60,6041
Temperatura (T)	-70,0000	8,16497	-8,57321	0,013334	-105,131	-34,8690
Velocidade do ar (V)	60,0000	8,16497	7,34847	0,018019	24,869	95,1310

A Tabela 21 mostra o cálculo do Teste F para análise da validação do modelo.

Tabela 19 – Cálculo do Teste F para validação do modelo.

Fonte	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Teste F
Entre Grupos (Variáveis do processo)	21600	6	3600	49,49985
Dentro Grupos (Resíduos)	290,91	4	72,7275	
TOTAL	21890,91	10		

O valor de F calculado encontrado foi igual a 49,5. Encontrando o F tabelado para um nível de significância de 0,05, com 6 graus de liberdade no numerador e 4 graus e liberdade no denominador, o valor de F tabelado é igual a 6,16. Sendo F calculado > F tabelado é possível confirmar a validação do modelo empírico. O modelo empírico encontrado:

$$Y = -35T + 30V + 309,09$$

Sendo:

Y = Tempo de secagem do material (minutos), considerado o tempo para o material entrar em equilíbrio com o meio;

T = Temperatura do ar (°C)

V = Velocidade do ar (m/s)

Esse modelo apresenta um efeito negativo da temperatura (T) sobre o tempo de secagem (Y), demonstrando que ao aumentar a temperatura do ar o tempo de secagem diminui, por isso a variável a temperatura apresenta sinal negativo no modelo. Por outro lado a variável velocidade do ar (V) também influencia significativamente no tempo de secagem, porém com efeito positivo, ou seja, ao aumentar a velocidade do ar o tempo de secagem também aumenta. Esse resultado não é comumente encontrado em estudos científicos.

A superfície de resposta do modelo segue na Figura 34, demonstrando o efeito da temperatura e velocidade do ar sobre o tempo de secagem do material.

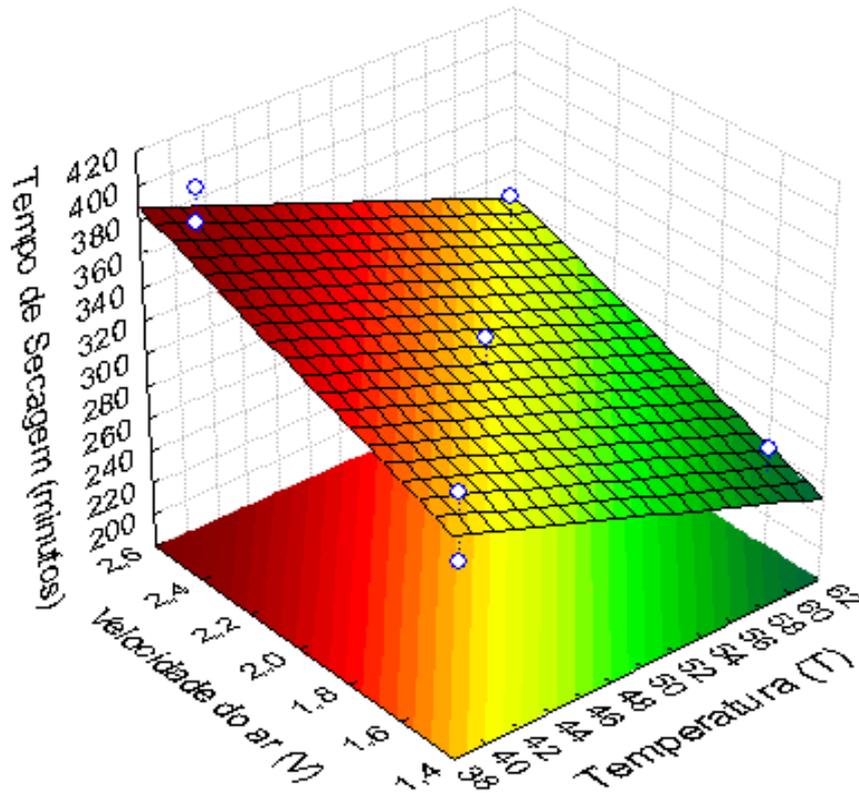


Figura 34 – Superfície de Resposta dos dados experimentais da cinética de secagem

Alguns autores pesquisaram o efeito da temperatura e da velocidade do ar no processo de secagem. Todas as fontes pesquisadas demonstraram que a temperatura tem forte influência no tempo de secagem (D VELIC et al, 2014; KONGKIATTISAK e SONGSERMPONG, 2012; NDUKWU, 2009), independente da velocidade do ar empregada. Estudos mais aprofundados demonstraram a influência da velocidade do ar apenas em determinadas temperaturas, além disso os resultados de algumas pesquisas (SEVERO, 1989; PĚNIČKA, 2010) demonstraram claramente que a velocidade do ar tem influência quando a umidade inicial do produto é alta, ou seja quando a água livre próxima da superfície é abundante, próximo ao fim da secagem, quando o processo de difusão está limitado, o aumento na velocidade do ar não diminui o tempo de secagem, sendo ineficaz e inclusive um desperdício energético no processo.

Severo (1989) em seu estudo de secagem da madeira demonstrou que maiores velocidades do ar induzem a um aumento na taxa de secagem. No entanto o acréscimo causado pela velocidade do ar para temperatura de 50°C

não foi estatisticamente significativa e para temperatura de 80°C o efeito da velocidade do ar somente é sentido na fase inicial da secagem. O efeito da velocidade do ar foi mais significativo na temperatura de 110°C, mas também apenas no início da secagem.

Pěnička (2010) pesquisou a influência da temperatura e da velocidade do ar de secagem sobre a cinética de secagem de um produto alimentício próprio da região tchecoslováquia. Foram analisadas temperaturas de 40°C e 70°C e velocidade do ar de secagem de 1,1 ms⁻¹ e de 2,5 ms⁻¹. Na temperatura de 70°C a velocidade do ar não teve influência significativa no tempo de secagem. Além disso, a cinética demonstrou que o aumento da velocidade do ar de secagem reduz o tempo de secagem especialmente no primeiro estágio de secagem, não sendo significativa nos demais estágios.

Ndukwu (2009) pesquisou a secagem de sementes de cacau e demonstrou que a taxa de secagem aumenta com a temperatura de secagem e a velocidade do ar, porém essa taxa de secagem diminuiu com o tempo.

Rodrigues et al (2002) avaliaram a influência da temperatura e velocidade do ar na secagem de goiaba e concluíram que A temperatura é o fator controlador do processo de secagem e que a velocidade do ar de secagem apenas tem uma pequena influência quando trabalhadas nas faixas de temperaturas maiores que 100°C e 2,0 m.s⁻¹.

4.4.2 Ajuste dos modelos de cinética de secagem

Com o objetivo de obter equações que descrevam a cinética de secagem de crambe, foram analisados os resultados de ajuste dos modelos de Newton, Newton modificado, Newton modificado – potência com dois parâmetros ajustados, Newton modificado - potência com três parâmetros ajustados e Difusivo nas diferentes condições de temperatura, de modo a se obter o que melhor descreve o processo, com base nos menores desvios médios e os maiores coeficientes de correlação (R^2) entre os valores preditos e os experimentais. Vale salientar que existem outros modelos, mais complexos, que também descrevem a cinética de secagem. Entretanto, a maior complexibilidade do modelo exige um maior esforço computacional para sua resolução. Desta

forma, os modelos empíricos e com solução analítica ainda são os mais utilizados para prever o comportamento do processo.

Com o auxílio do software Statística 7, foram testados modelos existentes na literatura. Verificou-se qual melhor se ajustou ao conjunto de dados obtidos, a partir dos valores de R^2 .

Nas Tabelas 21, 22 e 23 são apresentados os parâmetros de ajustes para cada modelo analisado, assim como o coeficiente de correlação, para as temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C, respectivamente.

Tabela 20 - Parâmetros ajustados dos modelos de secagem para grãos de crambe à temperatura de 40°C

MODELO	T (°C)	V (m/s)	UMIDADE (% b.s.)	A	B	N	K	Deff (m ² /min)	R ²	R ² médio
Newton	40	1,5	24		0,0580				0,992	0,990
	40	2,5	24		0,0561				0,978	
	40	1,5	38		0,0415				0,994	
	40	2,5	38		0,0489				0,997	
Newton modificado	40	1,5	24	0,9617	0,0553				0,992	0,991
	40	2,5	24	0,9398	0,0516				0,979	
	40	1,5	38	0,9580	0,0392				0,995	
	40	2,5	38	0,9892	0,0483				0,997	
Newton modificado - potência 1	40	1,5	24	1,0000	2,9272	6,2972			0,436	0,337
	40	2,5	24	1,0000	3,5580	4,2894			0,442	
	40	1,5	38	1,0000	1,6684	8,3435			0,079	
	40	2,5	38	1,0000	2,8085	5,9883			0,390	
Newton modificado - potência 2	40	1,5	24		0,1157	0,7627			0,997	0,996
	40	2,5	24		0,1686	0,6226			0,993	
	40	1,5	38		0,0787	0,7996			0,998	
	40	2,5	38		0,0653	0,9052			0,997	
Newton modificado - potência 3	40	1,5	24	0,0946	0,0282		-	0,6120	0,599	0,564
	40	2,5	24	0,1029	0,0218		-	0,0323	0,678	
	40	1,5	38	0,1288	0,0209		-	0,3931	0,545	
	40	2,5	38	0,1214	0,0203		-	0,3233	0,434	
Difusivo	40	1,5	24					1,39E-07	0,981	0,980
	40	2,5	24					1,31E-07	0,972	
	40	1,5	38					9,78E-08	0,984	
	40	2,5	38					1,18E-07	0,983	

Tabela 21 - Parâmetros ajustados dos modelos de secagem para grãos de crambe à temperatura de 50°C

MODELO	T (°C)	V (m/s)	UMIDADE (% b.s.)	A	B	N	K	Deff (m ² /min)	R ²	R ² médio
Newton	50	2	31		0,0657				0,994	
	50	2	31		0,0644				0,995	0,995
	50	2	31		0,0592				0,996	
Newton modificado	50	2	31	0,98	0,0643				0,995	
	50	2	31	0,986	0,0634				0,995	0,995
	50	2	31	0,976	0,0575				0,996	
Newton modificado - potência 1	50	2	31	1	3,5989	4,967			0,536	
	50	2	31	1	3,6361	4,794			0,532	0,515
	50	2	31	1	3,1471	5,828			0,477	
Newton modificado - potência 2	50	2	31		0,1066	0,827			0,997	
	50	2	31		0,0966	0,855			0,997	0,997
	50	2	31		0,0965	0,831			0,998	
Newton modificado - potência 3	50	2	31	0,12	0,0273		-0,303		0,413	
	50	2	31	0,118	0,0266		-0,133		0,470	0,448
	50	2	31	0,131	0,0262		-0,148		0,460	
Difusivo	50	2	31					1,60E-07	0,981	
	50	2	31					1,57E-07	0,981	0,982
	50	2	31					1,43E-07	0,983	

Tabela 22 - Parâmetros ajustados dos modelos de secagem para grãos de crambe à temperatura de 60°C

MODELO	T (°C)	V (m/s)	UMIDADE (% b.s.)	A	B	N	K	Deff (m ² /min)	R ²	R ² médio
Newton	60	1,5	24		0,0807				0,992	0,993
	60	2,5	24		0,0803				0,992	
	60	1,5	38		0,0795				0,994	
	60	2,5	38		0,1003				0,992	
Newton modificado	60	1,5	24	0,969	0,0779				0,993	0,994
	60	2,5	24	0,951	0,0773				0,993	
	60	1,5	38	0,984	0,0658				0,997	
	60	2,5	38	0,976	0,0978				0,993	
Newton modificado - potência 1	60	1,5	24	1	4,2580	3,923			0,635	0,640
	60	2,5	24	1	4,6145	2,917			0,653	
	60	1,5	38	1	3,3528	5,813			0,540	
	60	2,5	38	1	5,1388	2,206			0,731	
Newton modificado - potência 2	60	1,5	24		0,1571	0,749			0,997	0,997
	60	2,5	24		0,1596	0,742			0,997	
	60	1,5	38		0,0985	0,863			0,998	
	60	2,5	38		0,1913	0,74			0,997	
Newton modificado - potência 3	60	1,5	24	0,12	0,0335		-0,19		0,389	0,379
	60	2,5	24	0,113	0,0280		-0,108		0,372	
	60	1,5	38	0,126	0,0304		-0,329		0,354	
	60	2,5	38	0,112	0,0391		-0,073		0,399	
Difusivo	60	1,5	24					1,97372E-07	0,981	0,981
	60	2,5	24					1,9608E-07	0,981	
	60	1,5	38					1,64162E-07	0,983	
	60	2,5	38					2,48122E-07	0,979	

Dentre os modelos avaliados, verificou-se que o modelo de Newton modificado - potência 2 com ajuste de dois parâmetros foi o que melhor se ajustou aos dados observados para as temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C, apresentando um coeficiente de correlação superior a 99,5%, o que significa um bom ajuste do modelo para representação do fenômeno de secagem.

Para ilustrar a representatividade do modelo de Newton modificado - potência 2 ajustado aos dados experimentais, apresentam-se, nas Figuras 35 a 45 as curvas de umidade em função do tempo.

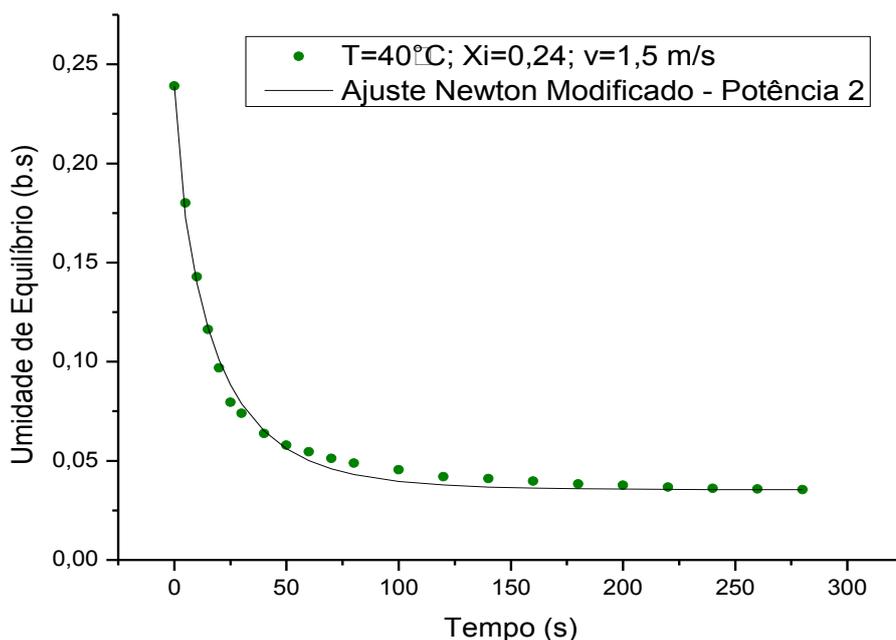


Figura 35 - Curva de secagem de grãos de crame na temperatura de 40°C , velocidade de ar de $1,5\text{m/s}$, umidade do grão de $0,24$, ajustadas pelo modelo Newton modificado – Potência 2 com dois parâmetros ajustados (B e N).

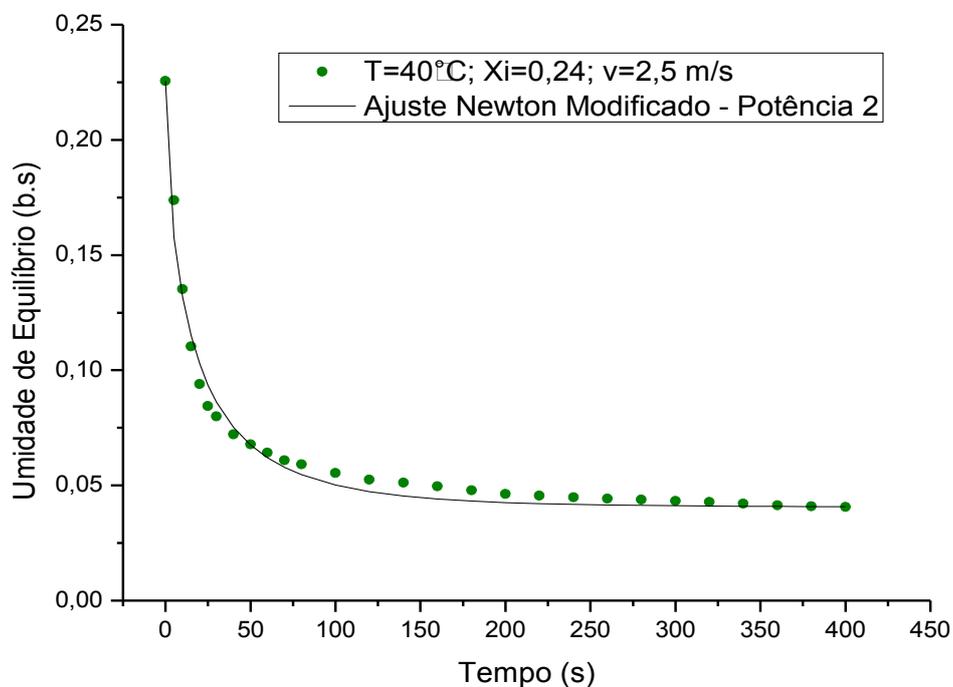


Figura 36 - Curva de secagem de grãos de crame na temperatura de 40°C , velocidade de ar de $2,5\text{m/s}$, umidade do grão de $0,24$, ajustadas pelo modelo Newton modificado – Potência 2 com dois parâmetros ajustados (B e N).

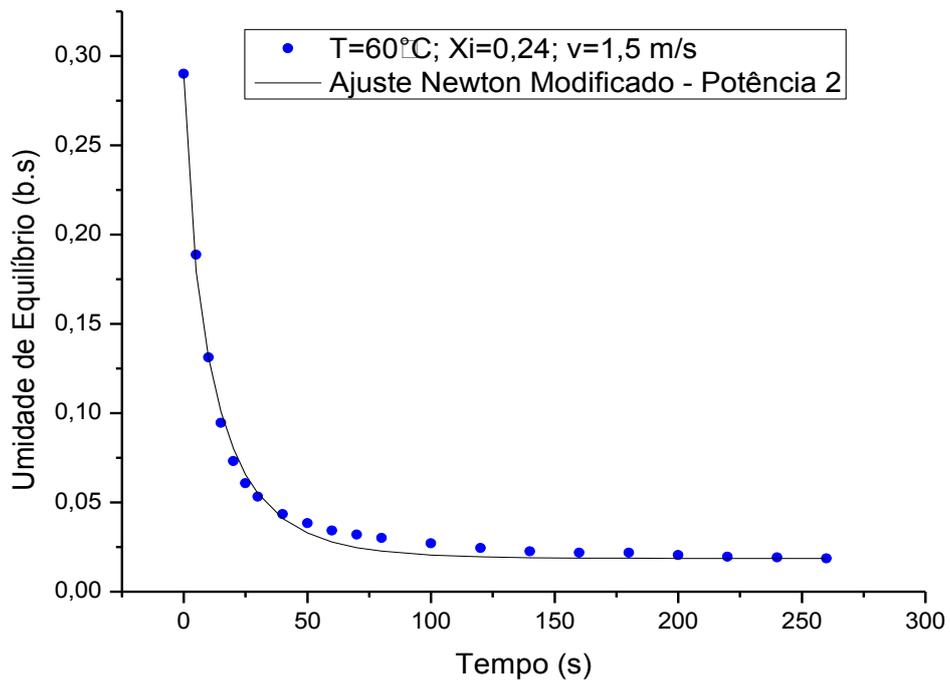


Figura 37 - Curva de secagem de grãos de crumbe na temperatura de 60°C, velocidade de ar de 1,5m/s, umidade do grão de 0,24, ajustadas pelo modelo Newton modificado – Potência 2 com dois parâmetros ajustados (B e N).

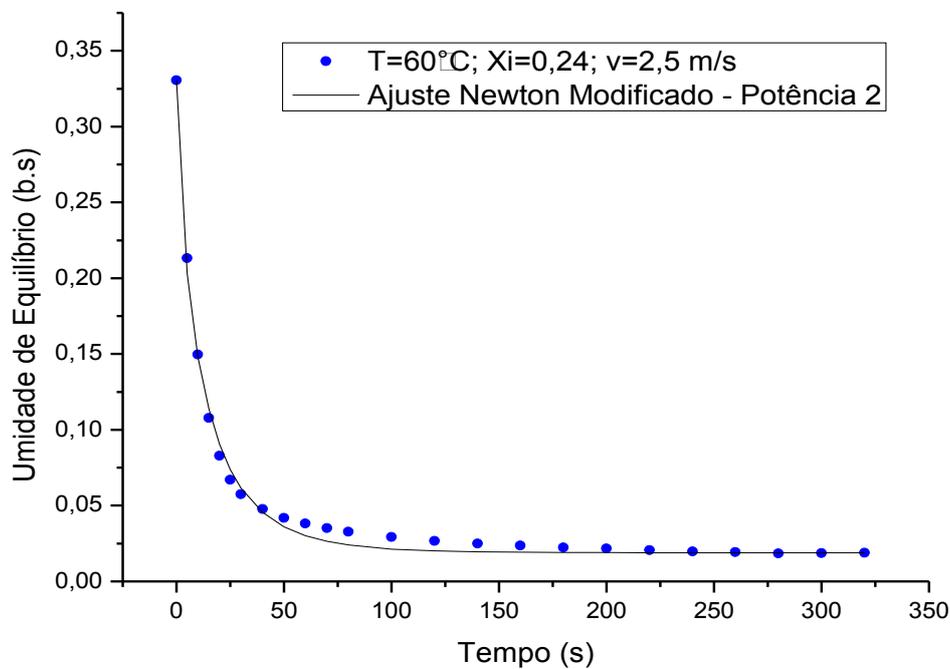


Figura 38 - Curva de secagem de grãos de crumbe na temperatura de 60°C, velocidade de ar de 2,5m/s, umidade do grão de 0,24, ajustadas pelo modelo Newton modificado – Potência 2 com dois parâmetros ajustados (B e N).

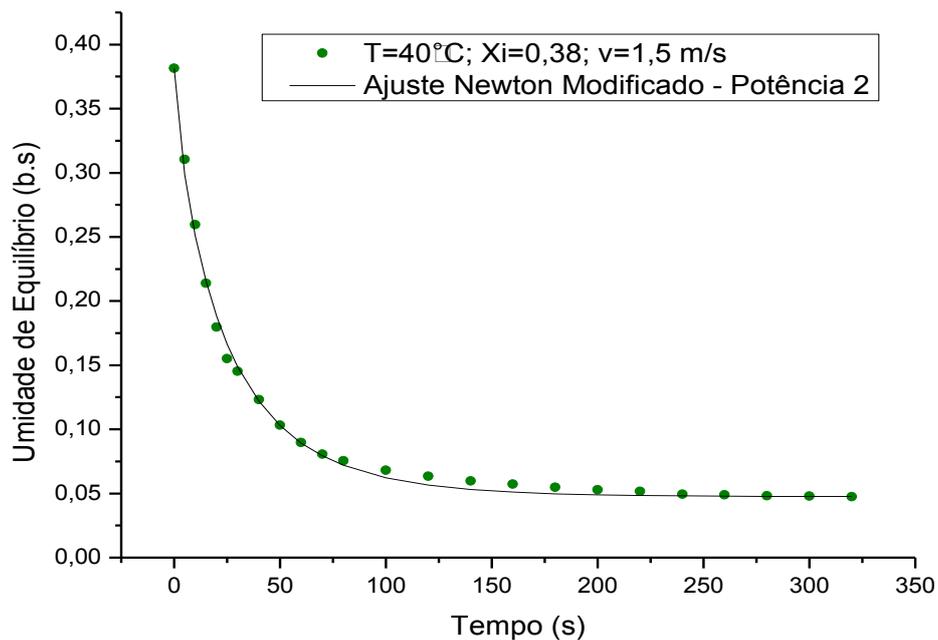


Figura 39 - Curva de secagem de grãos de crambe na temperatura de 40°C , velocidade de ar de $1,5\text{m/s}$, umidade do grão de $0,38$, ajustadas pelo modelo Newton modificado – Potência 2 com dois parâmetros ajustados (B e N).

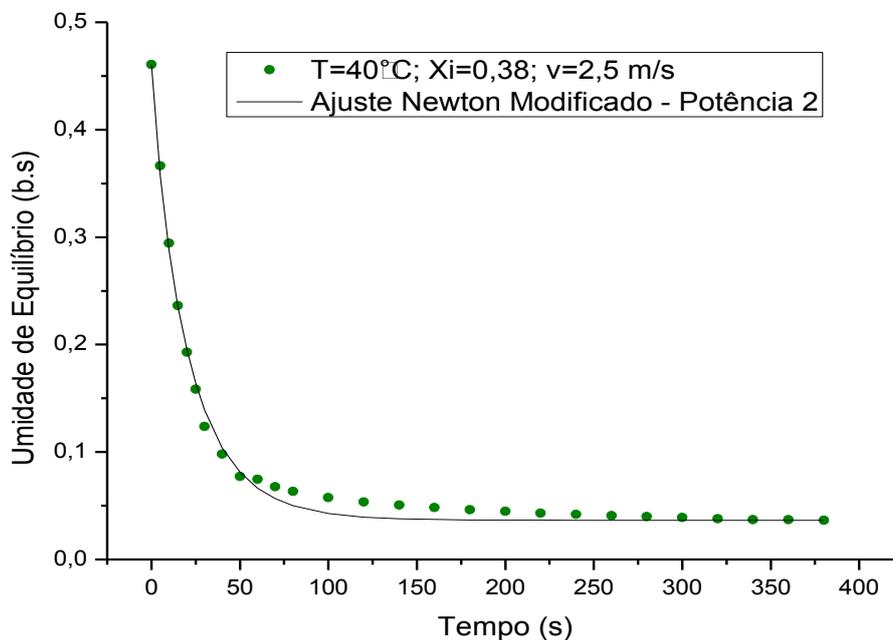


Figura 40 - Curva de secagem de grãos de crambe na temperatura de 40°C , velocidade de ar de $2,5\text{m/s}$, umidade do grão de $0,38$, ajustadas pelo modelo Newton modificado – Potência 2 com dois parâmetros ajustados (B e N).

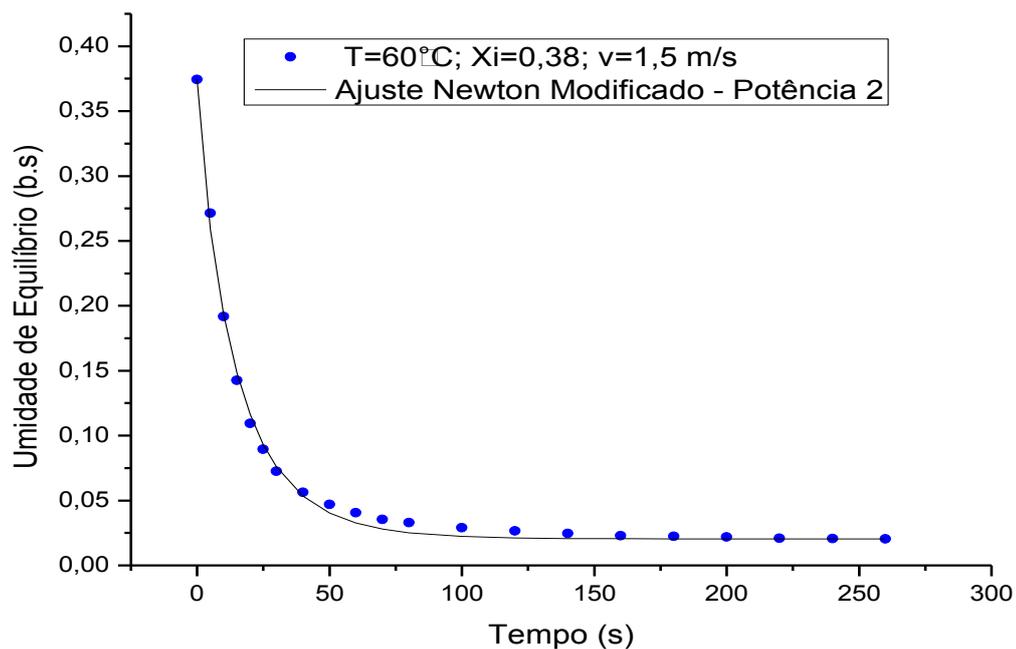


Figura 41 - Curva de secagem de grãos de crumbe na temperatura de 60°C, velocidade de ar de 1,5m/s, umidade do grão de 0,38, ajustadas pelo modelo Newton modificado – Potência 2 com dois parâmetros ajustados (B e N).

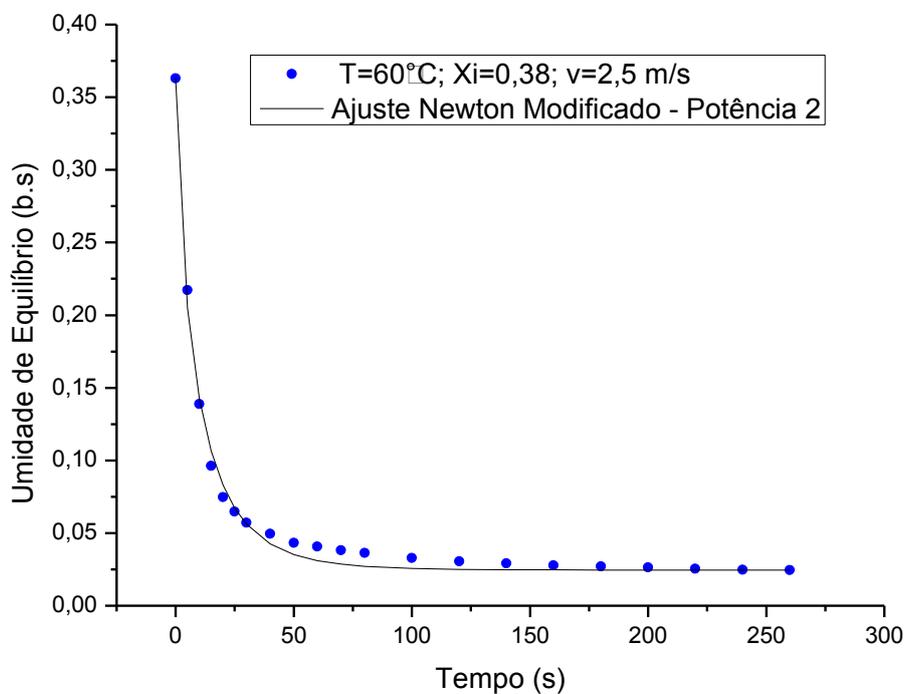


Figura 42 - Curva de secagem de grãos de crumbe na temperatura de 60°C, velocidade de ar de 2,5m/s, umidade do grão de 0,38, ajustadas pelo modelo Newton modificado – Potência 2 com dois parâmetros ajustados (B e N).

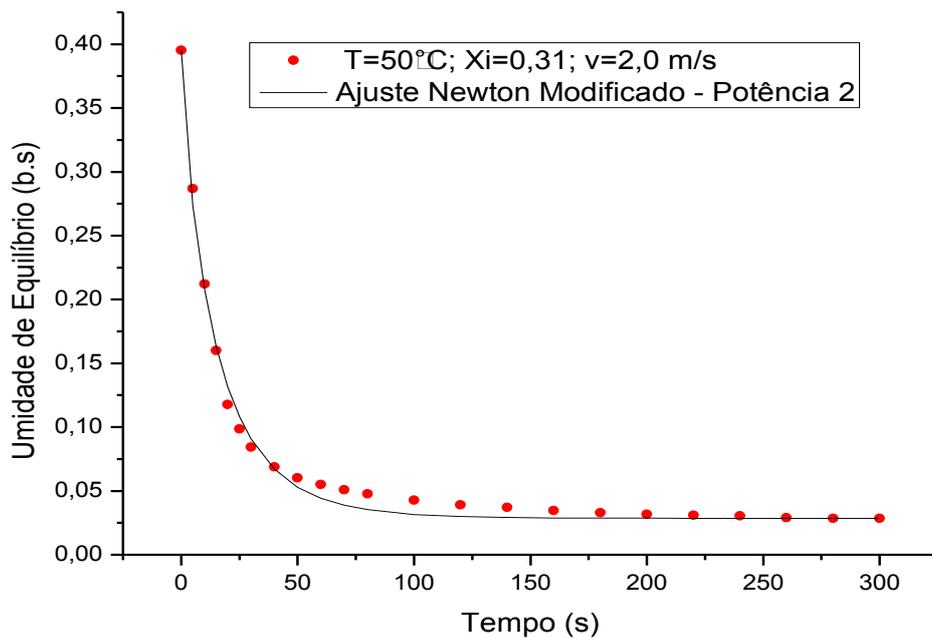


Figura 43 - Curva de secagem de grãos de crumbe na temperatura de 50°C , velocidade de ar de $2,0\text{m/s}$, umidade do grão de $0,31$, ajustadas pelo modelo Newton modificado – Potência 2 com dois parâmetros ajustados (B e N).

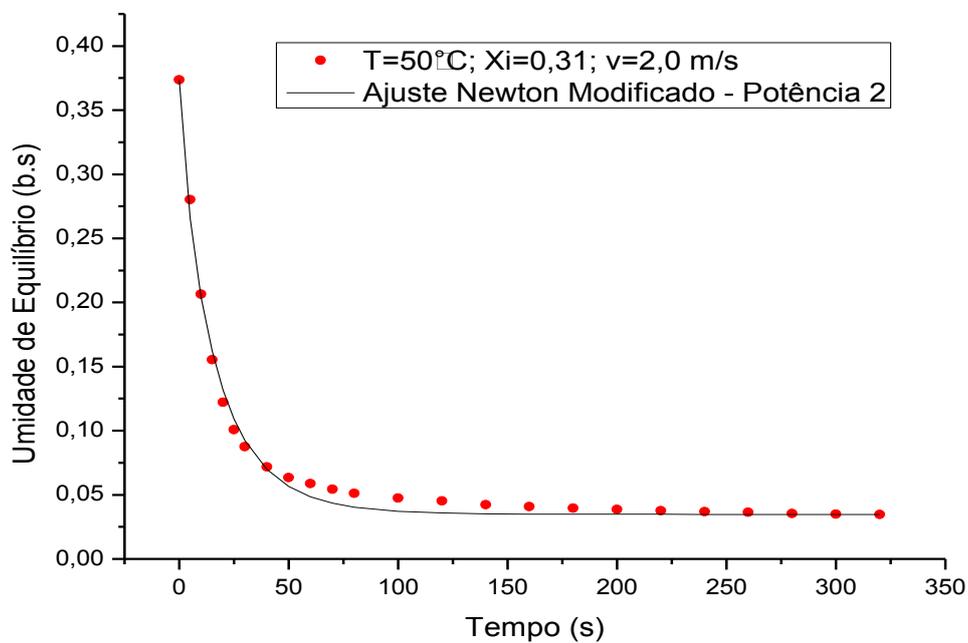


Figura 44 - Curva de secagem de grãos de crumbe na temperatura de 50°C , velocidade de ar de $2,0\text{m/s}$, umidade do grão de $0,31$, ajustadas pelo modelo Newton modificado – Potência 2 com dois parâmetros ajustados (B e N).

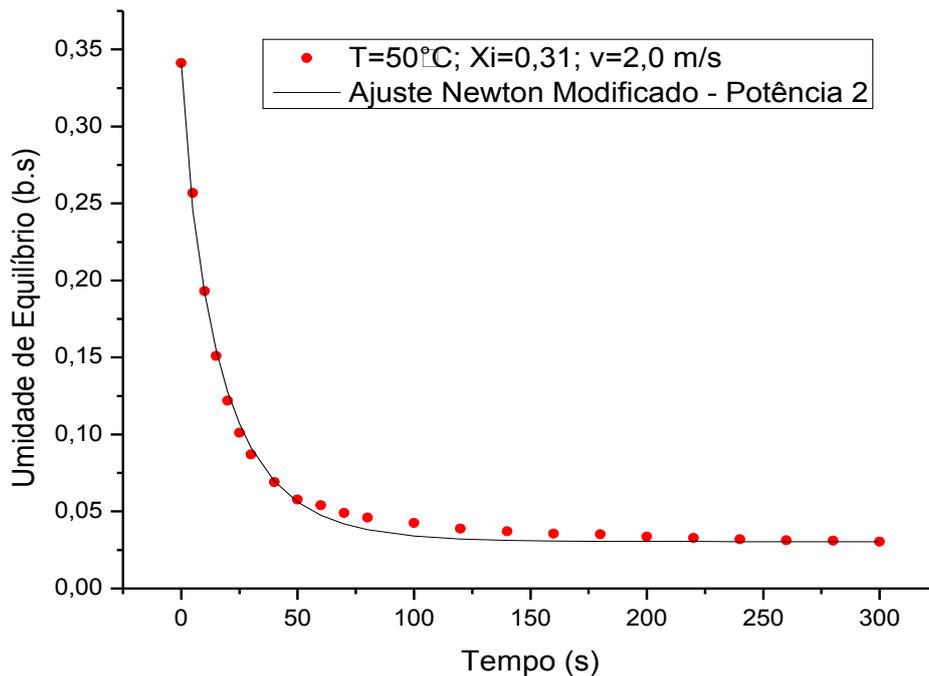


Figura 45 - Curva de secagem de grãos de crambe na temperatura de 50°C, velocidade de ar de 2,0m/s, umidade do grão de 0,31, ajustadas pelo modelo Newton modificado – Potência 2 com dois parâmetros ajustados (B e N).

Costa et al (2011) ajustaram modelos matemáticos à secagem de grãos de crambe, em estufa com ventilação forçada. Dentre os modelos analisados para representar a secagem das sementes de crambe, o modelo de Wang e Singh foi o que melhor se ajustou aos dados nas diferentes condições de secagem.

Faria et al (2012) estudaram o processo de secagem de crambe por meio de um secador de leito fixo, horizontal, com ventilação de ar forçada. Dentre os modelos testados, o da Aproximação por Difusão representou satisfatoriamente o processo de secagem das sementes do crambe.

Costa et al (2015b) realizaram o ajuste matemático para secagem de crambe em estufa com ventilação forçada, analisando os resultados, concluíram que, com base em parâmetros estatísticos, o modelo de Page foi selecionado para representação da secagem dos frutos de crambe.

4.5 Difusividade Efetiva

O conhecimento do coeficiente de difusão (D_{eff}) é de fundamental importância para o estudo da cinética de secagem do produto, uma vez que representa a maior ou menor dificuldade do fluido (água) a ser evaporada do produto interno para a superfície. Os valores dos coeficientes de difusão para cada experimento realizado estão expostos da tabela 24.

Tabela 23 – Valores dos coeficientes de difusão para cada experimento.

Experimento	T (°C)	D_{eff}
1	40	1,39E-07
2	40	1,31E-07
3	60	1,97E-07
4	60	1,96E-07
5	40	9,78E-08
6	40	1,18E-07
7	60	1,64E-07
8	60	2,48E-07
9	50	1,60E-07
10	50	1,57E-07
11	50	1,43E-07

Verifica-se que com o aumento da temperatura, o coeficiente de difusão é aumentado. Por isso, percebe-se que a temperatura tem forte influência sobre a difusividade efetiva de massa. O coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura, durante a secagem dos grãos de crambe e a dependência da difusividade em relação à temperatura foi descrita pela equação de Arrhenius, por meio da qual se obteve a energia de ativação de 517 kJ mol^{-1} para a difusão líquida no processo de secagem dos frutos de crambe.

Faria et al (2012) estudaram a relação do coeficiente de difusão de sementes de crambe com a temperatura de secagem, descrita pela equação de Arrhenius, que apresentou uma energia de ativação para a difusão líquida durante a secagem das sementes do crambe, de $4,969 \text{ kJ mol}^{-1}$.

Costa et al (2015) estudaram a secagem de crambe realizada em estufa, com ventilação forçada. A relação entre o coeficiente de difusão efetivo e a temperatura de secagem pôde ser descrita pela equação de Arrhenius, e apresentou uma energia de ativação para a difusão líquida na secagem de $20,998 \text{ kJ mol}^{-1}$.

4.6 Controle do Processo

O sistema de controle implementado foi o PID (Proporcional, Integrativo e Derivativo). O controlador atua de acordo com o erro referente à temperatura medida e a temperatura desejada no instante de tempo anterior.

Um sistema sem controle é instável e sob perturbações não consegue manter a variável controlada se mantenha no valor desejado. Nas Figuras 46 e 47 é possível visualizar a diferença no sistema que trabalha com e sem atuação de um controlador.

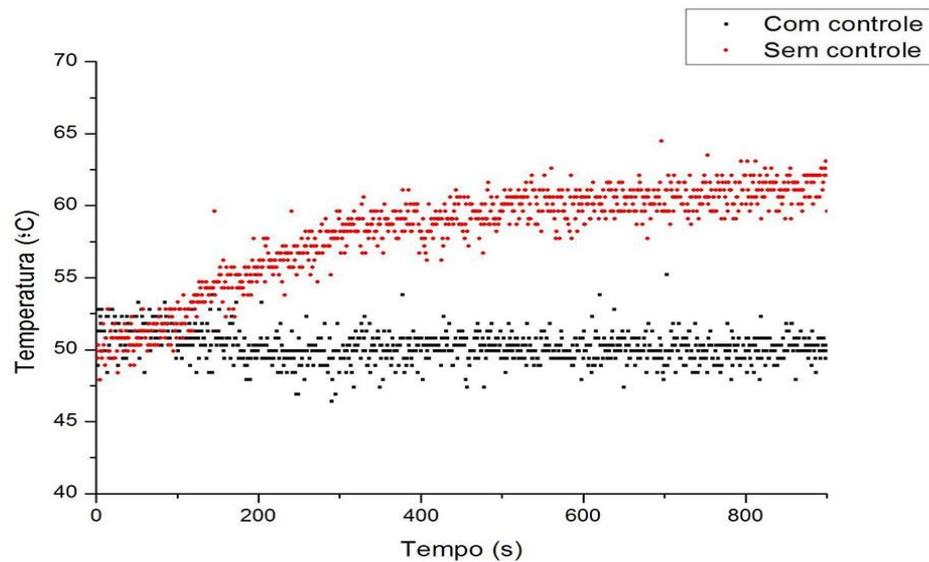


Figura 46 – Comparação do processo com atuação e sem atuação de um controlador, com perturbação da resistência elétrica de 120V para 130V.

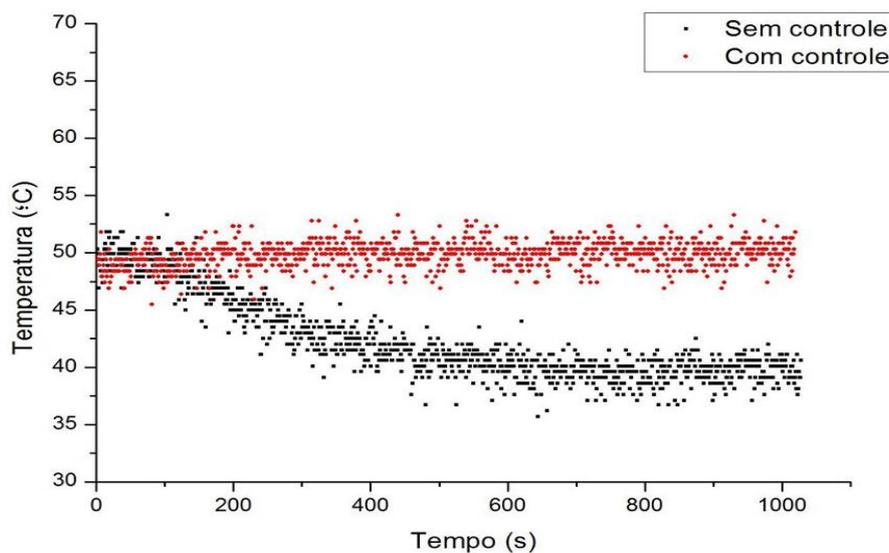


Figura 47 – Comparação do processo de secagem com atuação e sem atuação de um controlador, com perturbação da resistência elétrica de 120V para 110V.

4.6.1 Sintonia dos parâmetros do controlador

Para determinação dos parâmetros do controlador foi utilizado o método de Ziegler-Nichols em malha aberta e o método de Cohen-Coon em malha aberta, conhecidos como Curva de Reação.

Procedeu-se com a estabilização do processo e em seguida foi executado uma perturbação degrau na variável manipulada (velocidade do ar) com tempo igual a 200 segundos, obtendo-se um curva de reação como resposta ao degrau na variável manipulada (Figura 46)

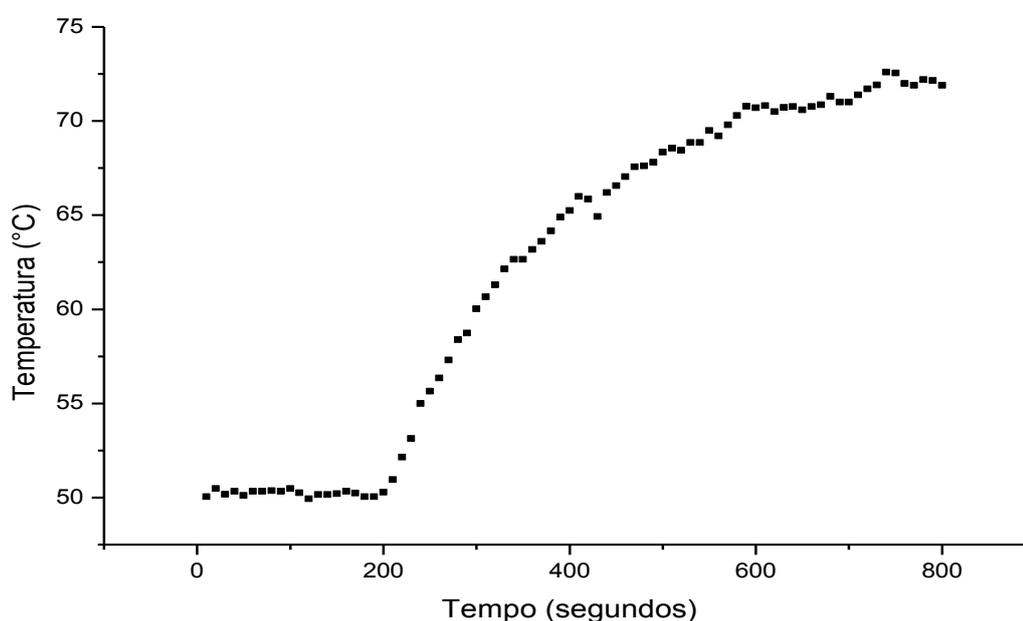


Figura 48 - Curva de Reação do processo para determinação dos parâmetros do controlador

Para determinação dos parâmetros foi necessário encontrar a reta tangente ao ponto de inflexão, que ocorre devido à mudança no sentido da curvatura. Assim foi selecionado um intervalo de tempo para buscar o ponto de inflexão, sendo o tempo selecionado de 180 a 400 segundos, já que a perturbação foi efetuada com 200 segundos e visualmente há mudança na curvatura logo em seguida.

Tabela 24 – Valores da temperatura em um intervalo de tempo selecionado para obtenção do ponto de inflexão

Ponto	Tempo (s)	Temp (°C)
1	180	50,05
2	190	50,05
3	200	50,29
4	210	50,95
5	220	52,15
6	230	53,14
7	240	55
8	250	55,65
9	260	56,35
10	270	57,3
11	280	58,38
12	290	58,73
13	300	60,02
14	310	60,66
15	320	61,3
16	330	62,14
17	340	62,65
18	350	62,65
19	360	63,17
20	370	63,6
21	380	64,17
22	390	64,9
23	400	65,25

Para o intervalo de tempo selecionado foi ajustado um polinômio que determinasse o comportamento do processo no intervalo (Figura 47)

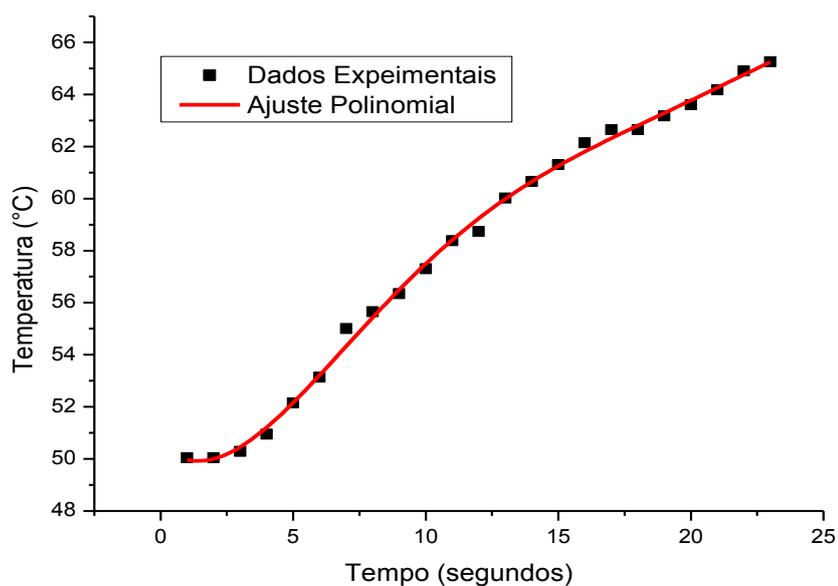


Figura 49 – Ajuste de polinômio aos dados experimentais de obtenção da Curva de Reação

O polinômio obtido foi:

$$y = -1,30044E-05x^5 + 0,00102x^4 - 0,02956x^3 + 0,36207x^2 - 0,85703x + 50,48619$$

Sendo:

x = tempo (segundos)

y = temperatura (°C)

o coeficiente de ajuste do modelo encontrado foi de $R^2 = 0,997$

A partir do modelo ajustado foi possível encontrar o ponto de inflexão. O ponto de inflexão foi encontrado pela derivada de segunda ordem do polinômio, sendo que o ponto de inflexão é definido como aquele que tem a derivada igual a zero e partir desse ponto há mudança no sinal da derivada de segunda ordem, já que o mesmo representa uma alteração no sentido da curvatura.

O ponto de inflexão encontrado foi o ponto (7;55), que representa o tempo igual a 240 segundos na curva de reação.

Em seguida, através do ponto de inflexão foi determinada a reta tangente ao ponto de inflexão. Através do polinômio encontrado é possível determinar o coeficiente angular da reta, sendo o valor da derivada de primeira ordem no ponto de inflexão. Assim sendo, determina-se o coeficiente angular.

$$\alpha = 1,11315$$

Sabe-se que o ponto de inflexão (7; 55) pertence à reta, sendo assim é possível determinar a equação da reta tangente.

$$y = 1,11315x + 46,51795$$

Através da equação foi obtido o gráfico necessário para interpretação e posterior determinação dos parâmetros do controlador (Figura 48).

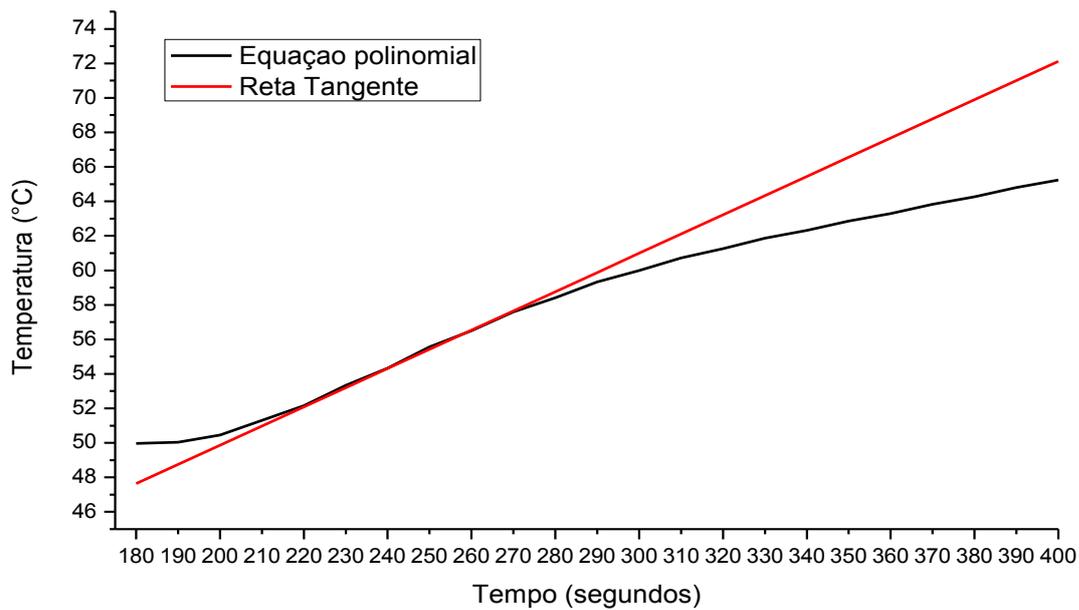


Figura 50 – Curva de reação e a reta tangente ao ponto de inflexão

Através da reta tangente ao ponto de inflexão foi possível encontrar os parâmetros T , θ e K , que representam o tempo morto, a constante de tempo e o ganho da função de transferência.

4.6.1.1 Método Ziegler e Nichols

Dispondo dos parâmetros T , θ e K , obtidos pela curva de reação, a partir da Tabela 2 foram calculados os parâmetros do controlador pelo método de Ziegler e Nichols. Esses valores seguem na tabela 26.

Tabela 25 – Parâmetros do controlador PID sintonizado pelo Método Z&N

Parâmetros	Método Z&N
K_c	10,1739
τ_D	0,167
τ_I	0,667

4.6.1.2 Método Cohen e Coon

Da mesma forma, a partir dos parâmetros T , θ e K , obtidos pela curva de reação, foi utilizada a Tabela 4 para calcular os parâmetros do controlador pelo método de Cohen e Coon. Esses valores seguem na tabela 27.

Tabela 26 - Parâmetros do controlador PID sintonizado pelo Método Cohen e Coon

Parâmetros	Método C&C
K_c	13,773
τ_D	0,1
τ_I	0,5827

4.6.1.3 Avaliação e Desempenho do controlador

Com os parâmetros calculados, foi iniciado o experimento para avaliação do controlador. As figuras 49 e 50 demonstram o resultado do controlador sintonizado pelo método de Ziegler e Nichols, enquanto as figuras 51 e 52 apresentam os resultados utilizando os parâmetros sintonizados pelo método de Cohen e Coon.

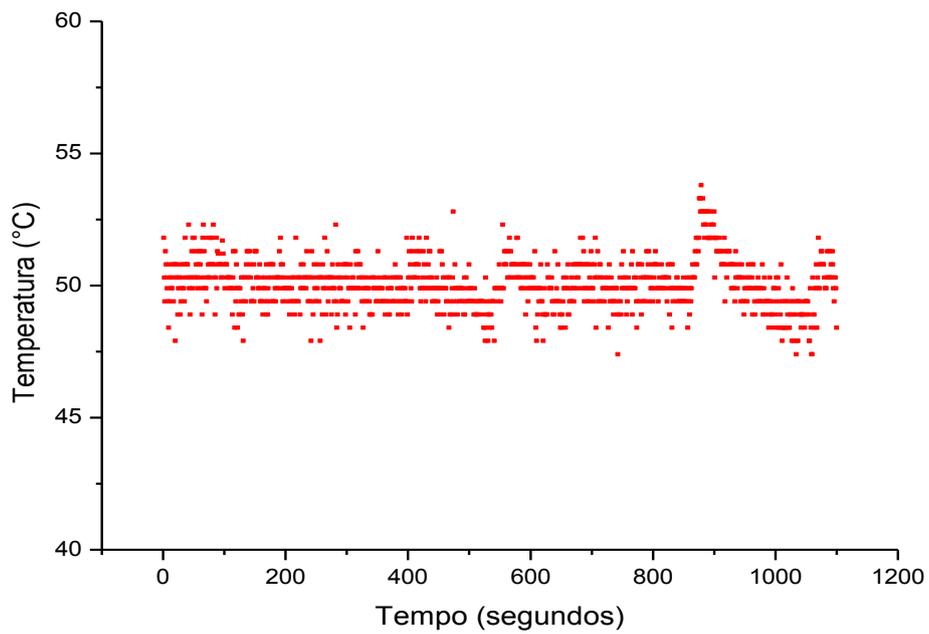


Figura 51 – Comportamento do controlador PID com parâmetros sintonizados pelo método de Z&N, perturbação de 120V para 130V

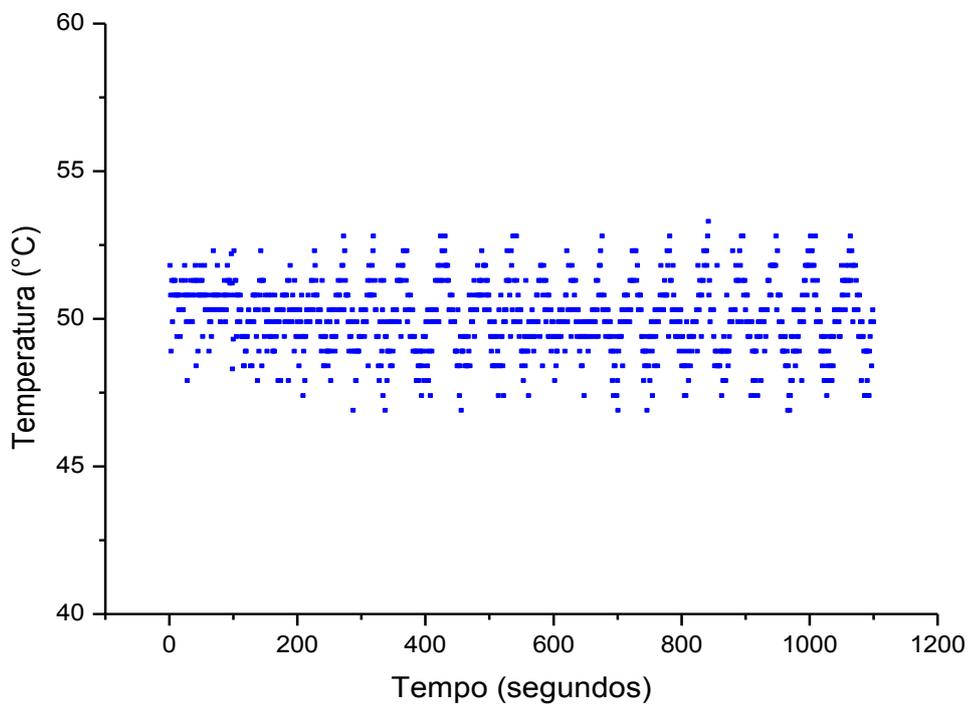


Figura 52 – Comportamento do controlador PID com parâmetros sintonizados pelo método de Z&N, perturbação de 120V para 110V

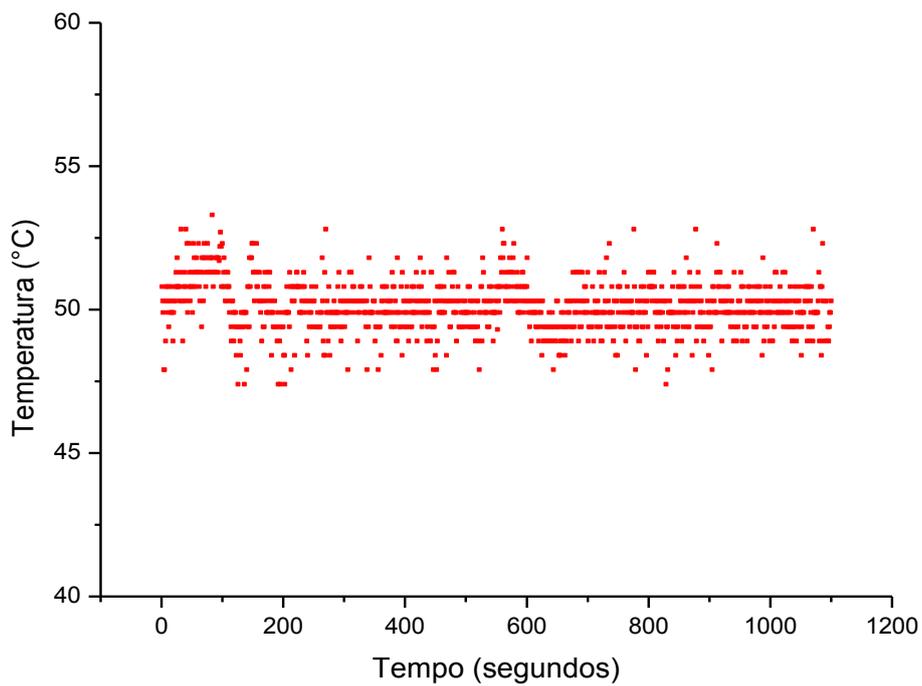


Figura 53 – Comportamento do controlador PID com parâmetros sintonizados pelo método de C&C, perturbação de 120V para 130V

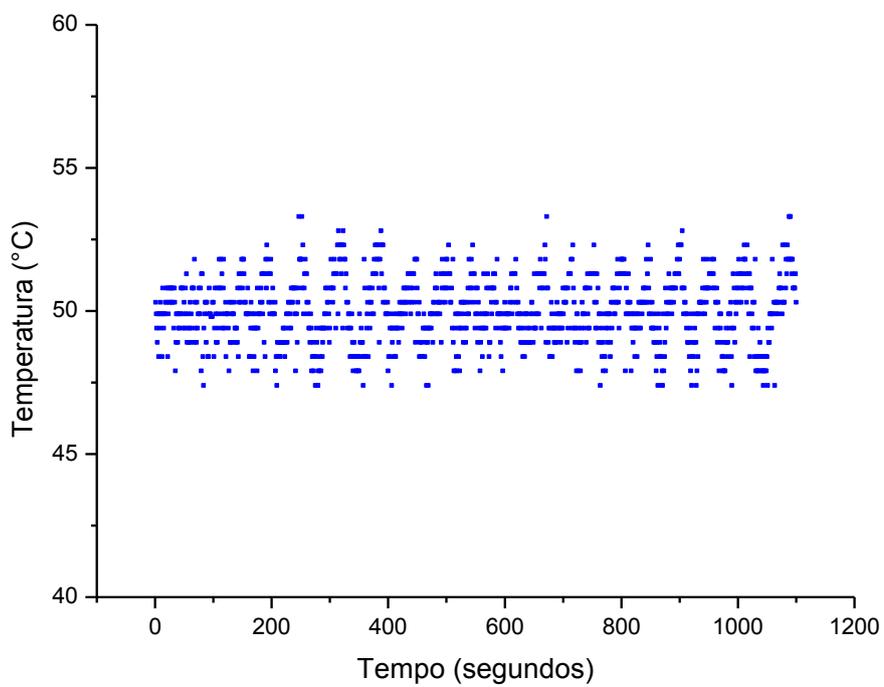


Figura 54 – Comportamento do controlador PID com parâmetros sintonizados pelo método de C&C, perturbação de 120V para 110V

A partir dos experimentos, foram analisados os resultados pelos critérios de desempenho IAE e ISE, conforme equações 18 e 19, apresentados na Tabela 28.

Tabela 27 - Desempenho dos controladores sintonizados pelos métodos de Ziegler e Nichols e Cohen-Coon

MÉTODO	IAE		ISE	
	PERTURBAÇÃO 120V PARA 130 V	PERTURBAÇÃO 120 V PARA 110 V	PERTURBAÇÃO 120V PARA 130 V	PERTURBAÇÃO 120 V PARA 110 V
ZN	582,650	889,450	826,825	1510,635
CC	519,200	860,150	836,070	1417,235

Pela análise dos critérios IAE e ISE, o controlador sintonizado pelo método Cohen e Coon obteve melhor desempenho, dessa forma foram utilizados os parâmetros sintonizados por esse método para o ajuste fino do controlador.

4.6.2 Ajuste Fino do Controlador

Para melhorar o desempenho do controlador é possível utilizar alguns ajustes manuais nos parâmetros, conforme indicado na Tabela 11.

Essa forma de ajuste não é exata e apenas é utilizada após já feita a sintonia dos parâmetros com fins de melhorar o desempenho. As mudanças nos parâmetros não devem ser grandes, uma vez que se trata de um ajuste fino.

As figuras 51 e 52 mostram a ação do controlador PID sintonizado pelo método de Cohen e Coon. Através da análise dos gráficos percebe-se que a resposta é rápida e não há sobrepassagem, porém especificamente na figura 52, quando a perturbação é feita reduzindo a tensão elétrica, é possível visualizar um comportamento com oscilações constantes, sendo assim, para tentar melhorar o desempenho do controlador e diminuir a oscilação será utilizada uma medida de ajuste fino, que é o aumento no tempo derivativo.

O tempo derivativo de 0,1 tomará o valor de 0,3. Com o novo valor o controlador foi colocado em execução para avaliação, conforme Figuras 53 e 54.

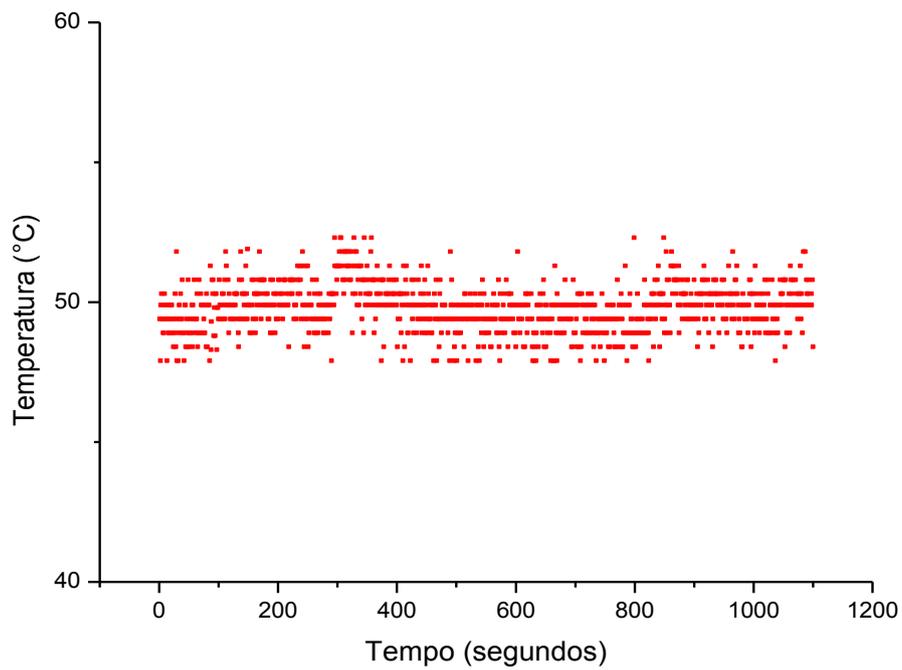


Figura 55 – Comportamento do controlador PID com alteração no parâmetro $T_d = 0,3$. Perturbação 120V para 130V.

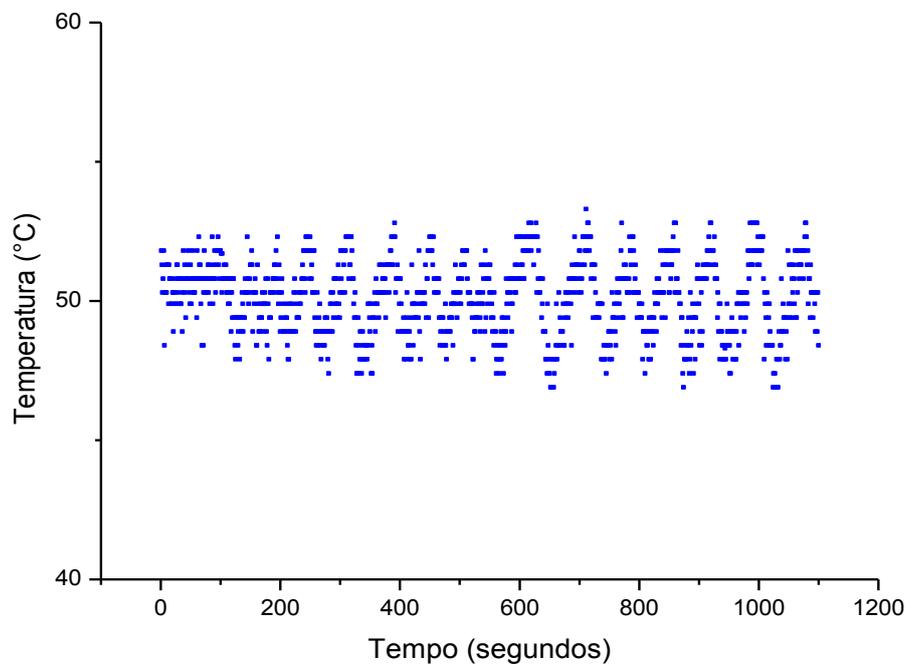


Figura 56 – Comportamento do controlador PID com alteração no parâmetro $T_d = 0,3$. Perturbação 120V para 110V.

Após a alteração dos parâmetros para ajuste fino uma nova avaliação de desempenho foi realizada. Os valores seguem na Tabela 29.

Tabela 28 - Análise de desempenho para o controlador com mudança no parâmetro T_d para 0,3.

Critério de Desempenho	Perturbação 120V para 130V	Perturbação 120V para 110V
IAE	547,25	1057,6
ISE	737,96	1879,88

Através da análise dos resultados é possível perceber que não houve melhora no desempenho do controlador com a alteração no parâmetro T_d . Para tentar melhorar a oscilação foi realizado mais um incremento no valor do tempo derivativo (T_d), aumentando seu valor para 0,5. Um novo experimento foi realizado para avaliar a ação do controlador, conforme segue nas Figuras 55 e 56.

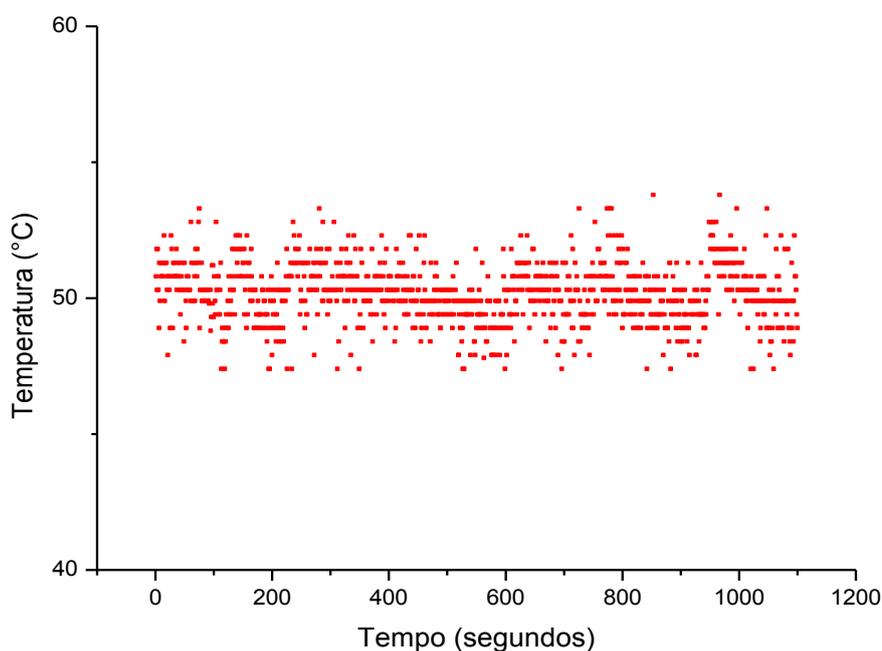


Figura 57 - Comportamento do controlador PID com alteração no parâmetro $T_d = 0,5$. Perturbação 120,v para 130V.

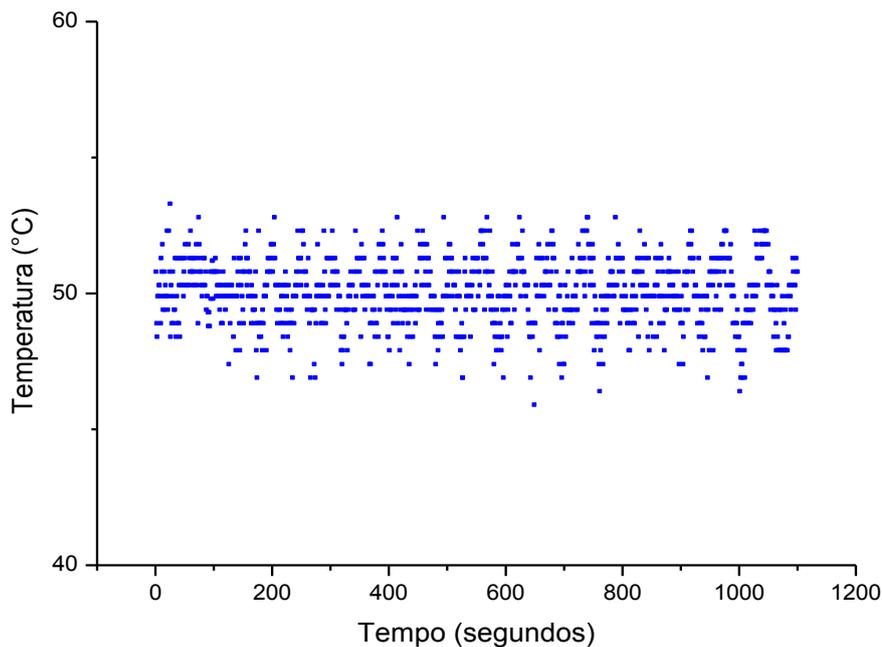


Figura 58 - Comportamento do controlador PID com alteração no parâmetro $T_d = 0,5$. Perturbação 120,v para 110V.

Após o experimento uma nova avaliação de desempenho foi realizada, os resultados seguem na tabela 30.

Tabela 29 - Análise de desempenho do controlador com alteração no parâmetros T_d para 0,5.

Critério de Desempenho	Perturbação	
	120V para 130V	120V para 110V
IAE	716,1	855,5
ISE	1252,53	1468,91

A alteração no tempo derivativo não melhorou o desempenho do controlador, conforma análise dos critérios IAE e ISE, pois houve a oscilação permaneceu e houve aumento nos critérios IAE e ISE, portanto toma-se o parâmetro inicial como o melhor parâmetro do controlador PID. Tentou-se melhorar a oscilação do sistema através do ajuste fino feito manualmente, porém não houve melhora nos resultados. Outros métodos de otimização dos parâmetros podem ser utilizados, porém não fazem parte do escopo desse trabalho. Bindu et al (2012) utilizaram algoritmo genérico para sintonia do

controlador PID e afirmaram que os resultados foram significativamente melhores quando comparado ao método convencional.

A partir dos resultados é possível verificar que o controlador implementado pode manter a temperatura do ar de secagem próxima ao set point mesmo na presença de perturbações, sendo assim esse sistema de controle pode garantir no processo de secagem um produto mais padronizado, melhor qualidade e ainda com melhor eficiência energética.

Os pesquisadores Ceylan et al (2007), Hofmann et al (2012) e Yang (2016) implantaram malhas de controle PID para o processo de secagem e também obtiveram resultados satisfatórios, confirmando sua eficácia para controle da temperatura do ar de secagem.

5 CONCLUSÃO

Nos experimentos realizados para a obtenção de isoterma, a análise do comportamento higroscópico demonstrou que a temperatura é um parâmetro que tem influência significativa nos experimentos para os grãos de crambe, nas faixas de temperaturas estudadas.

A umidade de equilíbrio apresentou comportamento típico, diminuindo com o aumento da temperatura do ar. A menor umidade de equilíbrio foi obtida com a temperatura de 60°C, a maior temperatura entre as três analisadas. O modelo de Smith modificado foi o que melhor descreveu as isotermas de sorção para as três temperaturas investigadas.

Nos experimentos de cinética, a temperatura do ar demonstrou ser um fator controlador no processo, e a velocidade do ar também apresentou uma influência, enquanto a umidade inicial do grão não teve influência significativa no processo, dentro das faixas estudadas.

Os experimentos cinéticos foram realizados na temperatura de 40°C, 50°C e 60°C com vazão de ar de 1,5 m/s, 2,0 m/s e 2,5 m/s. As melhores condições para remoção da umidade de crambe foram alcançadas na temperatura de 60°C.

O modelo de Newton modificado – potência 2, com dois parâmetros ajustados foi o que melhor descreveu a cinética de secagem para as três temperaturas avaliadas.

A análise estatística dos dados experimentais demonstrou uma influência negativa da temperatura no tempo de secagem, e influência positiva da velocidade do ar, a variável umidade inicial do grão não teve efeito significativo. O modelo empírico encontrado foi um modelo de 1ª ordem, que representa 72% dos dados obtidos, a validação do modelo foi comprovada com $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$.

Foi implementado um sistema de controle automático do tipo PID, para sintonia dos parâmetros do controlador foram utilizados os métodos de Ziegler e Nichols e Cohen e Coen em malha aberta, através da análise de desempenho os parâmetros encontrados pelo método de Cohen Coen obteve melhores resultados. Foi realizada uma tentativa de melhoria no desempenho através de um ajuste fino manual, porém não houve melhora no desempenho.

O controlador implementado manteve a temperatura do ar próxima ao set point estabelecido, na presença de perturbações, sendo assim pode garantir no processo de secagem um produto mais padronizado, melhor qualidade e eficiência energética.

O processo de secagem apresenta uma complexidade por envolver diversas variáveis. Esse estudo apresentou características de secagem dos grãos de crambe, demonstrando o comportamento higroscópico do grão nos experimentos de sorção, também trouxe um respaldo científico sobre a cinética de secagem dos grãos, comprovando forte influência da temperatura na taxa de secagem.

Os estudos de controle do processo de secagem foram satisfatórios, foram sintonizados parâmetros para utilização do controlador PID, e os resultados obtidos tiveram um bom desempenho para a secagem dos grãos de crambe em secador de leito fixo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABITANTE, A. L. **Modelagem dinâmica e análise de um sistema de controle de umidade de folhas de erva-mate em secadores contínuos de esteira.** Dissertação. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, 2007.

ABU-GHANNAM, N.; McKENNA, B. **The Application of Peleg's Equation to Model Water Absorption During the Soaking of Red Kidney Beans (*Phaseolus vulgaris* L.).** Journal of Food Engineering, v. 32, p. 391-401, 1997.

ADÃO, Aurelio Agostinho. 2011. **Controle PID e preditivo - aspectos teóricos e de implementação prática.** Dissertação submetida à Universidade Federal do Ceará para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

AGUIRRE, L.A. **Introdução a identificação de sistemas- Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais.** Editora UFMG, 2ª edição, 2004.

AL-MUHTASEB, A. H.; MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T.R.A. **Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review.** Food and Bioproducts Processing, Rugby, v. 80, n. 2, p. 118-128, Jun. 2002.

AL-MUHTASEB, A. H.; MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. **Water sorption isotherms of starch powders.** Part 2: thermodynamic characteristics. Journal of Food Engineering, v.62, n.2, p. 135-142, Apr. 2004.

ALONSO L. F. T.; – **Algoritmos de Seleção e Dimensionamento de Secadores.** Tese de Doutorado – FEA.,Universidades Estadual de Campinas, 2001.

ALSINA, O. L. S.; ROCHA, A. P. T.; SILVA, O. S.; SILVA, V. S. **Caracterização física de grânulos de quebra-pedra para uso em leite de jorro.** Revista Eletrônica e Materiais e Processos, v. 4.1, p. 32-37, 2009.

ANDERSON, V. L.; CATON, J. S.; KIRSCH, J. D.; REDMER, D. A. **Effect of crambe meal on performance, reproduction, and thyroid hormone levels in gestating and lactating beef cows.** *Journal of Animal Science*, Champaign, v. 78, n. 9, p. 2269-2274, 2000.

ARAGÃO, C. A.; Morais, O.M.; Lima, E.V.; Lemos, L.B.; Cavariani, C.; Nakagawa, J. **Efeito da hidratação seguido da secagem na qualidade fisiológica de sementes de feijão.** *Revista Brasileira de Sementes*, vol.21, n. 2, p. 180-186, 1999.

ARAÚJO, J. M. A. **Química de Alimentos: Teoria e Prática.** Viçosa, Editora UFV, 2004. 416 p.

ASTRÖM, K.J.; HÄGGLUND, T. **PID Controllers: Theory, Design and Tuning.** Instrument Society of America, 2^a ed. 1995.

BAKER, C., **Dryer selection.** In: _____, *Industrial Drying of Foods*. Londres: Chapman e Hall, 1997. p 242-271.

BANSAL, Hari Om; SHARMA, Rajamayoor; SHREERAMAN, P. R. **PID Controller Tuning Techniques: A Review.** *Journal of Control Engineering and Technology (JCET)* Vol. 2 Iss. 4, 2012, p.168-176.

BARROZO, M. A. S., OLIVEIRA, D. T., SANCINETI, G. P., RODRIGUES, M. V., 2000. **A study of the desorption isotherms of lentils.** *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 17, p. 105-109.

BARROZO, M.A.S.; SARTORI, D.J.M.; FREIRE, J.T. **Transferência de calor e massa em leito deslizante e escoamentos cruzados. Secagem de sementes de soja.** In: FREIRE, J.T.; SILVEIRA, A.M. da. *Tópicos especiais em sistemas particulados*. São Carlos: UFSCar, 1998, cap.4, p.119-159

BAYRAM, M.; ONER, M.D.; KAYA, A. **Influence of soaking on the dimensions and colour of soybean for bulgur production.***Journal of Food Engineering*, v.61, n.3, p.331-339. 2004.

BAYRAM, M. *et al.* **Influence of soaking on the dimensions and colour of soybean for bulgur production.***J. Food Eng., London*, v. 61, n. 3, p. 331-339, 2004b.

BECKERT, O.P.; MIGUEL, M.H.; MARCOS FILHO, J. **Absorção de água e potencial fisiológico em sementes de soja de diferentes tamanhos.** *Scientia Agrícola*, v.57, n.3, p.671- 675, 2000.

BERTO, M.I.; SÁ, F.R.; SILVEIRA JR., V. **Avaliação de controles PID adaptativos para um sistema de aquecimento resistivo de água.** *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, Campinas , v. 24, n. 3, p. 478-485, sept., 2004.

BEWLEY, J.D.; BLACK, M. **Seeds: physiology of development and germination.** 2.ed. New York: Plenum Press, 1994. 445p.

BILBAO-SÁINZ, C. *et al.* **Hydration kinetics of dried apple as affected by drying conditions.** *J. Food Eng., London*, v. 68, n. 3, p. 369-376, 2005.

BINDU R. , NAMBOOTHIRIPAD Mini K. **Tuning of PID Controller for DC Servo Motor using Genetic Algorithm.** *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* , ISSN 2250-2459, Volume 2, Issue 3, March, 2012.

BORGES, E.E.L.; RENA, A.B. **Germinação desementes.** In: AGUIAR, I.B.; PIÑA-RODRIGUES, F.C.M.; FIGLIOLIA, M.B. *Sementes floresta tropicais*. Brasília: ABRATES, 1993. p.83-135.

BOTELHO, F. M.; Corrêa, P. C.; Goneli, A. L. D.; Martins, M. A.; Baptestini, F. M. **Análise da hidratação do arroz na parboilização.** *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v.30, p.71-718, 2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília– DF,1992. 365 p.

BRASIL. **Lei nº 13.033**, de 24 de setembro de 2014. Dispõe sobre a adição obrigatória de biodiesel ao óleo diesel comercializado com o consumidor final;

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. ***Drying and storage of grains and oil seeds***. New York: van Nostrand Reinhold, 1992. 450p.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying cereal grains**.2nd ed. Westport: The AVI PublishingCo, p. 265, 2004.

BRUIN, S.; LUYBEN, K. CH. A. M.; **Drying of food Materials**: a review of recent Developments, 1980. pp. 155-215, in MUJUMDAR, A. S., Advances in Drying, v. 1, Hemisphere Publishing Corporation, Washington D.C.

BRUNAUER, S.; Emmett, P.H.; Taylor, E. **Adsorption of gases in multimolecular layers**. Journal of the American Chemical Society. 60, 309-319, 1938.

BRUNAUER S, Deming LS, Teller E.**On a theory of Van der Waals adsorption of gases**. J AmChem Soc. 1940 Jul; 62 (7): 1723-1732.

CAMPOS, M. C. M. M., TEIXEIRA, H. C. G. 2006. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. 1ª ed. São Paulo: Edgard Blücher. 415p.

CANOVA, Érika Breda, BUENO, Mauro Sartori, MOREIRA, Heverton Luis, POSSENTI, Rosana, eBRÁS, Patrícia. (2015). **Crambe Cake (Crambe Abyssinica Hochst) On Lamb Diets**. *Ciência e Agrotecnologia*, 39(1), 75-81

CASTRO, Martha Nascimento. 2012. **Uso do Crambe (Crambe Abyssinica Hochst) para Biodiesel.** N&S Agriconsult. Artigo disponível em: http://www.agriconsult.com.br/Cont_Default.aspx?idnews=271

CEYLAN, Ilhan; AKTAS, Mustafa ; DOGAN, Hikmet. **Mathematical modeling of drying characteristics of tropical fruits.** Applied Thermal Engineering 27 (2007) 1931–1936

CHEN, C. S.; CLAYTON, J. T. (1971), **The effect of temperature on sorption isotherms of biological materials.** Transactions of the ASAE, vol 14, p. 927-929.

CHEN, C.S. **Equilibrium moisture curves for biological materials.** Transactions of the ASAE, v. 14, p. 924-926, 1971.

CHEN, C. **Factors that effect equilibrium relative humidity of agricultural products.** Transactions of the ASAE, v.43, p.673-683, 2000

CHUNG, D.S.; PFOST, H.B. **Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products.** Transactions of aSaE, v.10, p. 549, 1967.

CORDEIRO, D. S., G. S. V. Raghavan, and W. P. Oliveira. 2006. **Equilibrium moisture content models for *Maytenusilicifolia* leaves.** *Biosyst. Eng.* **94**:221–228.

CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; RESENDE, O.; Ribeiro, D. M. **Obtenção e modelagem das isothermas de dessorção e do calor esotérico de dessorção para grãos de trigo.** Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v.7, p.39-48, 2005

CORZO, O.; FUENTES, A. **Moisture sorption isotherms and modeling for pre-cooked flours of pigeon pea (*Cajanuscajans L Mills*) and lima bean (*Canavaliaensi formis*).** Journal of Food Engeneering, v. 65, n.3, p. 443-448, Dec. 2004.

COSTA, Lílian M., Resende, Osvaldo, & Oliveira, Daniel E. C. de. (2013). **Isotermas de dessecção e calor isostérico dos frutos de crambe**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, vol. 17n. 4, p. 412-418.

COSTA, Lílian M., Resende, Osvaldo, & Oliveira, Daniel E. C. de. (2015a) **Determinação das isotermas de equilíbrio higroscópico de frutos de crambe pelo método dinâmico**. BioscienceJournal, v. 31, n. 2, p. 382-391.

COSTA, Lílian M, Resende, Osvaldo, Sousa, Kelly A, & Gonçalves, Douglas N. (2011). **Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15(10), 1089-1096.

COSTA, Lílian Moreira; RESENDE, Osvaldo; GONÇALVES, Douglas Nascimento; OLIVEIRA, Daniel Emanuel Cabral de. **Modelagem matemática da secagem de frutos de crambe em camada delgada**. Biosci. J., Uberlândia, v. 31, n. 2, p. 392-403, Mar./Apr. (2015b)

COUTINHO, Mônica Ronobo, Omoto, Edilson Sadayuki, Andrade, Cid Marcos Gonçalves, & Jorge, Luiz Mario de Matos. (2005). **Modelagem e validação da hidratação de grãos de soja**. Food Science and Technology (Campinas), vol.25, n.3, 603-610.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. Oxford University Press, 2 ed. London, 1975. 424p.

DESAI, B.B. (2004). **Seed Handbook: Biology, Production, Processing and Storage**. New York: Marcel Dekker. 2nd ed., p. 787.

DIAZ, P.S. **Secagem**, Pelotas, Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas – Disciplina de Operações Unitárias, 2009.

DOLACK, p.; **Crambe, Industrial Rapessed, and Tung Provide Valuable Oils;** Industrial Uses, 1996, p 17-23. Disponível em: <http://www.ers.usda.gov/publications/IUS6/ius6c.pdf>Acessado em Julho de 2015.

DUKE, J.; **Handbook of energy crops**, 1983; Disponível em: https://www.hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy/dukeindex.html. Acessado em Maio de 2015.

D. VELIC, M. Planinic, S. Tomas, M. Bilic. **Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying**. Journal of Food Engineering 64 (2004) 97–102

ETHMANE Kane, C.S; Kouhila,M.; Lamharrar, A.; Idlimam, A.; and Mimet, A. **Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of tow mints : Menthapulegium and Mentharotundifolia**. Revuedes Energies Renouvelables Vol. 11 N°2 (2008) 181 – 195

FARIA, Rute Q. de, Teixeira, Itamar R., Devilla, Ivano A., Ascheri, Diego P. R., & Resende, Osvaldo. (2012). **Cinética de secagem de sementes de crambe**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(5), 573-583.

FARIA, Rute Q. de, Teixeira, Itamar R., Devilla, Ivano A., Ascheri, Diego P. R., & Resende, Osvaldo. (2014). **Qualidade fisiológica de sementes de crambe submetidas à secagem**. *Revista Ciência Agronômica*. v.45, n.3, p.453 - 460.

FELLOWS, P. **Food processing technology**: principles and practice. Published ointhy by Ellis Horwood Ltd., Chichester, England and VCA Verlagsgessellschaft GmbH, Weinheim, Federal Republic of Germany, 1988.

FERRAZ, M. B. M. **Determinação de cinética de hidratação de ervilhas pisumsativum desidratadas**. Campinas, SP, 2008. 125 p. Tese (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.

FILHO, Moisés Duarte. 2014. **Síntese de controlador PID para controle de pH em um reator com otimização via algoritmos genéticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Estadual do Norte Fluminense.

FOUST, A.S; WENZEL, L.A.; CLUMP, C.W.; MAUS,L.; ANDERSEN, L.B. **Princípios das Operações Unitárias**. Rio de Janeiro, Ed. Guanabara Dois, 1982. 670p.

FRACASSO, A. F. **Cinética de hidratação de soja**: estudo comparativo entre soja Transgênica e convencional. 2011. 124f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos. Curitiba, 2011.

FURQUIN, *et al.* **Avaliação da qualidade do óleo durante a secagem de sementes de crambe (Crambeabyssinica)**. 33ª Reunião da Sociedade Brasileira de Química. (Anais...). Águas de Lindoia – SP, 2010.

GAL, S., 1981, **Techniques for obtaining complete sorption isotherms**, *Water Activity: Influences on Food Quality*, Rockland, L. B. and Stewart, G. F. (ed) (Academic Press, New York, USA), pp 89–154.

GILES, C.H.; SMITH, D. & HUITSON, A. **A general treatment and classification of the solute adsorption isotherm**. I. Theoretical. *J. Colloid Interf. Sci.*, 47:755-765, 1974.

GOMES, P.M. de A.; FIGUEIRÊDO, R.M.F.; QUEIROZ, A.J. de M. **Caracterização e isothermas de adsorção de umidade da polpa de acerola em pó**. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.4, n.2, p.157-165, 2002.

GONÇALVES, Douglas Nascimento; RESENDE, Osvaldo ; COSTA, Lílian Moreira; MARÇAL, Kaique Alves Ferreira. **Armazenamento de Frutos de**

Crambe submetidos a diferentes condições de secagens. I Congresso de Pesquisa e Pós-Graduação do Câmpus Rio Verde do IFGoiano. 2012

GONÇALVES Jr., AFFONSO C.; RUBIO, Fernanda; MENEGHEL, Ana P.; COELHO, Gustavo F.; DRAGUNSKI, Douglas C.; STREY, Leonardo. **The use of *Crambe abyssinica* seeds as adsorbent in the removal of metals from waters.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental - Agriambi; Mar2013, Vol. 17 Issue 3, p306

GOWEN, A.; ABU-GHANNAM, N.; FRIAS, J. e OLIVEIRA, J. **Influence of preblanching on the water absorption Kinetics of soybeans,** Journal of Food Engineering, v. 78, p. 965–971, 2007.

Hall, C. W. **Drying and storage of agricultural crops.** Westport: AVI, 1980. 381p.

HALSEY, G. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem.** *In:* The Journal of Chemical Physics. [s.n.], 1948. v. 16, n. 10, p. 931-937.

HELDMAN, D. R. and LUND, D. B., 1992, **Handbook of Food Engineering** (Marcel Dekker, New York, USA), pp 437–563.

HOFMANN , Augusto Marcos da Silva; BENINCA, Cristina; KOTOVICZ , Valesca; ZANOELO, Everton Fernando. **Experiments, modeling and control of a dryer–cooler of expanded raw soybean flakes in a hexane extraction plant.** Journal of the American Oil Chemists' Society (2012) 89:1929–1938

HSU, K. H. **A Diffusion Model with a Concentration-Dependent Diffusion for Describing Water Movement in Legumes During Soaking.** Journal of Food Science, v. 48, p. 618 – 622 e 645, 1983.

IGLESIAS, H. A. and CHIRIFE, C., (1976a). **A model for describing the water sorption behavior of foods,** *J Food Sci*, 41: 984–992.

IGLESIAS, H.; CHIRIFE, J. **Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food material.** *Journal of Food Technology*, Oxford, v. 11, p.109-116, 1976b.

JANKOWSKY, I.P. **Melhorando a eficiência dos secadores para madeira serrada.** Piracicaba: IPEF. Circular Técnica, n. 191. Janeiro, 2000. 16p.

JASPER, S. P.; BIAGGIONI, M. A. M.; SILVA, P. R. A. **Comparação do custo de produção do crambe (Crambe abyssinica Hochst) com outras culturas oleaginosas em sistema de plantio direto.** *Revista Energia na Agricultura*, Botucatu, vol. 25, n.4, 2010, p.141-153.

KAYMAK-ERTEKIN, F; SULTANOGLU, M.; 2001. **Moisture sorption isotherm characteristics of peppers**, *Journal of Food Engineering*, 47; p.225-231.

KLORANE Laboratories; **Crambe da Abissínia.** Acesso em: <http://www.klorane.pt/plant/25/Crambe+da+Abiss%C3%ADnia>. Data: 21/05/2015 às 17:38

KONGKIATTISAK, Pisut; SONGSERMPONG; SIRICHAJ. **Effect of Temperature and Velocity of Drying Air on Kinetics, Quality and Energy Consumption in Drying Process of Rice Noodles.** *Kasetsart J. (Nat. Sci.)* 46 : 603 - 619 (2012)

LABUZA, T. P., 1975, **Interpretation of sorption data in relation to the state of constituent water**, *Water Relations in Food*, Duckworth, R. (ed) (Academic Press, New York, USA), pp 155–172.

LAZZERI, L.; MATTEI, F.; BUCELLI, F.; PALMIERI, S.; **Crambe oil - a potential new hydraulic oil and quenchant**; *Industrial Lubrication and Tribology*, 1997, 49, 2 p. 71-77.

LEHN, DN & Pinto, LAA (2004) **Isotermas de equilíbrio e curvas de secagem para arroz em casca em silos de armazenagem**. Engenharia Agrícola, 12:177-191.

LIMA, F.S. **Estratégia de Escalonamento de Controladores PID Baseado em Regras Fuzzy para Redes Industriais Foundation Field bus Usando Blocos Padrões**. 2004. 68 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – RN, 2004.

LIMOUSIN, G.; GAUDET, J. P. ; CHARLET, L.; SZENKNECT,S.; BARTHE'S, V.; and KRIMISSA,M. **Sorption Isotherms: A Review on Physical Bases, Modeling and Measurement**.AppliedGeochemistry, Vol. 22, No. 2, 2007, pp. 249-275.

LISBÔA, Jemima F., Silva, José N., Cavalcanti, Mônica T., Silva, Emanuelle M. C. A., & Gonçalves, Mônica C.. (2015). **Análise da hidratação de grãos de alpiste**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, vol.19, n.3, 218-223.

LUIZ, Marcia Ramos. **Estudo teórico e experimental de secagem de tomate (Lycopersiconesculentum)**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

MATHLOUTHI, M.; ROGÉ, B. **Water vapour sorption isotherms and the caking of food powders**.Food Chemistry, v. 82, n. 1, p. 61-71, 2003.

MENDONÇA, B.P.C., LANA, R.P., DETMANN, E., GOES, R.H.T.B., & CASTRO, T.R..(2015). **Torta de crambe na terminação de bovinos de corte em confinamento**. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 67(2), 583-590.

MISHRA, Sachin Kumar; KUSHWAHA, Manoj; BHUTTO, M.D. **A Review on Tuning of PID controller Using Soft Computing Techniques**. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) ISSN: 2248-9622

International Conference On Emerging Trends in Mechanical and Electrical Engineering, Março, 2014.

MOHAMMADZAHERI, Morteza; CHEN, Lei; MIRSEPAHI, Ali; GHANBARI, Mehdi; TAFRESHI, Reza. **Neuro-Predictive Control of an Infrared Dryer with a Feedforward-Feedback Approach**. ASIAN JOURNAL OF CONTROL. Volume: 17 Edição: 5 Páginas: 1972-1977. DOI: 10.1002/asjc.1038. Publicado: SEP 2015

MOURA, Brígida Dantas de. **Automação de um sistema rotatório para secagem do rejeito de maracujá**. 2009. 76 f. Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologias Regionais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

MUJUMDAR, A. S., 1987, **Handbook of industrial drying**. New York, Marcel Dekker, Inc., cap. 1,2 e 3, p. 1-129.

MULET, A.; GARCIA-REVERTER, J.; SANJUÁN, R.; BON, J. **Sorption isosteric heat determination by thermal analysis and sorption isotherms**. *Journal of Food Science*, v.64, n.1, p.64-68, 1999.

NDUKWU M.C. **“Effect of Drying Temperature and Drying Air Velocity on the Drying Rate and Drying Constant of Cocoa Bean”** *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript 1091. Vol. XI., April, 2009.

NELLIST, M.E.; HUGUES, M. **Physical and biological processes in the drying of seed**. *Seed Science and Technology*, Zürich, v. 1, n.3, p.613-643, 1973.

NONHEBEL, G., MOSS, A., **Drying of Solids in the Chemical Industry**. Londres: Butterworths, 1971.

NUNES, L. de S.; Duarte, M.E.M.; Moreira, Mata, M.E.RM.C.;. **Avaliação do comportamento higroscópico de amido de inhame**. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v. 11, n. 2, p. 149-158, 2009.

OGATA, K. (2007) **Engenharia de Controle Moderno**. 4. ed, 3ª reimpressão. São Paulo: Pearson Prentice Hall. 798p.

OLIVA, A. C. E.; Biaggioni, M. A. M.; Cavariani, C. **Efeito imediato do método de secagem na qualidade de sementes de crambe**. Revista Energia na Agricultura, v.27, p.16-30, 2012.

OMOTO, Edilson Sadayuki, Andrade, Cid Marcos Gonçalves, Jorge, Regina Maria Matos, Coutinho, Mônica Ronobo, Paraíso, Paulo Roberto, & Jorge, Luiz Mario de Matos. (2009). **Modelagem matemática e análise da hidratação de grãos de ervilha**. Food Science and Technology (Campinas), vol.29, n.1, 12-18.

OPLINGER, E. S.; *et al.* 1991 **Crambe: alternative field crops manual**. Disponível em: <https://hort.purdue.edu/newcrop/afcm/crambe.html> . Acesso em: maio/2015.

PANNO G, PRIOR M .**Avaliação de substratos para a germinação de crambe (Crambe abyssinica)**. Revista Cultivando o Saber .2009 ; vol. 2 : p. 151 -157.

PARK, K.J.; YADO, M.K.M.; BROD, F.P.R. **Estudo de secagem de pêrabartlett (Pyrussp.) em fatias**. Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, v. 21, n. 3, p. 288-292, 2001

PARK, K.J.; NOGUEIRA, R.I. **Modelos de ajuste de isotermas de sorção de alimentos**. *In:Engenharia Rural*, Piracicaba: ESALQ/USP, v. 3, n. 1, p. 81-86, 1992.

PARK, K. J.; COLATO, A.; OLIVEIRA, R. A. **Conceitos e equipamentos de secagem**. Campinas, v.1, 2007a.

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

PARK, K. J. B.; Park, K. J.; Cornejo, F. E. P.; Fabbro, I. M. D. **Considerações termodinâmicas das isotermas**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v.10, p.83-94, 2008.

PELEG, M. **Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms**. In: *J. Food Proc. Eng.*, Connecticut-USA, Food & Nutrition Press, Inc., v. 16, n. 1, p. 21-37, 1993.

PELEG, M. **An empirical model for the description of moisture sorption curves**. *J. FoodEng.*, London, v. 52,p. 1216-1219, 1988.

PENICKA, Michal. **Influence of temperature and drying air velocity on the kinetics of convective drying in the food industry**. Creativity Study Conference. 2010. Disponível em: <http://stc.fs.cvut.cz/pdf11/1100010-1.pdf>

PHILLIPS, C.L.; HARBOR, R.D. **Sistema de controle e realimentação**. Editora Markron Books – SP, 1996.

PIAIA, J. C. Z. **Secagem da linguiça calabresa: experimentação e modelagem 3D aplicadas a fornos industriais**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina. Doutor em Engenharia Química. 2009.

PITOL, C.; BROCH,D.L.; ROSCOE,R. **Tecnologia e produção:crambe**. Maracaju: Fundação MS, 2010, 60p.

PRATES, Mauro de Oliveira; PIZZILOLO, Tarcísio de Assunção; MELO, Evandro de Castro, ROCHA, Ronicely Pereira, NICÁCIO, José Vitor. **Controle da temperatura e velocidade do ar de secagem em um secador de plantas medicinais**. Revista Engenharia na Agricultura, V.19 N.2,. 2011.

PRETTO, A. ; SILVA, L.P. ; GIACOMINI, S. J. ; MARTINELLI, S. G. ;Prati, R.L. ; Nunes, L.M.C . **Nutrientes, antinutrientes e detoxificação do farelo de crambe**

para uso na nutrição animal. Semina. Ciências Agrárias (Online) , v. 35, p. 3345-3354, 2014.

RAMOS, Beatriz Autullo; MANCINI, Maurício Cordeiro; MENDES, Marisa Fernandes. **Estudo das isotermas de equilíbrio das sementes do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L).** Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial. v. 08, n. 02: p. 1385-1398, 2014.r

REGINATO, Priscila. **Colheita mecanizada de sementes de crambe (*crambe abyssinica hochst*) no cerrado sul-mato-grossense.** Tese de doutorado apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados no Programa de Pós-Graduação em Agronomia. 2014

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; MARTINAZZO, A. P.; RIBEIRO, R. M. **Isotermas e calor isostérico de dessecção do arroz em casca.** Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa MG, v.31, n. 1, p. 86-94. 2006

RESENDE, Osvaldo; CORRÊA, Paulo César **Modelagem matemática do processo de hidratação de sementes de feijão.** Acta Scientiarum. Agronomy, vol. 29, núm. 3, 2007, pp. 373-378

RESIO, A.N.C.; AGUERRE, R.J.; SUAREZ, C. **Analysis of simultaneous water absorption and water-starch reaction during soaking of amaranth grain.** *Journal of Food Engineering*, v.68, n.02, p.265-270,2005.

RODRIGUES, Maria Elessandra de Araújo; ALMEIDA, Francisco de Assis Cardoso; GOUVEIA, Josivanda Palmeira Gomes de; SILVA, Manassés Mesquita da. **Avaliação da temperatura e velocidade do ar na secagem de goiaba.** Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.4, n.2, p.141-147, 2002

ROSA, Helton Aparecido ; WAZILEWSKI, Willian Tenfen ; SECCO, Deonir ; CHAVES, Luiz Inácio ; VELOSO, Gustavo ; DE SOUZA, Samuel Nelson Melegari ; DA SILVA, Marcelo José ; SANTOS, Reginaldo Ferreira . **Biodiesel produced**

from crambe oil in Brazil-A study of performance and emissions in a diesel cycle engine generator. *Renewable&Sustainable Energy Reviews* , v. 38, p. 651-655, 2014.

SEVERO, Elias Taylor Durgante. **Efeito da temperatura e da velocidade do ar na secagem de madeira serrada de *Pinvs Elliotth*.** Dissertação de mestrado em Ciências no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1989.

SILVA, J. S.; BERBERT, P. A.; AFONSO, A. D. L.; RUFFATO, S. **Qualidade dos grãos.** *In:Secagem e armazenagem de produtos agrícolas.* Viçosa MG: Aprenda Fácil. 2000. p.63– 105.

SILVA, G. S. (2010) **Controle de pH em máquina de produção de Cartão Multicamada.** Tese (Mestrado em Engenharia Química). Curitiba – PR, UFPR. 59p.

SILVA, Magnun Antonio Penariol. **Efeito do sistema de secagem de crambe (*crambe abyssinica hochst*) na qualidade dos grãos e do óleo para produção de biodiesel.** Dissertação Mestrado Energia na Agricultura (UNESP). 2013

SIMIONI, A.C. **O uso de energia renovável sustentável na matriz energética brasileira:** obstáculos para o planejamento e ampliação de políticas sustentáveis. Curitiba, PR: UFR, 2006. 314p. (Tese de Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento da UFPR)

SOUSA, Kelly A. de, Resende, Osvaldo, & Costa, Lílian M.. (2013). **Isotermas de dessecção das sementes de nabo forrageiro obtidas pelos métodos dinâmico e estático.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 17 n.2, p. 216-222.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design.** New York: Gordon andBreach Science Publishers, 1986.

TEIXEIRA, B.O.S.; JOTA, F.G.; TEIXEIRA, M.H. **Modelagem, controle e otimização do processo dos fornos de reaquecimento de placas.** *Sba Controle & Automação, Natal*, v. 18, n.1, Mar., 2007.

TEIXEIRA NETO, R.O. **Isotermas de sorção de umidade:** técnicas de obtenção e aplicações. Campinas: ITAL, 1997. (Coletânea da Fruthotec, 6).

TUSSOLINI, Loyse. **Secagem de folhas e ramos de erva-mate em leito de camada delgada:** experimentos, modelagem, simulação e controle em secador de esteira de passagem simples e zona única. Tese de doutorado (Engenharia de Alimentos). Universidade Federal do Paraná. 2014

ZANOELO, E.F. ; ABITANTE, A.; MELEIRO, L.A.C. **Dynamic modeling and feedback control for conveyors-belt dryers of mate leaves.** *Journal of Food Engineering* 84 (2008) 458–468

WANG, N. & Brennan, J.G. **Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Potatoes at Four Temperatures.** *Journal of Food Engineering* 14 (1991) 269-287

WILTON, S. R. (2000) **Control valves and process variability.** *ISA Transactions* 39: 265- 271.

WOLF, W., SPIESS, W. E. L. and JUNG, G., 1985, **Standardization of isotherm measurements**, *Properties of Water in Foods*, Simatos, D. and Multon, J. L. (ed) (MartinusNijhoff, The Netherlands), pp 661–679.

WOODSTOCK, L.W. **Seed imbibition:** a critical period for successful germination. *Jornal of seed technology*, v.12, n.1, p.1-15, 1988

YANG, Zhao; ZHU, Zongsheng; ZHAO, Feng. **Simultaneous control of drying temperature and superheat for a closed-loop heat pump dryer.** *Applied Thermal Engineering* 93 (2016) 571–579

