



THIAGO SOUSA E SOUSA

**UTILIZAÇÃO DOS MODELOS DE CAMADA FINA E REDES
NEURAS ARTIFICIAIS PARA ESTUDO DA CINÉTICA DE
SECAGEM DO SARNAMBI (*Anomalocardia brasiliana*)**

São Luís
2018

THIAGO SOUSA E SOUSA

**UTILIZAÇÃO DOS MODELOS DE CAMADA FINA E REDES
NEURAS ARTIFICIAIS PARA ESTUDO DA CINÉTICA DE
SECAGEM DO SARNAMBI (*Anomalocardia brasiliana*)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado de Curso da Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Harvey Alexander Villa Vélez

São Luís
2018

Sousa, Thiago Sousa e.

Utilização dos modelos de camada fina e redes neurais artificiais para estudo das cinéticas de secagem do sarnambi *Anomalocardia brasiliana* / Thiago Sousa e Sousa. - 2018.

66 f.

Orientador(a): Harvey Alexander Villa Vélez.

Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

1. Cinéticas de secagem. 2. Modelo difusivo. 3. Modelos de camada fina. 4. Redes neurais artificiais. 5. Sarnambi. I. Vélez, Harvey Alexander Villa. II. Título.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. HARVEY ALEXANDER VILLA VÉLEZ
Orientador – COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. ROMILDO MARTINS SAMPAIO
COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. PAULO HENRIQUE DA SILVA LEITE COELHO
COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO PEREIRA RODRIGUES
COEQ/CCET/UFMA

12 de dezembro de 2018

Dedico este trabalho a minha mãe Sílvia, minhas tias Ayla e Regina, minha irmã Priscila, meus avós Zanoni e Raimunda e acima de todos a Deus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo e acima de todos a Deus que me deu forças nessa jornada, renovando minha alegria, mostrando Sua bondade e acalmando-me sempre que necessito de paz.

A minha mãe Sílvia por todo suporte emocional que me dá sempre quando necessito, por sua dedicação, por seu amor que não tem dimensões e por seu carinho que me faz esquecer de todo embaraço e toda aflição. Te amo, mãe!

As minhas tias Ayla, Regina, minha prima Priscila e meus avós Zanoni e Raimunda, os quais sempre se esforçaram para que nunca me faltasse amor e compreensão, pelos bons ensinamentos, costumes e crenças que me passaram, fazendo-me sempre acreditar em meus sonhos e jamais desistir deles. Vocês são peças fundamentais para que hoje eu chegasse até aqui.

Ao meu orientador Harvey Alexander Villa Vélez por sua orientação, dedicação, conselhos e sempre boa vontade em ajudar, por seus conselhos acadêmicos que irei levar para a vida toda e por seu amor pela sua profissão, executando-a com maestria.

A professora Audirene que sempre esteve presente para ajudar no que fosse preciso, sempre se dedicando ao máximo. Serei sempre grato!

Aos professores Romildo Martins Sampaio, Paulo Henrique da Silva Coelho e José Roberto Pereira Rodrigues por aceitarem fazer parte de minha banca examinadora. Muito obrigado!

A minha amiga Thaís Martins, pelo seu suporte e ajuda durante a realização desse estudo, eu serei eternamente agradecido. A Adriana que se mostrou presente me dando apoio, suporte e motivação durante as pesquisas e vida profissional. Muito obrigado!

Aos meus amigos, Layrton, Carol, Beatriz, Juliana, Danielle e Maurício que sempre estiveram presentes, contribuindo direta e indiretamente, me impulsionado, tirando minhas dúvidas, me fazendo sorrir e mostrando-me sempre que a vida pode ser mais leve. Vou levar vocês em meu coração para sempre.

“Com amor eterno te amei, também com amável
benignidade te atraí.”

Jeremias 31.3b

SOUSA, T. S. **Utilização dos modelos de camada fina e redes neurais artificiais para estudo das cinéticas de secagem do sarnambi (*Anomalocardia brasiliiana*)**. 2018. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

RESUMO

O sarnambi é um molusco bivalve facilmente encontrado em regiões areno-lodosas ou sob rochas próximas ao mangue. Sua captura é feita de maneira artesanal e sua venda é realizada em feiras livres sem beneficiamento prévio, contribuindo para o seu curto tempo de prateleira, o qual pode ser prolongado aplicando-se a técnica de secagem, cujo um dos objetivos é diminuir a atividade de água inviabilizando as reações de deteriorações e consequentemente aumentando a estabilidade do produto. A operação de secagem é dividida em duas: secagem natural e artificial. Dentre as artificiais, a secagem convectiva combinada com sistemas espumantes vem ganhando destaque, uma vez que é muito utilizada quando se quer obter produtos em pó, visto que necessita de menores temperaturas e tempo de desidratação. Assim, o objetivo do presente trabalho foi aplicar os modelos de camada fina de Henderson-Pabis, Lewis, Page, Aproximação por difusão, Dois termos, Weibull, Peleg, Logarítmico, Wang e Sing, Midilli, modelo difusivo e redes neurais artificiais na secagem do sarnambi com sistema espumante utilizando um desidratador de alimentos nas temperaturas de 30, 45 e 60 °C. A umidade diminui com o incremento do tempo para todas as temperaturas estudadas. Dentre os modelos de camada fina o que melhor se ajustou aos dados experimentais foi Midilli com R_{adj}^2 maiores que 0,99. Os coeficientes difusivos foram de $1,225 \times 10^{-10}$, $1,865 \times 10^{-10}$ e $2,99 \times 10^{-10}$ m²/s para as temperaturas de 30, 45 e 60°C, respectivamente e, a energia de ativação foi de 24,891 kJ/mol. Os resultados foram semelhantes aos encontrados por estudos já realizados por outros autores. Para as redes neurais as arquiteturas *feed-forward* e *cascade-forward* modelaram de forma adequada o sistema com R_{adj}^2 iguais a 0,998 e MSE menor que 0,029, utilizando funções de transferências como sigmoide, radial e hiperbólica, com sete e oito neurônios.

Palavras-chave: Sarnambi. Cinéticas de secagem. Modelos de camada fina. Modelo difusivo. Redes neurais artificiais.

SOUSA, T. S. **Utilization of thin layer models and neural network to study of Sarnambi (*Anomalocardia brasiliiana*) drying kinetics**. 2018. 66 f. Graduate Work (Graduate in Chemical Engineering) – Curso de Engenharia do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

ABSTRACT

Sarnambi is a bivalve mollusk easily found in sandy-muddy places or under rocks close to mangrove area, its fishing is done artisanal way and its sale is done at fairs having no previous processing contributing to its short shelf-life, that may be increased applying drying technique, whose aim is to decrease activity water preventing deteriorations reactions and consequently increasing stability of product. The drying process is branched in two: natural and artificial. Among artificial ones, convective drying combined with foam systems has been gaining prominence, since it is widely used when one wants to obtain powdered products, since it requires lowers dehydration temperatures and time. Wherefore, the aim of this present study was to apply thin layer models of Henderson-Pabis, Lewis, Page, Approximation of diffusion model, Two Terms, Weilbull, Peleg, Logarithmic, Wang e Sing, Midilli, Diffusion model and artificial neural network on foam mat drying of sarnambi using a food dehydration at temperatures 30, 45 and 60 °C. The moistures content of the material decreased with increasing the time for all temperatures studied. Among thin layer models Midilli's model presented best fitting with R_{adj}^2 higher than 0.99 for all temperatures. The diffusive coefficients were equal to 1.225×10^{-10} , 1.865×10^{-10} and 2.99×10^{-10} m²/s respectively and activation energy equals to 24.891 kJ/mol. The results found were similar to studies already carried out by other authors. About Artificial Neural Network, the architecture feed-forward and cascade-forward fitted satisfactorily the system with R_{adj}^2 equal to 0.998 and MSE of less than 0.029 applying transfer functions like sigmoid, radial and hyperbolic with seven and eight neurons

Keywords: Sarnambi, Drying kinetics. Thin Layer Models. Diffusive Model. Artificial Neural Networks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curva típica de secagem convectiva.	10
Figura 2: Arquitetura de rede neural artificial feed-foward de camada simples.	16
Figura 3: Arquitetura de redes neurais feed-forward de camadas múltiplas.	16
Figura 4: Arquitetura de redes neurais recorrentes.	17
Figura 5: Curva da secagem do sarnambi in natura para as temperaturas de 30 °C (■), 45 °C (●) e 60 °C (▲).	25
Figura 6: Curva da secagem do sarnambi em espuma para as temperaturas de 30 °C (■), 45 °C (●) e 60 °C (▲).	26
Figura 7: Valores experimentais (●) e valores calculados (malha, □) através dos melhores modelos de ajuste para Page e Midilli e análises residuais da carne do sarnambi em espuma.	29
Figura 8: Arquitetura dos melhores resultados das redes <i>cascade-forward</i> (a) e <i>feed-forward</i> (b) da cinética de secagem do sarnambi em espuma treinados pela função <i>Levenberg-Maquardt backpropagation</i>	31
Figura 9: Arquitetura dos melhores resultados das redes <i>cascade-forward</i> (a) e <i>feed-forward</i> (b) da cinética de secagem do sarnambi em espuma treinados pela função <i>Bayesian Regularization</i>	32
Figura 10: Análise residual entre as curvas de secagem experimental e calculada do sarnambi em espuma, para os dados modelados pela função de treinamento <i>Levenberg-Maquardt backpropagation</i> (o) e para <i>Bayesian Regularization</i> (+).	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores experimentais da cinética do sarnambi <i>in natura</i>	23
Tabela 2: Valores experimentais da cinética de secagem em espuma do sarnambi.....	24
Tabela 3: Parâmetros estimados dos modelos de camada fina para os sistemas com espuma às temperaturas de 30, 45 e 60 °C.....	27
Tabela 4: Avaliação estatística dos modelos de camada fina para os sistemas com espuma às temperaturas de 30, 45 e 60 °C.....	28
Tabela 5: Coeficientes de difusão (D_{ef}), coeficiente de determinação e energia de ativação para a secagem realizada nas temperaturas de 30, 45 e 60 °C.	29
Tabela 6: Resultados com melhores ajustes e validação estatística das análises de redes neurais artificiais da cinética de secagem do sarnambi em espuma.	30

SUMÁRIO

	FOLHA DE APROVAÇÃO.....	iii
	DEDICATÓRIA.....	iv
	AGRADECIMENTOS.....	v
	EPÍGRAFE.....	vi
	RESUMO.....	vii
	ABSTRACT.....	viii
	LISTA DE FIGURAS.....	ix
	LISTA DE TABELAS.....	x
	SUMÁRIO.....	xi
1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	3
2.1	Objetivos gerais.....	3
2.2	Objetivos específicos.....	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1	Sarnambi.....	4
3.2	A importância do extrativismo e comércio de sarnambi no Maranhão.....	5
3.3	O processo de secagem.....	6
3.4	Técnicas de secagem.....	7
3.4.1	SECAGEM CONVECTIVA.....	7
3.4.2	SECAGEM À VÁCUO	7
3.4.3	SECAGEM POR ATOMIZAÇÃO (<i>SPRAY DRYING</i>)	8
3.4.4	SECAGEM POR ESPUMA (<i>FOAM MAT DRYING</i>).....	8
3.5	Curvas de secagem.....	9
3.6	Modelagem de processo de secagem.....	10
3.7	Período de taxa constante.....	11
3.8	Período de taxa decrescente.....	12
3.9	Modelos empíricos empregados para análise no período de taxa decrescente.....	13

3.10	Redes neurais artificiais.....	13
3.10.1	ASPECTOS GERAIS SOBRE RNA.....	14
3.10.2	AS PRINCIPAIS ARQUITETURAS DAS REDES NEURAI ARTIFICIAIS	15
3.10.3	APLICAÇÕES DE REDES NEURAI ARTIFICIAIS.....	17
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	18
4.1	Material.....	18
4.2	Equipamentos utilizados.....	18
4.3	Procedimento Experimental.....	18
4.3.1	PREPARAÇÃO DO SARNAMBI.....	18
4.3.2	PREPARAÇÃO DO SISTEMA ESPUMANTE COM O SARNAMBI.....	18
4.3.3	CONSTRUÇÃO DAS CINÉTICAS DE SECAGEM EXPERIMENTAIS..	19
4.4	Modelagem Matemática.....	19
4.4.1	MODELOS DE CAMADA FINA.....	20
4.4.2	DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO E DA ENERGIA DE ATIVAÇÃO.....	21
4.4.3	SIMULAÇÃO COM REDES NEURAI ARTIFICIAIS.....	21
4.5	Análises estatísticas.....	22
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	23
5.1	Cinética de secagem.....	23
5.2	Ajuste dos dados de secagem do sarnambi em leito de espuma aos modelos matemáticos.....	26
5.2.1	MODELOS DE CAMADA FINA.....	27
5.2.2	MODELO DIFUSIVO.....	29
5.2.3	SIMULAÇÃO COM REDES NEURAI ARTIFICIAIS.....	30
6	CONCLUSÕES.....	34
	REFERÊNCIAS.....	35
	APÊNDICE A.....	41
	ANEXO A.....	42
	ANEXO B.....	44

1. INTRODUÇÃO

O sarnambi (*Anomalocardia brasiliiana*), pertencente à família Veneridae, é um molusco bivalve filtrador provido de uma concha com formato trigonal, inflada e sólida com cores que apresentam variáveis em tons de creme. Vive enterrado a cerca de cinco centímetros da superfície no substrato lodoso de águas rasas e calmas e é encontrado principalmente na areia ou sob as rochas próximas aos mangues (SALLES; MACEDO, 2017).

O marisco *Anamolocardia brasiliiana* é bem aceito para alimentação humana utilizado em inúmeros pratos típicos, possuindo um sabor característico, contendo 14,40% de proteínas além de minerais como Cobre, Manganês, Magnésio, Potássio e Zinco, importantes componentes para manutenção do corpo (SALES; MACEDO, 2017). É de fácil localização e captura, sendo muitas vezes obtido de forma artesanal em diversas regiões do Brasil, tanto para subsistência como para comercialização (RODRIGUES; BORGES-AZEVEDO; HENRY-SILVA, 2010).

No Maranhão a coleta do sarnambi ocorre durante todo o ano e é realizada ao longo de todo o manguezal, em locais popularmente conhecidos como catadores. O estudo realizado por Pereira et al. (2017) mostra que os locais mais frequentados pelos moradores são Carimã na Raposa, Croa do Miritiua em São José de Ribamar e Sarnambizinho em Paço do Lumiar. A produção das comunidades catadoras varia de 2 a 4 sacos por coleta cada um com aproximadamente 80 kg, sendo a produtividade média de 226,07 kg em São José de Ribamar, 221,75 kg em Raposa e 145,62 kg em Paço Lumiar. O beneficiamento dos mariscos é feito no mesmo dia da captura nas casas das marisqueiras e segue as seguintes etapas: cozimento à lenha, retirada da casca com a mão ou com auxílio de peneira ou monobloco e armazenamento em freezer. A venda do produto pronto é realizada por atravessadores, consumidores ou cooperativas sem nenhum tipo de processamento.

Devido à alta atividade de água no sarnambi, reações de deterioração acontecem muito rapidamente, diminuindo consideravelmente o tempo de vida útil do produto. Dessa forma, é importante a aplicação de métodos que reduzam o alto teor de água livre. Nesse contexto, a secagem é uma alternativa para este problema, uma vez que é um processo simples e eficaz, possibilitando ainda a industrialização do produto.

A secagem é um dos processos mais utilizados para a conservação de alimentos e um dos mais antigos segundo Sing et al. (2006). É responsável por diminuir a disponibilidade de água para reações de deterioração, aumentando assim a estabilidade do alimento e reduzindo

o volume e massa do produto (RAJKUMAR et al., 2007; CELMA et al., 2011; CASARIN et al., 2016).

Existem três métodos de secagem: natural, convectiva e combinada. A secagem convectiva acontece em um ambiente controlado com um fluxo constante de ar e a uma determinada temperatura. Durante o processo a umidade deixa o sólido pela superfície, havendo o transporte de água de dentro para fora. Dentro desse conceito os sistemas espumantes têm ganhando muita atenção, apresentando como vantagens menor tempo de secagem em temperaturas menores, preservação da qualidade organoléptica e nutricional (AZIZPOUR et al., 2014).

Diferentes modelos empíricos podem ser usados para descrever o processo de secagem e ajudar em sua otimização além de auxiliar no projeto de secadores. O desenvolvimento de modelos tem sido usado para estimar o tempo de secagem de inúmeros produtos e generalizar com curvas de secagem. (MIDILLI; KUCUK; YAPAR, 2002).

Em busca de modelos que melhor representem as curvas de secagem surgem as redes neurais artificiais (RNA) que são capazes de representar processos não lineares com estruturas complexas, fornecendo, muitas vezes, melhores resultados que as correlações dos modelos empíricos (HIMMELBLAU, 2008).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estudar as condições de secagem pelo método de espuma para o sarnambi (*Anomalocardia brasiliiana*) comercializado na região metropolitana de São Luís - MA como uma alternativa para melhorar seu armazenamento e possibilitar sua industrialização.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar as cinéticas de secagem para as temperaturas de 30, 45 e 60 °C.
- Ajustar os dados experimentais das cinéticas de secagem através de modelos de camada fina.
- Ajustar os dados experimentais das cinéticas de secagem através de redes neurais artificiais.
- Determinar o coeficiente difusivo no processo de secagem do sarnambi pelo método de espuma.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Sarnambi

Muitas espécies de moluscos bivalves comestíveis habitam em áreas de fácil acesso ao homem, tais como, praias arenosas, areno-lodosas, manguezais e fundos arenosos em ambientes coralíneos, isso impulsiona a sua extração e utilização como fonte de alimento. No Brasil, essas características relacionam-se com a intensa atividade artesanal de pesca e consumo de algumas espécies, como é o caso do sarnambi (*Anomalocardia brasiliiana*) (OLIVEIRA et al., 2016).

O sarnambi (*Anomalocardia Brasiliana*) pertence à família Verenidae, a qual reúne aproximadamente 500 espécies, cinquenta gêneros e doze subfamílias. Segundo Canapa et al. (1996) essa diversidade está relacionada principalmente à grande variedade de habitats para os quais estão adaptados.

Trata-se de molusco provido de uma concha e um filtrador, que vive enterrado a cinco centímetros da superfície no substrato lodoso de águas rasas e calmas. É encontrado principalmente na areia ou sob as rochas próximas aos mangues (SANDE et al, 2010), dispensando assim do uso de ferramentas específicas na sua extração (SCHAEFFER-NOVELLI, 1976).

Os organismos bivalves são filtradores, possuindo assim, a capacidade de absorver toxinas, poluentes químicos, biológicos e metais pesados do meio em que estão, o que pode comprometer o consumo de sua carne (SANDE et al., 2010). Devido a isso, inúmeras doenças de origem alimentar ocorrem pelo consumo de moluscos bivalves crus, malcozidos ou provenientes de ambientes aquáticos contaminados.

A captura do molusco é feita de forma artesanal; as conchas são retiradas da areia ou das pedras com o auxílio de facas ou com as próprias mãos. Já para a extração da carne do sarnambi, faz-se a cocção deste em panelas de aço inoxidável, até que as valvas se abram, facilitando o processo (SALLES; MACEDO; FIGUEREDO, 2017).

Os recursos de pesca dos estuários como o sarnambi, o sururu e as ostras são importantes reservas de alimentos, uma vez que os moluscos neles presentes são de alto valor nutritivo, representando uma alternativa de subsistência às populações mais carentes, quer seja pelo consumo ou pela comercialização. Os moluscos fazem parte da culinária local e nas festas tradicionais, os quais são apreciados pelos habitantes locais e turista (MOREIRA, 2007).

3.2 A importância do extrativismo e comércio de sarnambi no Maranhão

O extrativismo de moluscos bivalves é uma importante atividade econômica em inúmeras comunidades costeiras do Nordeste brasileiro: cerca de 50.000 pessoas vivem exclusivamente da renda obtida pela coleta de moluscos como a ostra (*Crassostrea gasar*), o sarnambi (*Anomalocardia brasiliana*) e o sururu (*Mytella falcata e Mytella guyanensis*) em estuários e manguezais (CASTRO et al., 2014 apud PEREIRA et al., 2017).

A extração de moluscos, no litoral maranhense, tem papel fundamental na complementação de renda de família de pescadores. Em estudo realizado por Moreira (2007) foi constatado que 70% das mulheres marisqueiras do município de Raposa apresentam uma atividade secundária, como confecção de rendas, enquanto que em Paço do Lumiar, 33% possuem outra atividade. A prática extrativista, usualmente desenvolvida de forma rústica envolve a catação de sarnambi, ostra, sururu e demais pescados de importância comercial ou apenas alimentícia para tais famílias (PEREIRA et al., 2017).

A prática de extração dos moluscos é realizada, de modo geral, por grupo de familiares ou vizinhos, tendo importante papel na geração de rendas e como fonte de alimentos de alto valor nutricional para comunidades de pescadores artesanais, as quais executam a catação baseando-se em conhecimentos culturais e costumes consolidados por gerações sobre a classificação, história natural comportamento, biologia e utilização do recursos naturais de onde vivem com o intuito de assegurar o manejo sustentável dos recursos naturais, visando à conservação (DIEGUES, 1983; SCHAEFFER-NOVELLI, 1999).

O processamento do sarnambi é realizado pelas próprias marisqueiras com auxílio de familiares e vizinhos, seguindo as seguintes fases: lavagem após coleta com água de estuário, ensacamento, transporte até as residências, cozimento à lenha, retirada da casca com as mãos, utilizando em alguns casos um monobloco, o que facilita a retirada da casca (PEREIRA et al., 2017)

Na maioria das comunidades a venda é realizada por atravessadores, consumidores ou até mesmo representantes da fábrica de beneficiamento, sem processamento algum. O preço da venda do sarnambi varia de R\$ 7,00 a R\$ 10,00 por kg. A renda decorrente da produção varia segundo as condições de marés e a demanda de compradores, alcançando valores médios de R\$ 200,00 por mês quando em baixa produção e de R\$ 600,00 em períodos de maior produção.

O sarnambi é usualmente vendido em feiras livres, as quais não atendem às normas do Plano Nacional de Controle Higiênico-Sanitário de Moluscos. Inúmeras doenças de origem alimentar ocorrem devido a ingestão de moluscos bivalves advindos de águas com condições sanitárias inadequadas. O alto teor de umidade (79%) além de lipídeos (3%) e proteínas (14,40%) fazem do sarnambi um produto de alta perecibilidade. Inúmeras técnicas podem ser empregadas para a sua conservação, dentre elas destacam-se o congelamento e a secagem (SALLES; MACHADO; FIGUEREDO, 2017).

3.3 O processo de secagem

Um dos objetivos principais das indústrias de processamento alimentício é a conversão de alimentos perecíveis em produtos estáveis, os quais têm seu tempo de prateleira aumentado consideravelmente e as suas propriedades físico-químicas conservadas. Dentre as várias tecnologias utilizadas para este fim (como, por exemplo, a conserva e o congelamento de alimentos) destacam-se os processos de secagem. Quando um sólido úmido é submetido a um processo de secagem ocorrem dois processos simultaneamente: o primeiro é uma transferência de energia (na maioria das vezes acréscimo de calor) do ambiente externo para evaporar a água da superfície do sólido. O segundo é a transferência de água do seio do sólido para a superfície e sua subsequente evaporação devido ao primeiro processo. A taxa em que a secagem acontece é governada pela velocidade em que esses dois processos acontecem (MUJUMDAR, 2006).

Para a transferência de massa, é importante que o fluido secante não se encontre saturado de umidade, dessa forma a diferença entre a concentração do sólido e do meio secante permitirá que haja a transferência de água do sarnambi para o ar que circula no interior do secador convectivo. Para a construção desses secadores são necessários os parâmetros cinéticos da secagem, os quais são determinados a partir de estudos laboratoriais e através destes pode-se estabelecer as equações da umidade em função do tempo de secagem para diferentes períodos e taxas de secagem. Além disso, a cinética possibilita a determinação do mecanismo predominante na transferência de massa do material para o fluido e as respectivas equações matemáticas correspondentes (FERREIRA, 2003).

O estudo e a modelagem matemática têm despertado o interesse de vários pesquisadores para os mais diversos produtos. Diante disto, é de fundamental importância o emprego de modelos matemáticos para representar o processo de secagem, haja vista que as

informações geradas são de grande valor para o desenvolvimento de equipamentos e predição dos tempos de secagem (BAPTESTINI et al., 2015).

3.4 Técnicas de secagem

Por ser uma técnica essencial na indústria de alimentos, a secagem pode ser realizada das mais diversas formas, como por exemplo, a secagem de grãos ao sol. A operação de secagem é dividida em duas, secagem natural e artificial. A secagem natural é aplicada em regiões com temperatura média de 35°C a 40°C, com boa taxa de radiação solar, baixa umidade relativa do ar e baixo índice de poluição. Normalmente, esse processo permite a conservação de produtos com baixo teor de umidade, prolongando sua vida útil e requerendo poucos investimentos, visto que se necessitam apenas bandejas para desidratação e redes protetoras contra insetos. Alimentos de alta perecibilidade, como frutas, hortaliças, ervas e carnes, devem ter essa proteção, mas, no caso do café e milho para ração animal, a secagem pode ser feita com os grãos espalhados no chão, estando esses apenas sobre uma cobertura plástica (CELESTINO, 2010).

A secagem artificial utiliza equipamentos em que o alimento é colocado em um recipiente ou bandeja e o processo acontece por um tempo estabelecido. Na maioria dos processos industriais a secagem é realizada com uma velocidade de 0,5 a 3 m/s e baixa umidade. A secagem artificial pode ser realizada em diferentes tipos de secadores, a escolha deles depende do material que se está secando, da energia a ser empregada para o processo e resultado que se deseja obter (CELESTINO, 2010; AZEVEDO; ALVES, 2013).

3.4.1 SECAGEM CONVECTIVA

Nesse tipo de secagem o alimento sólido é espalhado uniformemente sobre uma bandeja com fundo tipo tela (de metal ou plástico). A circulação de ar no secador é feita por um ventilador situado atrás de resistências elétricas usadas para o aquecimento de ar na entrada. O controle da temperatura é dado por meio de um termostato (CELESTINO, 2010).

3.4.2 SECAGEM A VÁCUO

Na secagem por condução, sob vácuo, não há passagem de gás de secagem sobre o sólido a uma temperatura superior, ou seja, não há convecção. O vapor formado pode ser encaminhado para um condensador que o condensa para o exterior ou pode ser simplesmente

arrastado por passagem de gás de arraste. O vácuo existente na câmara de secagem possibilita uma operação a temperaturas mais baixas o que é útil no caso dos termosensíveis (AZEVEDO; ALVES, 2013).

3.4.3 SECAGEM POR ATOMIZAÇÃO (*SPRAY DRYING*)

A secagem por *spray drying* envolve a atomização de um líquido que contém sólidos em solução, suspensão ou emulsão. O líquido ou pasta são atomizados usando-se um sistema centrífugo ou de alta pressão, onde as gotículas atomizadas imediatamente entram em contato com um fluxo de ar quente. A rápida evaporação da água permite manter baixa a temperatura das partículas, de maneira que a alta temperatura do ar de secagem não afete demasiadamente o produto (SOUZA et al., 2013).

A técnica em *spray drying* possui um bom rendimento, possui boa estabilidade nos materiais obtidos e alta qualidade nas partículas, porém possui um alto custo de equipamento, além de não ser uma boa técnica para materiais sensíveis ao calor (SOUZA et al., 2013).

Dessa forma, uma forma alternativa ao *spray drying* é a secagem por espuma que segundo Baspetini et al. (2015) é empregada para obtenção de produtos alimentícios em pó, o qual tem como característica a transformação de líquidos ou semilíquidos em espumas estáveis.

3.4.4 SECAGEM POR ESPUMA (*FOAM MAT DRYING*)

A secagem por espuma é muito utilizada quando se quer obter produtos em pó, em que os mesmos são sensíveis ao calor, viscosos e com alto índice de açúcar, como é o caso dos sucos de frutas (RAJKUMAR et al., 2007 apud BASPETINI et al., 2015) visto que requer menores temperaturas de desidratação e menor tempo de desidratação em razão da maior área de superfície exposta ao ar e à velocidade de secagem, acelerando assim, o processo de remoção de água. Isso faz com que a secagem de uma camada de espuma seja aproximadamente três vezes mais rápida do que a secagem de uma camada similar de líquido (FELLOWS, 2006, BASPETINI et al., 2015).

O líquido é transformado em espuma pela adição de uma pequena porção (1% ou menos) de um agente espumante, como a proteína de soja, albumina, ésteres de ácidos graxos e monoestearatos de glicerol, e a incorporação de ar ou outros gases como o nitrogênio (por

ser inerte) por injeção direta ou agitação. A espuma é distribuída em camadas finas em telas de arame e levada ao secador (BRENNAN, 2006; CARNEIRO 2008).

Muitos alimentos naturalmente contêm proteínas e monoglicerídeos e produzem espumas quando batidos, entretanto as espumas produzidas geralmente não são satisfatórias para uma posterior desidratação, por isso a adição de agentes espumantes é necessária (SANKAT; CASTAIGNE, 2003; CARNEIRO, 2008).

Segundo Valentas et al. (1997) a desidratação pelo método “*foam-mat*” é restrita a pequenas produções e é somente utilizada em líquidos que podem formar espumas estáveis. “*Foam-mat*” é um processo relativamente simples e barato. A maior dificuldade encontrada nesse processo é manter a estabilidade da espuma durante a aplicação do calor. Existem diversas variáveis que afetam a formação, densidade e estabilidade das espumas como: natureza química do material, teor de sólidos solúveis, tipo e concentração do agente espumante e tipo e concentração do estabilizante da espuma (KARIM ;WAI, 1999; CARNEIRO, 2008).

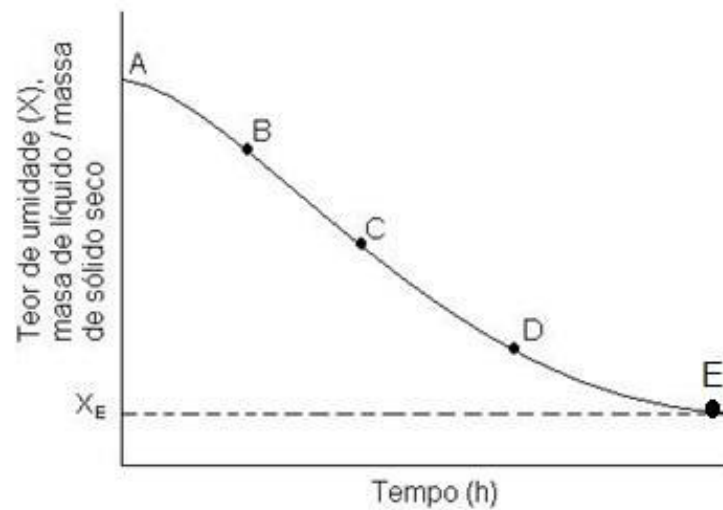
Se as espumas se romperem durante a secagem, ocorre o aumento da taxa de secagem, o que reduz a qualidade do produto e dificulta a remoção da bandeja (SANKAT ; CASTAIGNE, 2004; CARNEIRO, 2008).

3.5 Curvas de secagem

Na secagem de um material sólido em contato com gás, a uma dada umidade e determinada temperatura, normalmente há um comportamento que pode ser tomado como padrão, elabora-se um gráfico de umidade em função do tempo, durante o processo de secagem, obtém-se, para muitos materiais, uma curva de secagem que apresenta geralmente duas etapas principais: uma taxa de secagem constante e outra, decrescente (SILVA, 2013; CAMARGO, 2005; SANTOS, 2017).

A cinética de secagem está intimamente ligada aos fenômenos de transferência de calor e massa e está associada às mudanças do conteúdo médio de umidade do material e da temperatura média com o tempo, sendo afetada por condições ambientais do meio (pressão total, temperatura, umidade relativa e velocidade do meio de secagem) e pela estrutura física e química do material a ser desidratado. Na secagem de um sólido úmido, mediante um gás em condições ambientais fixas, manifesta-se sempre certo tipo de comportamento (Figura 1) (GEANKOPLIS, 1993).

Figura 1: Curva típica de secagem convectiva.



Fonte: Adaptado de Geankoplis (1993).

Considerando que o sólido perde umidade por evaporação da superfície saturada (controle convectivo) e ao final por evaporação da umidade no seu interior (controle por difusão interna), podem-se observar os segmentos AB como os termos representativos do período de aquecimento do material. Também pode ser chamado de período de acomodação térmica do produto às condições de secagem. (GEANKOPLIS, 1993; SANTOS, 2017).

Os segmentos BC é chamado de período de taxa constante, a temperatura do sólido é igual à do ambiente. É caracterizado pela velocidade de secagem ser inalterada com a diminuição do teor de umidade. O calor é transferido para a superfície do sólido basicamente por convecção. (GEANKOPLIS, 1993; SANTOS, 2017).

Já o trecho CDE é chamado de período de taxa decrescente. Inicia-se quando a umidade do sólido atinge um valor determinado chamado de umidade crítica. O trecho pode ser dividido em duas zonas: zona de superfície de secagem não saturada e zona em que o fluxo interno de água controla o processo. (GEANKOPLIS, 1993; SANTOS, 2017).

O ponto E é correspondente a aproximação da taxa de secagem a zero, num certo teor de umidade de equilíbrio que é menor que o teor de umidade atingível no processo de secagem. (GEANKOPLIS, 1993; SANTOS, 2017).

3.6 Modelagem do processo de secagem

Diversas pesquisas vêm sendo realizadas na área de secagem com o intuito de descrever a transferência de umidade do interior do sólido até a superfície e o mecanismo de transferência (interno ou externo) que controla o processo. Porém, na literatura são poucos os

trabalhos que estudaram a modelagem visando o controle do processo, o que em geral limita tais pesquisas ao campo acadêmico e científico, não havendo aproximação com a aplicação industrial. Em processos de secagem, o conhecimento e controle de variáveis como a temperatura, a umidade relativa, a velocidade do ar e o conteúdo de umidade do sólido, são indispensáveis para garantir a qualidade do produto, além de ganhos em economia de energia (SILVA et al., 2004).

O processo de secagem de um produto, sob condições constantes de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, pode ser dividido em um período de velocidade constante e outro de velocidade decrescente. Durante o período de velocidade constante a temperatura do produto se mantém igual à do ar de secagem saturado e as transferências de calor e massa se compensam, ou seja, o ar recupera, sob a forma de vapor, o que perdeu sob a forma de calor. No período de velocidade decrescente de secagem, a taxa de transporte interno de água é menor do que a taxa de evaporação; desta forma a transferência de calor do ar para o produto não é compensada pela transferência do vapor de água e, conseqüentemente, a temperatura do grão aumenta, tendendo a atingir a temperatura do ar de secagem (BROOKER et al., 1992).

3.7 Período de taxa constante

Neste período, a velocidade de secagem é independente da umidade do sólido, pois este está tão úmido que a película fina de líquido, que cobre toda a sua superfície, se comporta como se o sólido não existisse. Por este motivo, os coeficientes de transferência de massa e de calor não variam com a perda de umidade do sólido e são aproximadamente constantes (AZEVEDO; ALVES, 2013). Matematicamente, o período com taxa constante pode ser determinado pela Equação 1.

$$\frac{hA(T_{amb} - T_{bu})}{\lambda} = 0 \quad (1)$$

onde A é a área da superfície exposta (m^2), h é o coeficiente de transferência de calor ($W \cdot (m^2)^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$), λ é o calor de vaporização ($J \cdot mol^{-1}$), T_{amb} é a temperatura ambiente ($^\circ C$) e T_{bu} é a temperatura de bulbo úmido ($^\circ C$) (HALL, 2006).

Normalmente a equação de transferência de calor dá uma estimativa mais segura da taxa de secagem do que a equação de transferência de massa, porém, correlações são

propostas na literatura para permitir que as constantes nestas relações sejam fixadas com segurança (TREYBALL, 1980). Estas constantes são função da espessura do filme de ar que envolve o produto na secagem e, desta maneira, são afetadas pela velocidade do ar e o seu ângulo de colisão sobre a superfície seca. Expresso em termos de fluxo de massa de ar (G), o coeficiente de transferência para fluxo de ar paralelo a superfície do produto é dado pela Equação 2.

$$h = C_1 (G)^{0,8} \quad (2)$$

Para o fluxo de ar no ângulo direto da superfície de secagem o coeficiente de transferência de calor é dado pela Equação 3 onde C_1 e C_2 são constantes.

$$h = C_2 (G)^{0,4} \quad (3)$$

As Equações 2 e 3 indicam que o aumento do fluxo de massa de ar acelera a taxa de secagem. Adicionalmente, uma velocidade mais alta minimiza as diferenças de umidade entre o interior e o exterior de um sistema de secagem e desta forma o teor de umidade do produto pode-se manter constante (FORSON et al., 2007).

3.8 Período de taxa decrescente

Durante o período de velocidade de secagem decrescente, superfície do sólido vai ficando cada vez mais seca e quente, sendo a secagem efetuada a partir de pontos dispersos na superfície onde a água ou o vapor vão chegando com velocidades variáveis (AZEVEDO; ALVES, 2013).

De acordo com Queiroz (1985) são dois os métodos comumente usados para analisar a secagem de produtos biológicos no período a taxa decrescente: o empírico e o teórico. O método empírico consiste em formar grupos físicos adimensionais que podem ser facilmente investigados por experimentos de laboratório e baseia-se nas condições externas, como temperatura, umidade e velocidade do ar de secagem. Entretanto, não fornece indicação sobre o transporte de energia e de água no interior dos produtos. Os métodos teóricos usados para descrever o processo de secagem são baseados em leis físicas que tentam explicar o mecanismo de transferência de água (KAR et al., 2008).

3.9 Modelos empíricos empregados para análise no período de taxa decrescente

Os modelos empíricos de secagem em camada delgada seriam aqueles que concorreriam para que houvesse harmonia entre a teoria e a facilidade de uso. A secagem em camada delgada refere-se ao processo no qual o material a ser seco está inteiramente exposto ao ar que se move através dele; utiliza-se a Lei de Newton para representar a taxa de variação da temperatura de um corpo circundado por um fluido à temperatura constante, como mostra a Equação 4. (HALL, 2006).

$$\frac{dT}{dt} = -\xi(T - T_e) \quad (4)$$

onde ξ é a constante de resfriamento ou aquecimento ($K \cdot s^{-1}$); T (K) é a temperatura do produto em qualquer tempo t e T_e (K) é a temperatura do meio que envolve o produto.

A Equação 4 é uma equação diferencial linear de primeira ordem, cuja solução pode ser obtida por separação de variáveis e posterior integração conforme a Equação 5 abaixo, resultando na equação exponencial mostrada nas Equação 6.

$$\frac{dT}{(T - T_e)} = \int_{t_0}^t -\xi dt \quad (5)$$

$$\frac{T - T_e}{T_0 - T_e} = e^{-\xi t} \quad (6)$$

Atualmente, são empregados muitos modelos empíricos para as análises de curvas de secagem, os quais derivam do resultado anterior. Silva et al. (2013) citam a descrição básica de alguns modelos semiempíricos empregados, como o modelo de Weibull, Peleg, Henderson-Pabis, Lewis, Aproximação por difusão, etc.

3.10 Redes neurais artificiais (RNA)

3.10.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE RNA

As redes neurais artificiais vêm como uma alternativa de criar máquinas que funcionem com a metodologia do cérebro humano, usando para isso componentes que desempenhem papel semelhante aos neurônios biológicos (PICTON, 2000). Sendo assim, elas

podem ser definidas como um conjunto de unidades de processamento, caracterizadas por neurônios artificiais, os quais são interligadas por diversas sinapses artificiais. Suas estruturas foram definidas a partir dos modelos conhecidos de sistemas nervosos biológicos e do próprio ser humano (SILVA et al., 2010).

Usualmente, as redes neurais artificiais se enquadram em três classificações, sendo elas: camada de entrada, responsável pela entrada de dados, sinais, características ou medições advindas do meio externo; camada oculta, composta de neurônios, cuja função é extrair as características associadas ao processo a ser inferido; e a camada de saída, também constituída de neurônios, se responsabilizando pela produção e apresentação dos resultados finais da rede (SILVA et al., 2010).

Devido a sua estrutura, as RNA são capazes de representar processos não-lineares com estruturas complexas, fornecendo melhores resultados que as correlações empíricas, segundo Himmelblau (2008). Um facilitador para o uso das redes neurais é que não é necessário um conhecimento prévio das relações entre as variáveis que estão sendo investigadas. Nas RNA os valores de entrada são usados para o cálculo das respostas, as quais são comparadas com o padrão fornecido. Esse processo é realizado até que se atinjam valores de entrada aceitáveis para a precisão escolhida (KARIMI et al., 2012).

As Equações 7 e 8 mostram o modelo matemático da arquitetura de *feed-forward* e *cascade-forward* respectivamente.

$$f_{(x)} = \Psi \left[\left(\sum_{i,k=1}^n \varphi_i \omega_{ik} + \delta_k \right) + \sum_{j,k=1}^n \omega_{jk}^l \right] \quad (7)$$

$$f_{(x)} = \sum_{i,j=1}^n \omega_{ij}^0 + \Psi \left[\left(\sum_{i,k=1}^n \varphi_i \omega_{ik} + \delta_k \right) + \sum_{j,k=1}^n \omega_{jk}^l \right] + \delta_j \quad (8)$$

onde ω_{ij}^0 são os pesos do produto entre as entradas e (i) e saídas (j) da rede, φ_i são as entradas da rede, ω_{ik} são os pesos do produto entre as entradas e os neurônios da camada oculta, δ_k são os bias dos neurônios das camadas ocultas, ω_{jk}^1 são os pesos do produto entre os neurônios da camada oculta e as saídas da rede de saída e ψ é a função de transferência, podendo ser *tansig*, *radbas* e *logsig* (LASHKARBOLOOKI et al., 2013; VILLA-VÉLEZ; VAQUIRO; TELIS-ROMERO, 2015a).

A vantagem do uso das redes neurais é que caso o processo sob análise se modifique não se faz necessário determinar novos modelos, uma vez que é possível que os novos dados

sejam adicionados e a rede neural ser treinada novamente. Quando comparada com a metodologia da superfície de resposta, as redes neurais apresentam dificuldade em assimilar a relação entre as variáveis independentes e dependentes. Todavia, a superfície de resposta plotada na maioria das vezes fornece uma boa visualização das interações dos parâmetros para a análise do processo de secagem (KARIMI et al., 2012).

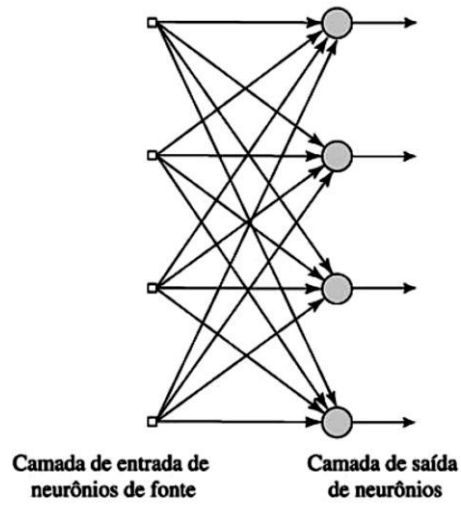
3.10.2 AS PRINCIPAIS ARQUITETURAS DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

A forma como os neurônios artificiais estão arrançados um em relação ao outro define a arquitetura de uma rede neural (SILVA et al., 2010). A forma como a rede está estruturada, está ligada ao algoritmo de aprendizagem usado no treinamento da RNA (HAYKIN, 2001). De modo geral, levando em consideração a disposição dos neurônios, as formas de interligação e a constituição das camadas, as principais arquiteturas são: *feed-forward* de camada simples, *feed-forward* de camadas múltiplas e recorrentes (SILVA et al., 2010).

Para as redes *feed-forward* de camada simples (Figura 2) existe uma camada de entrada e uma de neurônios, que é a própria camada de saída, onde o fluxo de informações tem apenas uma direção. A quantidade de saídas nas redes pertencentes à arquitetura de modo geral coincide com o número de neurônios. Esse tipo de rede neural é empregado, tipicamente, em problemas de padrões e filtragem linear. A rede *feed-forward* de camadas múltiplas (Figura 3) são constituídas de uma ou mais camadas ocultas, que podem ser uma ou mais, cujos laços computacionais são chamados por neurônios ocultos ou de unidades ocultas. A adição de camadas ocultas permite a rede extrair dados estatísticos de ordem elevada, tornando-se uma valiosa habilidade para entradas com tamanho grande. A função dos nós ocultos é intervir entre a camada externa ou a saída da rede. As principais aplicações para essas redes neurais são: solução de problemas relacionados à aproximação de funções, classificação de padrões, robótica, controle de processos e otimização entre outros (HAYKIN, 2001; SILVA et al., 2010).

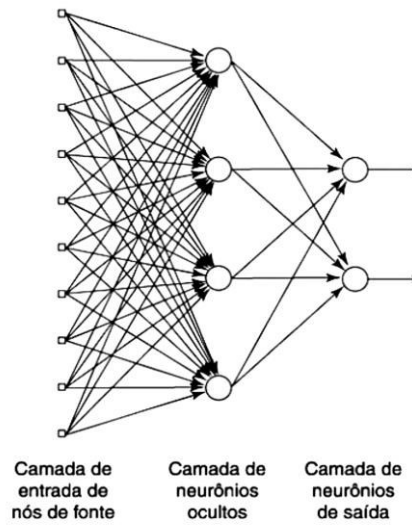
As redes recorrentes (Figura 4) possuem pelo menos um laço realimentado sendo essa uma das principais diferenças entre as redes *feed-forward* e as recorrentes. Uma rede recorrente pode consistir de pelo menos uma camada de neurônios, com cada um deles alimentando os dados de entrada com os sinais de saída. As principais aplicações para essas redes consistem em sistemas com variação do tempo, otimização e identificação de processos e controle (HAYKIN, 2001; SILVA et al., 2010).

Figura 2: Arquitetura de rede neural artificial feed-forward de camada simples.



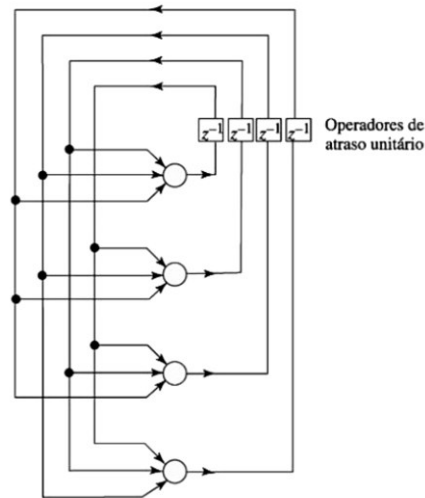
Fonte: Haykin (2001, p. 47).

Figura 3: Arquitetura de redes neurais feed-forward de camadas múltiplas.



Fonte: Haykin (2001, p. 48).

Figura 4: Arquitetura de redes neurais recorrentes.



Fonte: Haykin (2001, p. 48).

3.10.3 APLICAÇÕES DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS

A versatilidade e potencialidade das redes neurais artificiais permitem sua utilização nas mais diversas áreas do conhecimento, tais como: na medicina, para classificação e predições de tipos de câncer baseando-se no perfil genético do indivíduo; na química para obtenção de novos compostos poliméricos; na biologia, para identificação de novas espécies e na farmácia, para auxiliar a elaborações de formulações (SILVA et al., 2010).

Dentro do estudo da secagem, destaca-se a utilização das redes neurais na predição da cinética de secagem de resíduos sólidos orgânicos (PERAZZINI; FREIRE; FREIRE, 2013); das maçãs (MENLIK; ÖZDEMİR; KIRMACI, 2010); de batata doce (SINGH; PANDEY, 2011); da *Lasagnas angustifolia* L. (ABBASZADEH, et al., 2011) e das folhas de *Artemisia absinthium* (KARIMI et al., 2012).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

O sarnambi foi obtido do Mercado do Peixe localizado na cidade de São Luís – Maranhão no mês de março do ano de 2018. Para o preparo do sistema espumante foram utilizados albumina (Salto's, São Paulo, Brasil), amido de milho (Unilever, São Paulo, Brasil) e maltodextrina (Neonutri, Minas Gerais, Brasil).

4.2 Equipamentos utilizados

Os equipamentos utilizados foram: balança semianalítica (modelo BL320H, Shimadzu, Japão); termo-higrômetro (modelo 7664.01.0.00, Incoterm, China); liquidificador (modelo 4126, Oster, México); desidratador de alimentos (modelo PE 14, PardalTec, Brasil), mixer (modelo FPSTH2615R, Oster, USA) e paquímetro (modelo Vis, Polônia).

4.3 Procedimento Experimental

4.3.1 PREPARAÇÃO DO SARNAMBI

Inicialmente, os sarnambis foram descongelados à temperatura de 6 ° C durante 24 horas. Em seguida, passaram por um processo de limpeza, o qual constituiu na retirada manual das sujidades, lavagem com água corrente e escoamento da mesma. Posteriormente, foram colocados em sacos plásticos limpos e armazenados no freezer até a realização das secagens e determinação do conteúdo de umidade.

4.3.2 PREPARAÇÃO DO SISTEMA ESPUMANTE COM O SARNAMBI

A partir de estudos reológicos realizados anteriormente determinou-se que a proporção de 4:1:1 (p/p) de albumina, amido de milho e maltodextrina, respectivamente deveria ser aplicada para preparação do sistema espumante. Com o auxílio de um mixer, a albumina foi misturada a água destilada na proporção de 1:3,75 (p/v), respectivamente, e batida durante 4,5 minutos, até a formação do chamado ponto de neve. Em seguida, foram adicionados e misturados o amido e a maltodextrina por mais 1,5 minuto. O sarnambi que fora

previamente triturado foi adicionado a uma quantidade de 60% do peso do sistema espumante e incorporado com auxílio de um fouet durante um minuto.

4.3.3 CONSTRUÇÃO DAS CINÉTICAS DE SECAGEM EXPERIMENTAIS

As cinéticas de secagem do sarnambi foram realizadas com sistema espumante nas temperaturas de 30, 45 e 60 °C. A mistura do sarnambi com o sistema espumante foi cuidadosamente pesada e acondicionada em quatro bandejas cilíndricas de alumínio com diâmetro de 9,2 cm e altura 2,5 cm. Com o auxílio de um paquímetro, as espessuras de cada amostra foram medidas em diferentes posições. Posteriormente, as placas foram dispostas no centro do desidratador, em que a temperatura foi previamente ajustada, e em intervalos pré-estabelecidos a massa das bandejas foi medida. Com o auxílio do termo-higrômetro, acompanhou-se a variação de temperatura e umidade dentro do desidratador, os quais foram devidamente registrados. Ao final das 6 horas de secagem, mediu-se novamente a espessura de cada amostra. As temperaturas de 30 e 45 °C não chegaram à umidade de equilíbrio.

Para que os resultados das cinéticas de secagem fossem expressos em termos do conteúdo de água na base seca, b.s, determinaram-se as umidades iniciais para o sarnambi no sistema espumante. Para isso, pesou-se 2,0 g de cada amostra em triplicata, as quais foram mantidas durante 24 horas em estufa a 105 °C e ao final do tempo pesadas. A umidade foi determinada segundo a Equação 9.

$$X = \left(\frac{m_i - m_f}{m_i} \right) \quad (9)$$

onde X é a porcentagem de umidade, em base úmida; m_i e m_f são respectivamente, as massas inicial e final do material.

4.4 Modelagem matemática

O primeiro tratamento dos dados foi realizado no Excel 2016, em que foram calculados os conteúdos de umidade em base seca, e as curvas cinéticas de secagem do sarnambi em espuma. Além disso, no presente estudo foram utilizadas diferentes funções da biblioteca da *Statistic Toolbox* do *Matlab* ® 7.1 (The Mathworks Inc., Natick, MA, USA), para a modelagem e simulação das curvas de secagem nas temperaturas.

4.4.1 MODELOS DE CAMADA FINA

Os modelos de Weibull (Equação 10), Peleg (Equação 11), Henderson-Pabis (Equação 12), Logarítmica (Equação 13), Wang e Sing (Equação 14), Lewis (Equação 15), Page (Equação 16), Midilli (Equação 17), Dois Termos (Equação 18) e Aproximação por Difusão (Equação 19) foram ajustados aos dados experimentais através da função “nlinfit”, uma regressão não linear com análise robusta. A função tem como princípio o algoritmo de Gauss-Newton com modificações de Levenberg-Maquardt os quais reiteram iterativamente os valores e recalculam um ajuste de mínimos quadrados não linear.

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp\left(-\frac{t}{k_1}\right) \quad (10)$$

$$X = X_0 - \left(\frac{t}{k_1 + k_2 t}\right) \quad (11)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) k_2 \cdot \exp(-k_2 t) \quad (12)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) k_1 \cdot \exp(-k_2 t) + k_3 \quad (13)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \cdot (k_1 t^2 + k_2 t + 1) \quad (14)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp(-k_1 t) \quad (15)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp(-k_1 t^{k_2}) \quad (16)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp(-k_1 t^{k_2}) + k_3 t \quad (17)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) (k_1 \exp(-k_2 t) + k_3 \exp(-k_4 t)) \quad (18)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) k_1 \exp(-k_2 t) + (1 - k_1) \exp(-k_2 (k_3 t)) \quad (19)$$

onde X é o conteúdo de umidade (kg/kg b.s); X_e é o conteúdo de umidade de equilíbrio (kg/kg b.s); X_0 é o conteúdo de umidade inicial (kg/kg b.s); t é o tempo (s), k_1 , k_2 , k_3 e k_4 são as constantes de secagem (KALEEMULLAH; KAILAPPAN, 2006; GONÇALVES et al., 2016).

4.4.2 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO E DA ENERGIA DE ATIVAÇÃO

Para o cálculo dos coeficientes difusivos utilizou-se a lei de Fick para a placa infinita, a qual foi desenvolvida por Crank (1975), (Equação 20). Para isso utilizou-se o comando interativo *fminsearch* no *Matlab* ® 7.1 (The MathWorks Inc., Natick MA, EUA), utilizando os dados de tempo (s) e X (kg/kg b.s) experimentais para cada temperatura. Já a energia de ativação foi obtida por meio da linearização da relação de Arrhenius, que descreve a dependência do coeficiente difusivo (D_{ef}) com a temperatura (Equação.21).

$$Y = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp\left[-(2i+1)^2 \frac{\pi^2 D_{ef} t}{4L^2}\right] \quad (20)$$

onde, D_{ef} é a difusividade efetiva (m^2/s), i é o número de termos na série, t é o tempo de secagem (s) e, L é a metade da espessura da amostra (m) .

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (21)$$

onde D_0 é o fator pré exponencial (m^2/s), E_a é a energia de ativação (J/mol), R é a constante universal dos gases (8,314 J/mol/K) e T é a temperatura absoluta (K).

4.4.3 SIMULAÇÃO POR REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Como modelo de ajuste foi empregado as redes neurais artificiais (RNA) nas quais foram consideradas as arquiteturas *feed-forward* e *cascade-forward* de redes de regressão com uma camada oculta, as funções de treinamento *Levenberg-Maquardt* (*trainlm*) e *Bayesian Regularization* (*trainbr*) e as funções de transferência: *tansig* (Equação 22), *logsig* (Equação 23), *softmax* (Equação 24) e *radbax* (Equação 25) que foram validadas para cada arquitetura de rede. (VILLA-VÉLEZ et al., 2015). Os números de neurônios da camada oculta variaram de três a dez e foram testados para cada RNA.

$$\text{tansig}(n) = \frac{2}{[1 + \exp(-2n)] - 1} \quad (22)$$

$$\text{logsig}(n) = \frac{1}{[1 + \exp(-n)]} \quad (23)$$

$$\text{soft max}(n) = \frac{\exp(n)}{\text{sum}(\exp(n))} \quad (24)$$

$$radbas(n) = \exp(-n^2) \quad (25)$$

onde n é a matriz de vetores de entrada de rede (coluna).

Os dados de entrada e saída foram divididos em dois subgrupos: o primeiro corresponde à temperatura (T), umidade relativa (UR) e tempo (t) e o segundo ao conteúdo de umidade em base seca (x). Além disso, para cada rede neural foi realizada uma análise utilizando um *loop* de oito ciclos a fim de determinar os melhores desempenhos da rede neural e das condições dos parâmetros.

4.5 Análises estatísticas

Para as análises estatísticas também foi utilizado o *Software Matlab* ®7.1. Os coeficientes de determinação ajustados R^2_{adj} (Equação 26), o erro relativo médio, *MRE* (Equação 27) e o erro médio quadrático, para as redes neurais, (Equação 28), foram utilizados para avaliar o ajuste dos modelos empregados, baseando-se no número de parâmetros, proximidade entre os dados experimentais e calculados, e a qualidade de um estimador ou conjunto de predições em termos de sua variação e grau de liberdade na rede neural ou modelo predito, respectivamente.

Além disso, as funções *regstats* e *lillietest* foram usadas para observar os valores residuais entre os dados experimentais e calculados, e para determinar se os resíduos seguiam uma distribuição normal respectivamente (VILLA-VÉLEZ et al., 2015).

$$R^2_{adj} = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-m} \quad (26)$$

$$MRE = \frac{100}{n} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|x_i^* - x_i|}{x_i} \quad (27)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^* - x_i)^2 \quad (28)$$

Nas Equações (26) a (28), x_i^* representa os valores experimentais; x_i os valores estimados; n é o número de valores experimentais, m é o número de parâmetros estimados e R^2 é o coeficiente de determinação. Um modelo com *MRE* abaixo de 10% é considerado de boa precisão, enquanto que um modelo com *MRE* entre 10 e 15% é considerado aceitável, segundo Sablani, Baik e Marcotte (2002).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Cinética de Secagem

As ilustrações das amostras de secagem do sarnambi em espuma podem ser visualizadas no Apêndice A.

Os valores médios do conteúdo de umidade em base úmida para o sarnambi *in natura* e em espuma foram 73,24% e 72,40% respectivamente. O resultado obtido para o sarnambi *in natura* foi muito próximo dos 78,4% encontrados por Ramaswamy et al. (1982) e dos 75,47% obtidos por Fernandes (2009) em seus trabalhos sobre a secagem de camarão. Os elevados conteúdos de umidade encontrados demonstram o grau de perecibilidade do produto, uma vez que implica no aumento da atividade de água, deixando-o mais propício ao desenvolvimento de microrganismos e conseqüentemente a alterações das suas características, conforme atestado por Arnau et al. (1987).

Nas Tabelas 1 e 2 foram organizados os valores médios do conteúdo de umidade, em base seca das respectivas secagens *in natura* e em espuma do sarnambi em função do tempo, para as temperaturas de 30, 45 e 60 °C. Como esperado, todos os experimentos mostram um período de taxa decrescente.

As umidades relativas registradas ao longo da secagem *in natura*, variaram de 33 a 35% a 30 °C, de 19 a 36% a 45 °C e de 10% a 60 °C. Já as espessuras para as respectivas temperaturas foram entre 0,90 e 1,115 cm; 0,954 e 0,993 cm; e de 1,03 a 1,019 cm, respectivamente. No que diz respeito às secagens em leito de espuma os valores de umidade relativa foram na faixa de 31 a 45% a 30 °C; 10 a 28% a 45°C e 10% a 60°C, enquanto que as espessuras foram de 0,704 a 0,803 cm; 0,698 a 0,754 e 0,686 a 0,698 cm, para as respectivas temperaturas estudadas.

Tabela 1: Valores experimentais da cinética do sarnambi *in natura*

Tempo (s)	X (kg/kg, b.s.)		
	30 °C	45 °C	60 °C
0	2,737 ± 0,000	2,737 ± 0,000	2,737 ± 0,000
300	2,703 ± 0,013	2,638 ± 0,013	2,606 ± 0,016
600	2,673 ± 0,023	2,560 ± 0,023	2,473 ± 0,021
900	2,640 ± 0,025	2,478 ± 0,025	2,331 ± 0,033
1200	2,608 ± 0,027	2,403 ± 0,027	2,191 ± 0,037

Tabela 1 (Continuação): Valores experimentais da cinética do sarnambi *in natura*

1500	2,541 ± 0,031	2,329 ± 0,031	2,057 ± 0,037
1800	2,478 ± 0,033	2,252 ± 0,033	1,934 ± 0,040
2400	2,419 ± 0,034	2,097 ± 0,034	1,710 ± 0,052
3000	2,357 ± 0,039	1,922 ± 0,039	1,497 ± 0,121
3600	2,296 ± 0,042	1,758 ± 0,042	1,302 ± 0,065
4200	2,230 ± 0,038	1,595 ± 0,038	1,117 ± 0,066
4800	2,159 ± 0,033	1,441 ± 0,033	0,955 ± 0,060
5400	2,100 ± 0,034	1,296 ± 0,034	0,813 ± 0,056
6000	2,045 ± 0,031	1,158 ± 0,031	0,705 ± 0,059
6600	1,994 ± 0,035	1,034 ± 0,035	0,611 ± 0,041
7200	1,938 ± 0,041	0,925 ± 0,041	0,472 ± 0,033
8400	1,839 ± 0,044	0,736 ± 0,044	0,364 ± 0,022
9600	1,737 ± 0,039	0,583 ± 0,039	0,287 ± 0,014
10800	1,652 ± 0,044	0,455 ± 0,044	0,232 ± 0,011
12000	1,571 ± 0,029	0,382 ± 0,029	0,192 ± 0,011
13200	1,503 ± 0,026	0,318 ± 0,026	0,161 ± 0,012
14400	1,444 ± 0,023	0,266 ± 0,023	0,137 ± 0,013
16200	1,367 ± 0,021	0,226 ± 0,021	0,109 ± 0,012
18000	1,308 ± 0,019	0,179 ± 0,019	0,092 ± 0,014
19800	1,259 ± 0,015	0,144 ± 0,015	0,077 ± 0,014
21600	1,221 ± 0,015	0,119 ± 0,015	0,065 ± 0,015

* correspondentes às médias ± desvio padrão da quadruplicata

Fonte: Próprio Autor (2018).

Tabela 2: Valores experimentais da cinética de secagem em espuma do sarnambi.

Tempo (s)	X (kg/kg, b.s.)		
	30 °C	45 °C	60 °C
0	2,623±0,000	2,623±0,000	2,623±0,000
300	2,545±0,012	2,555±0,011	2,467±0,024
600	2,495±0,013	2,482±0,021	2,337±0,031
900	2,446±0,014	2,409±0,028	2,198±0,041
1200	2,393±0,015	2,338±0,035	2,082±0,042
1500	2,343±0,017	2,268±0,040	1,972±0,047
1800	2,297±0,017	2,196±0,045	1,866±0,048
2400	2,211±0,016	2,054±0,053	1,658±0,049
3000	2,120±0,018	1,925±0,056	1,488±0,049
3600	2,041±0,022	1,798±0,059	1,330±0,045
4200	1,963±0,027	1,681±0,060	1,183±0,046
4800	1,894±0,032	1,568±0,059	1,048±0,046
5400	1,814±0,035	1,457±0,055	0,917±0,047

Tabela 2 (Continuação): Valores experimentais da cinética de secagem em espuma do sarnambi.

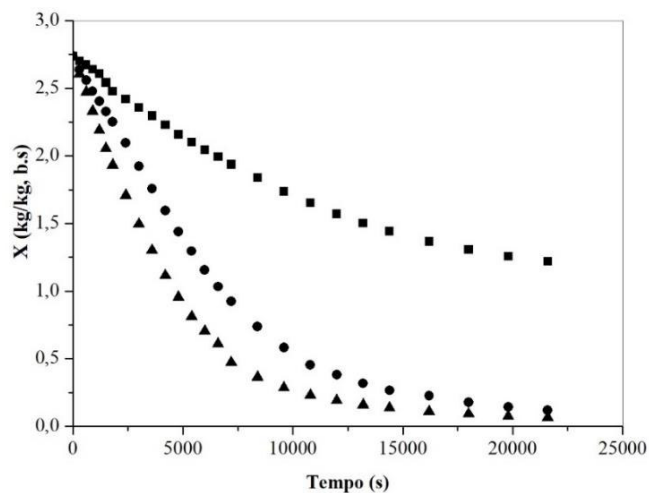
6000	1,744±0,039	1,355±0,053	0,796±0,048
6600	1,675±0,043	1,262±0,049	0,682±0,047
7200	1,609±0,047	1,174±0,045	0,584±0,047
8400	1,471±0,053	1,023±0,037	0,400±0,044
9600	1,351±0,057	0,896±0,029	0,260±0,034
10800	1,230±0,063	0,788±0,022	0,159±0,031
12000	1,121±0,067	0,694±0,017	0,097±0,029
13200	1,023±0,068	0,620±0,014	0,067±0,024
14400	0,931±0,068	0,550±0,012	0,054±0,021
16200	0,797±0,072	0,444±0,029	0,047±0,017
18000	0,686±0,073	0,403±0,024	0,040±0,014

* correspondentes às médias \pm desvio padrão da quadruplicata

Fonte: Próprio Autor (2018).

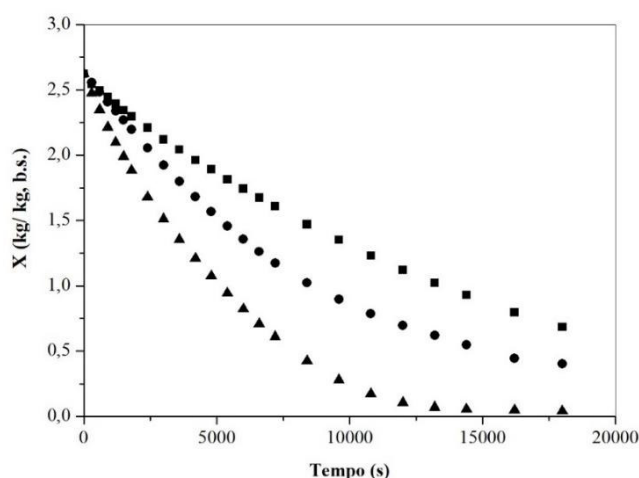
Através dos dados apresentados nas Tabelas 1 e 2 foi possível construir as Figuras 5 e 6, que representam as curvas das cinéticas de secagem do sarnambi *in natura* e em espuma, respectivamente.

Figura 5: Curva da secagem do sarnambi *in natura* para as temperaturas de 30 °C (■), 45 °C (●) e 60 °C (▲).



Fonte: Próprio Autor (2018).

Figura 6: Curva da secagem do sarnambi em espuma para as temperaturas de 30 °C (■), 45 °C (●) e 60 °C (▲).



Fonte: Próprio autor (2018).

Em ambas figuras o incremento da temperatura favoreceu o aumento da taxa de secagem, resultando em um menor tempo de secagem, como se pode observar. Esse comportamento foi observado por Djaeni et al. (2013) em seu estudo sobre secagem em espuma de carragenina e por Azizpour et al.,(2013) em estudos sobre a secagem de camarão em leite de espuma.

Comparando os resultados da Tabelas 1 e 2 e das Figuras 5 e 6 nota-se que as secagens em espuma foram as que apresentaram tempos mais curtos. Venkatachalam et al. (2014), explicaram que a formação de espuma torna o material mais poroso e mais suscetível à evaporação de líquidos em sua camada mais interna, devido às forças capilares que agem através da fina película líquida que separam as duas bolhas de espuma.

De acordo com Franco et al. (2015), no estudo de secagem em espuma do suco de yacon, a espessura da espuma foi uma variável que influenciou consideravelmente o tempo de secagem. No trabalho foi observado uma relação de proporcionalidade entre essas variáveis. Isso é explicado devido ao caminho a ser percorrido pela água para alcançar a superfície, ou seja, quanto mais longo esse caminho, maior o tempo de secagem. Além disso, a transferência de calor perde eficiência devido à dificuldade de penetração de calor.

5.2 Ajuste dos dados de secagem do sarnambi em leite de espuma aos modelos matemáticos

5.2.1 MODELOS DE CAMADA FINA

Através das modelagens empregando os modelos de camada fina de Weibull, Peleg, Henderson-Pabis, Lewis, Page, Aproximação por difusão, Midilli et. al, Logarítmico, Wang Sing e Dois Termos para a secagem de sarnambi em espuma, construiu-se a Tabela 3 onde foram dispostos os valores dos parâmetros de cada um dos modelos, e a Tabela 4, onde pode-se encontrar os valores dos erros médios quadrados e dos coeficientes de determinação.

Tabela 3: Parâmetros estimados dos modelos de camada fina para os sistemas com espuma às temperaturas de 30, 45 e 60 °C.

Modelos	Parâmetros	Temperatura (°C)		
		30	45	60
Weibull	k	13801,0	9038,9	4794,2
Lewis	k_1	$7,246 \times 10^{-5}$	$1,106 \times 10^{-4}$	$2,085 \times 10^{-4}$
Peleg	k_1	5436,4	3215,6	1638,6
	k_2	0,2158	0,2643	0,2818
Henderson-Pabis	k_1	1,0024	1,01343	1,0237
	k_2	$7,276 \times 10^{-5}$	$1,129 \times 10^{-4}$	$2,147 \times 10^{-4}$
Page	k_1	0,0230	$8,080 \times 10^{-5}$	$6,839 \times 10^{-5}$
	k_2	2.7890	1,0350	1,1310
Logarítmico	k_3	1,1530	1,0060	1,0590
	k_1	$5,637 \times 10^{-5}$	$1,154 \times 10^{-4}$	$1,905 \times 10^{-5}$
	k_2	-0,4241	0,0259	-0,1282
Wang e Sing	k	$1,207 \times 10^{-9}$	$2,473 \times 10^{-9}$	$4,577 \times 10^{-9}$
	k_1	$-6,337 \times 10^{-5}$	$-9,319 \times 10^{-5}$	$-1,399 \times 10^{-4}$
	k_2	$1,040 \times 10^{-4}$	$1,030 \times 10^{-4}$	$1,023 \times 10^{-4}$
Midilli et al.	k_1	$1,040 \times 10^{-4}$	$5,350 \times 10^{-5}$	$8,844 \times 10^{-5}$
	k_2	0,9407	1,0878	1,0977
	k_3	$-1,381 \times 10^{-5}$	$5,471 \times 10^{-6}$	$-3,278 \times 10^{-6}$
Dois Termos	k_1	$-2,856 \times 10^{-3}$	$-1,758 \times 10^{-2}$	$-3,2216 \times 10^{-2}$
	k_2	0,9938	0,9938	0,9938
	k_3	1,0029	1,0176	1,0322
	k_4	7,2816	$1,135 \times 10^{-4}$	$2,168 \times 10^{-4}$
Aproximação da Difusão	k_1	1,0021	1,0182	1,0389
	k_2	$7,029 \times 10^{-5}$	$1,137 \times 10^{-4}$	$2,178 \times 10^{-4}$
	k_3	-2,6550	15,1410	4,7085

Fonte: Próprio Autor (2018).

Os valores descritos na Tabela 4 mostraram que o modelo que melhor se adequou à cinética de secagem do sarnambi em espuma foi o de Midilli et al. com R^2 maior que 0,990, em consonância com o obtido por Azizpour et al. (2013) em estudo sobre a cinética de

secagem do camarão em espuma, e de Silva et al. (2008), sobre a desidratação da polpa de tamarindo pelo método de camada de espuma.

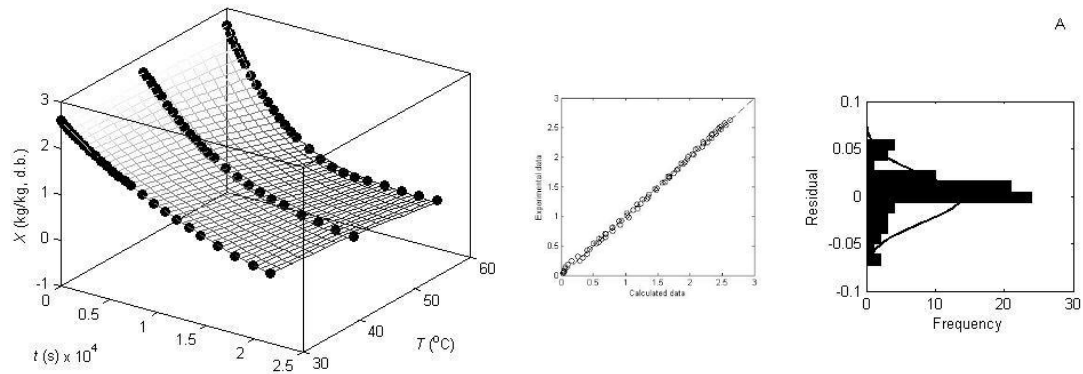
A Figura 7 mostra os ajustes das curvas de secagem aos modelos de Midilli et al., além dos gráficos de resíduos entre os dados experimentais e calculados, comprovando a aplicabilidade dos mesmos ao sistema estudado.

Tabela 4: Avaliação estatística dos modelos de camada fina para os sistemas com espuma às temperaturas de 30, 45 e 60 °C.

Modelos	Parâmetros Estatísticos	Temperatura (°C)		
		30	45	60
Weibull	R^2_{adj}	0,998	0,999	0,996
	MRE (%)	2,308	2,114	46,954
Lewis	R^2_{adj}	0,999	0,997	0,989
	MRE (%)	0,700	4,764	80,28
Peleg	R^2_{adj}	0,998	0,999	0,995
	MRE (%)	2,822	1,852	43,081
Henderson-Pabis	R^2_{adj}	0,999	0,999	0,996
	MRE (%)	0,409	1,527	38,911
Page	R^2_{adj}	0,999	0,997	0,9873
	MRE (%)	1,515	5,106	106,330
Logarítmico	R^2_{adj}	0,998	0,999	0,996
	MRE (%)	2,308	2,114	46,954
Wang e Sing	R^2_{adj}	0,044	0,999	0,997
	MRE (%)	94,047	2,236	24,449
Midilli et al.	R^2_{adj}	0,999	0,999	0,998
	MRE (%)	0,643	0,879	28,25
Dois Termos	R^2_{adj}	0,998	0,999	0,995
	MRE (%)	2,268	1,798	41,71
Aproximação por Difusão	R^2_{adj}	0,999	0,999	0,995
	MRE (%)	1,022	1,819	41,249

Fonte: Próprio Autor (2018)

Figura 7: Valores experimentais (●) e valores calculados (malha, □) através dos melhores modelos de ajuste para Page e Midilli e análises residuais da carne do sarnambi em espuma.



Fonte: Próprio autor (2018).

5.2.2 MODELO DIFUSIVO

Na Tabela 5 encontram-se os valores dos coeficientes difusivos para as temperaturas de 30, 45 e 60 °C, os coeficientes de ajuste e a energia de ativação.

Tabela 5: Coeficientes de difusão (D_{ef}), coeficiente de determinação e energia de ativação para a secagem realizada nas temperaturas de 30, 45 e 60 °C.

T (°C)	D_{ef} (m ² /s)	R^2	D_o	E_a (kJ/mol)
30	$1,225 \times 10^{-10}$	0,975		
45	$1,865 \times 10^{-10}$	0,984	-12,962	24,891
60	$2,99 \times 10^{-10}$	0,985		

Fonte: Próprio Autor (2018).

Através da Tabela 5 nota-se que o coeficiente difusivo aumenta com o aumento da temperatura, o que é esperado, uma vez que a elevação de temperatura diminui a pressão do líquido e sua resistência à evaporação, o que facilita a difusão das moléculas de água no material (CORRÊA et al., 2010).

Segundo Kashaninejad (2007), a energia de ativação do processo difusivo é a energia necessária para iniciar o processo difusivo.

A energia de ativação para a secagem da carne do sarnambi em espuma foi de 24,891 kJ/mol, resultado este próximo dos valores obtidos por Azizpour et al. (2013) para a secagem de camarão em espuma.

5.2.3 SIMULAÇÃO COM REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

A partir da simulação com redes neurais artificiais da secagem em leito de espuma do sarnambi construiu-se a Tabela 6, onde foram dispostos os melhores resultados para a função de transferência estudadas, bem como suas variações estatísticas.

Tabela 6: Resultados com melhores ajustes e validação estatística das análises de redes neurais artificiais da cinética de secagem do sarnambi em espuma.

Função de treinamento <i>Levenberg-Maquardt backpropagation</i>							
Arquitetura	Função de Transferência	Neurônio	Número de Parâmetros	R	R ² _{adj}	MRE (%)	(MSE×10 ²)
<i>Feed-forward</i>	<i>tansig</i>	8	41	0,9980	0,9977	4,9011	2,6094
	<i>softmax</i>	8	41	0,9980	0,9977	5,0654	2,6220
	<i>logsig</i>	7	36	0,9980	0,9978	5,0522	2,6098
	<i>radbas</i>	8	41	0,9980	0,9977	5,1380	2,6416
<i>Cascade-forward</i>	<i>tansig</i>	7	39	0,9980	0,9977	5,1813	2,669
	<i>softmax</i>	8	44	0,9980	0,9977	5,1153	2,5940
	<i>logsig</i>	7	39	0,9980	0,9977	5,0820	2,6320
	<i>radbas</i>	8	44	0,9980	0,9977	4,9941	2,6170
Função de treinamento <i>Bayesian Regularization</i>							
Arquitetura	Função de Transferência	Neurônio	Número de Parâmetros	R	R ² _{adj}	MRE (%)	(MSE×10 ²)
<i>Feed-Foward</i>	<i>tansig</i>	8	41	0,9979	0,9979	5,2179	2,6889
	<i>softmax</i>	9	46	0,9978	0,9975	5,7150	2,8383
	<i>logsig</i>	8	41	0,9979	0,9977	5,4670	2,6951
	<i>radbas</i>	8	41	0,9977	0,977	5,2053	2,6837
<i>Cascade-forward</i>	<i>tansig</i>	7	39	0,9979	0,9977	5,3321	2,7105
	<i>softmax</i>	9	49	0,9977	0,9974	6,1121	2,8804
	<i>logsig</i>	7	39	0,9979	0,9977	5,3846	2,7094
	<i>radbas</i>	6	34	0,9978	0,9976	5,4013	2,8049

Fonte: Próprio Autor (2018)

Os valores obtidos mostram uma boa validação para as duas arquiteturas, sendo que para a função de treinamento *Levenberg-Maquardt back propagation*, obteve-se como melhor resultado, a função sigmoide (*logsig*) com sete neurônios na camada oculta para a rede *feed-forward*, com R²_{adj} = 0,998, MRE = 5,0522 e MSE = 0,026 e para a rede *cascade-forward* com

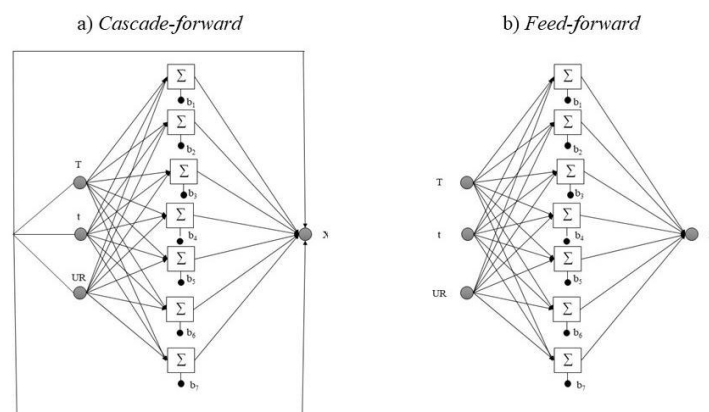
$R^2_{adj} = 0,998$, $MRE = 5,082$ e $MSE = 0,026$. Já para a função de treinamento *Bayesian Regularization* o melhor resultado para a rede *feed-forward* foi a função radial (*radbas*) com oito neurônios e $R^2_{adj} = 0,998$, $MRE = 5,205$ e $MSE = 0,027$ e para a rede *cascade-forward* foi a função hiperbólica (*tansig*) com sete neurônios, e $R^2_{adj} = 0,998$, $MRE = 5,332$ e $MSE = 0,027$.

Segundo Braga et al. (2007) o número de neurônios e, conseqüentemente, o número de parâmetros da rede é que determinam a complexidade do modelo neural. Sendo assim, quanto maior for o número de neurônios, maior será a abrangência da estrutura neural em termos de soluções possíveis para a solução de um determinado problema.

A partir dos resultados da Tabela 6, pode-se observar que os valores de MRE foram inferiores a 15%, para todas as arquiteturas indicando que os modelos são aceitáveis para as redes treinadas.

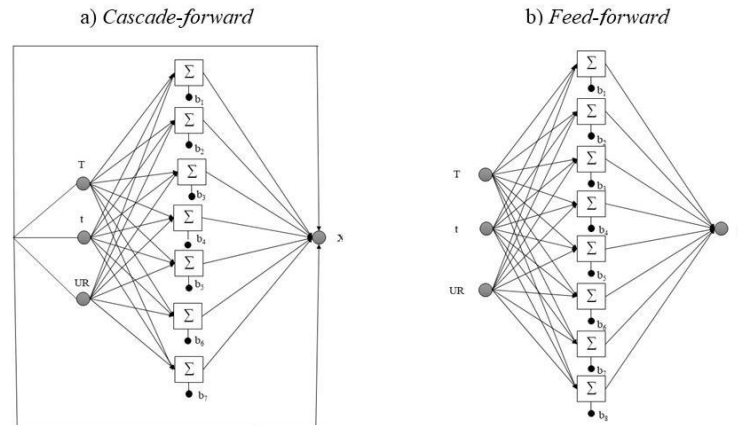
A Figura 8 ilustra as estruturas das redes *feed-forward* e *cascade-forward* da secagem de sarnambi em leito de espuma composta por três entradas, uma saída e sete neurônios, treinada pela função *Levenberg-Maquardt back propagation*. Já a Figura 9 mostra as redes neurais *feed-forward* com oito neurônios e *cascade-forward* com sete neurônios treinadas pela função *Bayesian Regularization*.

Figura 8: Arquitetura dos melhores resultados das redes *cascade-forward* (a) e *feed-forward* (b) da cinética de secagem do sarnambi em espuma treinados pela função *Levenberg-Maquardt backpropagation*.



Fonte: Próprio Autor (2018)

Figura 9: Arquitetura dos melhores resultados das redes *cascade-forward* (a) e *feed-forward* (b) da cinética de secagem do sarnambi em espuma treinados pela função *Bayesian Regularization*.



Fonte: Próprio Autor (2018).

Em ambas as arquiteturas aplicadas no presente trabalho, os melhores ajustes para o conjunto de dados de treinamento da cinética de secagem do sarnambi em leito de espuma foram obtidos com sete e oito neurônios na camada oculta. Perazzine, Freire e Freire (2013), ao utilizarem a rede *feed-forward* para prever o comportamento do conteúdo de umidade ao longo do tempo de secagem de resíduos orgânicos, encontraram o número ideal de dois neurônios da camada intermediária, sendo que o tempo, a temperatura e a velocidade do ar foram utilizadas como entradas e a umidade como saída para treinamento dessa rede.

Hernández-Perez et al. (2004) empregaram a rede *feed-forward* para prever a cinética de secagem da mandioca e da manga. Nesse estudo foi encontrado como melhor ajuste três neurônios na camada oculta, sendo que os autores utilizaram como variáveis de entrada a temperatura do ar, velocidade do ar, encolhimento, tempo e umidade do ar e de saída a temperatura e a umidade de cada produto.

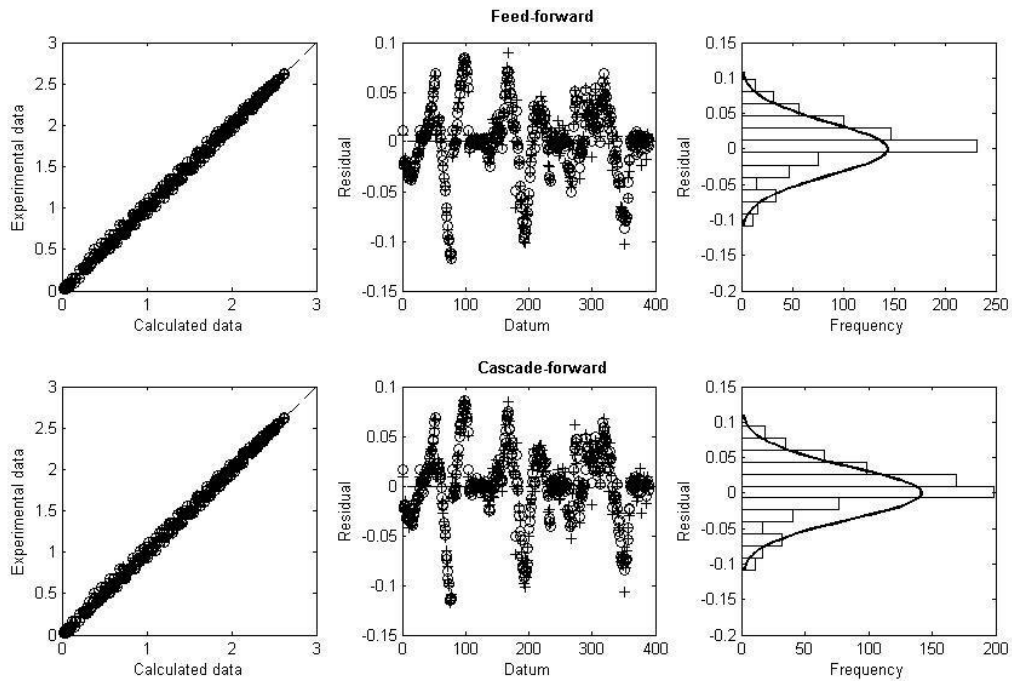
Erenturk e Erenturk (2007), ao usarem a mesma rede para estimar o comportamento dinâmico de cenoura fizeram o treinamento com vinte cinco neurônios na camada oculta, no qual a temperatura, velocidade do ar, tempo de secagem e tamanho da raiz foram utilizados como entrada e umidade relativa como saída.

Villa-Vélez, Vaquiro e Telis-Romero (2015b) ao empregarem a rede *cascade-forward* na modelagem da taxa de hidrólise da biomassa lignocelulósica através da ultrassom de alta intensidade, encontraram sete neurônios na camada intermediária como melhor ajuste. Já Lashkarbolooki, Shafipour e Hezave (2013) usando a mesma rede fizeram a correlação

entre o rendimento de extração de óleo de hortelã em diferentes condições operacionais, encontrando assim treze neurônios na camada oculta.

A Figura 10 mostra o desempenho estatístico das redes neurais. Em ambas as figuras pode-se notar um bom ajuste na modelagem, indicando assim que as arquiteturas estudadas, podem ser empregadas, dentro das condições em que o presente estudo foi realizado, para simular as curvas de secagem do sarnambi em espuma.

Figura 10: Análise residual entre as curvas de secagem experimental e calculada do sarnambi em espuma, para os dados modelados pela função de treinamento *Levenberg-Maquardt backpropagation* (o) e para *Bayesian Regularization* (+).



Fonte: Próprio Autor (2018).

6 CONCLUSÕES

Com base nos estudos e das umidades de equilíbrio na secagem, percebe-se que o sarnambi apresenta elevados valores de umidade, o que favorece o desenvolvimento microbiano. Sendo assim, é importante ressaltar o uso de métodos de secagem e combinados, como o caso específico da secagem convectiva e por sistemas espumantes a fim de fornecer informações sobre a elaboração de novos produtos, como aditivos alimentícios. Através da avaliação das cinéticas de secagem estudadas foi possível notar que além da temperatura ser uma variável importante no processo, a utilização de sistemas espumantes aumenta a taxa de evaporação no material, mesmo a baixas temperaturas. Para os modelos de camada fina o que melhor se adequou à cinética estudada foi o de Midilli com coeficientes de ajuste superiores a 0,990, já as redes neurais mostraram-se eficazes, tendo em vista os resultados obtidos e a validação estatística para a faixa de temperatura de 30 a 60°C.

REFERÊNCIAS

- ABBASZADEH, A. et al. Evaluation of thin-layer drying models and neural network for describing drying kinetics of *Lasagnas angustifolia* L. **International Food Research Journal**, v. 18, n. 4, p. 1321-1328, 2011.
- ARNAU, J.; HUGAS, M.; MONFORT, J. M. **El jamón curado: Aspectos técnicos Girona**, Itália, Grafis-Sant S. A. 1987, 352 p.
- AZEVEDO, E. G.; ALVES, A. M. **Engenharia de Processos de Separação**. Lisboa: IST Press, 2009.
- AZIZPOUR, M.; MOHEBBI, M.; KHODAPARAST, M. H. H.; VARIDI, M. Foam-mat drying of shrimp: characterization and drying kinetics of foam. **Agricultural Engineering International**, p. 159-165, 2013.
- AZIZPOUR, M.; MOHEBBI, M.; KHODAPARAST, M. H. H.; VARIDI, M. Optimization of Foaming Parameters and Investigating the Effects of Drying Temperature on the Foam-Mat Drying of Shrimp (*Penaeus indicus*). **Drying Technology**, v. 32, n. 4, p.374-384, 2014.
- BAPTESTINI, F. M.; CORRÊA, P. C.; JUNQUEIRA, M. S.; RAMOS, A. M.; VANEGAS, J. D.; COSTA, C. F. Modelagem matemática da secagem de espuma de graviola. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 19, n. 12, 2015.
- BRAGA, A. de P.; CARVALHO, A. P. de L. F. de; LUDERMIR, T. B. **Redes neurais artificiais: teoria e aplicações**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- BRENNAN J.G. **Food Processing Handbook**. 1. ed. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006. p. 85-95.
- Brooker, D.B.; Bakker-Arkema, F.W.; Hall, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: The AVI Publishing Company, 1992. 450 p.
- CAMARGO, G. A. **Novas Tecnologias e Pré-tratamento: Tomate Seco Embalado a Vácuo**. 2005. 175 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos)-Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- CANAPA, A.; MAROTA, I.; ROLLO, F.; OLMO, E. 1996. Phylogenetic analysis of Veneridae (Bivalvia): comparison of molecular and paleontological data. *J. Mol. Evol*, 43: 517-522.
- CARNEIRO, Diego Dias. **Desidratação de alimentos por Foam-Mat Drying**. 2008. 9p Seminário (Processamento de Alimentos). Instituto de Tecnologia, Departamento de Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2008.
- CASARIN, F.; MENDES, C. E.; LOPES, T. J.; MOURA, N. F. Planejamento experimental do processo de secagem da amorapreta (*Rubus* sp.) para a produção de farinha enriquecida com compostos bioativos. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 19, 2016.

CELESTINO, S. M. C. Princípios de secagem de alimentos. **Planaltina: Embrapa Cerrados**, 2010.

CELMA, A. R.; CUADROS, F.; LÓPEZ-RODRÍGUEZ, F. Convective drying characteristics of sludge from treatment plants in tomato processing industries. **Food and Bioproducts Processing**, v. 90, n. 2, p. 224-234, 2011.

CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BOTELHO, F. M.; GONELI, A. L. D.; CARVALHO, F. M. **Modelagem Matemática e Determinação das Propriedades Termodinâmicas do Café (Coffea arabica L.) Durante o Processo de Secagem**. Revista Ceres, Viçosa, v. 57, n.5, p. 595-601, 2010.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A. P. **Modelagem Matemática e Determinação das Propriedades Termodinâmicas do Café (Coffea arabica L.) Durante o Processo de Secagem**. Revista Ceres, Viçosa, v. 57, n.5, p. 595-601, 2010.

DIEGUES, A. C. S. Pescadores, camponeses e trabalhadores do mar. São Paulo: Ed. Ática., 1983. (Série Ensaio, n. 94).

DJAENI, M.; Prasetyaningrum, A.; Sasongko, S. B.; W. Widayat, W., Hii, C. W. Application of foam-mat drying with egg White for carrageenan: drying rate and product quality aspects. **Journal of Food Science and Technology**, 2013.

ERENTURK, S.; ERENTURK, K. Comparison of genetic algorithm and neural network approaches for the drying process of carrot. **Journal of Food Engineering**, v. 78, p. 905-912, 2007.

FELLOWS, P. **Food processing technology: Principles and practice**. 2 ed. New York, USA: CRC Press. 2006. cap.15, p.309-340.

FERNANDES, T. M. **Aproveitamento dos subprodutos da indústria de beneficiamento do camarão na produção de farinha**. 2009. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

FERREIRA, M. M. P. **Desenvolvimento, caracterização e secagem de sementes com cobertura artificial**. 2003. 264 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.

FORSON, F. K. et al. Design of mixed-mode natural convection solar crop dryers: application of principles and rules of thumb. **Renewable Energy**, Oxford, v. 32, n. 14, p. 2306-2319, 2007.

FRANCO, T. S., PERUSSELLO, C. A.; ELLENDERSEN, L. S. N.; MASSON, M. L. Foam mat drying of yacon juice: experimental analysis and computer simulation. **Journal of Food Engineering**, v. 158, p. 48-57, 2015.

GEANKOPLIS, C. J. **Procesos de transporte y operaciones unitarias**. 3 ed. CECSA: México, 1998.

GONÇALVES, J. Q.; SILVA, M. A. P. DA; PLÁCIDO, G. R.; CALIARI, M.; SILVA, R. M.; MOURA, L. C.; SOUZA, D. G. **Secagem da Casca e Polpa da Banana Verde (Musa**

Acuminata): Propriedades Físicas e Funcionais da Farinha. Global. Science Technology. Rio Verde, v.09, n.03, p.62 - 72, set/dez. 2016.

HALL, C. W. **Handbook of industrial drying.** Montreal: Taylor & Francis Group, 2006. 110p.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática.** 2. ed. Bookman, 2001.

HERNÁNDEZ-PÉREZ, J. A.; GARCÍA-ALVARADO. M. A.; TRYSTRAM, G. HEYD, B. Neural networks for the heat and mass transfer prediction during drying of cassava and mango. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 5, p. 57-64, 2004.

HIMMELBLAU, D. M. **Industrial Engineering Chemical Research**, v. 47, p. 5782-5796, 2008.

KALEEMULLAH, S.; KAILAPPAN, R. **Modelling of thin-layer kinetics of red chillies.** J. Food Eng., v. 76, p. 531-537, 2006.

KARIM A. A.; WAI C. C. Foam-mat drying of starfruit (*Averrhoa carambola L.*) purée. Stability and air drying characteristics. **Food Chemistry**, v. 64. p. 337-343. 1999.

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

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L. G. **Thin Layer Drying Characteristics and Modeling of Pistachio Nuts.** Journal of Food Engineering, Essex, v. 78, n. 1, p. 98-108, 2007.

LASHKARBOLOOKI, M.; SHAFIPOUR, Z. S.; HEZAVE, A. Z. Trainable cascade-forward back-propagation network modeling of spearmint oil extraction in a packed bed using SC-CO₂. **Journal of Supercritical Fluids**, v. 73, p. 108-115, 2013.

MENLIK, T.; ÖZDEMİR, M. B.; KIRMACI, V. Determination of freeze-drying behaviors of apples by artificial neural network. **Expert Systems with Applications**, v. 37, p. 7669–7677, 2010.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z.. A NEW MODEL FOR SINGLE-LAYER DRYING. **Drying Technology**, v. 20, n. 7, p.1503-1513, 2002.

MOREIRA, I. C. N. **Impactos do extrativismo de Anomalocardia brasiliiana (Gmelin, 1791) nos estuários dos rios Paciência e Cururuca, São Luís, Maranhão: uma visão etnoconservacionista.** 2007. 60 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Oceanografia, Programa de Mestrado em Biodiversidade e Conservação, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2007.

MUJUMDAR, Arun S. (Org.). **Handbook of Industrial Drying.** 3. ed. New Jersey: Clifton, 2006. 1312 p.

OLIVEIRA, R. L. M.; LAVANDER, H. D.; SANTOS, L. B. G. DOS; CALAZANS, N. K. F.; GÁLVEZ, A. O.; PEIXOTO, S. R. M. Hatchery Rearing of the Venerid Clam *Anomalocardia brasiliana* (Gmelin, 1791). **Journal Of Shellfish Research**, [s.l.], v. 35, n. 1, p.27-30, abr. 2016. National Shellfisheries Association. <http://dx.doi.org/10.2983/035.035.0104>.

PERAZZINI, H.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Drying kinetics prediction of solid waste using semi-empirical and artificial neural network models. **Chemical Engineering Technology**, v. 36, n. 7, p. 1193-1201, 2013.

PEREIRA, T. J. F.; CASTRO, A. C. L. DE; FERREIRA, H. R. S.; SOARES, L. S.; SILVA, M. H. L.; AZEVEDO, J. W. J.; FRANÇA, V. L.; MOREIRA, M. S. EXTRATIVISMO DE MARISCO NA ILHA DO MARANHÃO (MA). **Revista de Políticas Públicas**, São Luís, v. 21, n. 2, p.831-853, 05 abr. 2017.

PICTON, P. **Neural Networks**. 2 ed. Palgrave, 2000. cap. 1, p. 1.

QUEIROZ, D. M.; PEREIRA, J. A.; MELO, E. C. **Modelos matemáticos de simulação de secagem de grãos**. Viçosa: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, 1985. 59 p.

RAJKUMAR, P.; KAILAPPAN, R.; VISWANATHAN, R.; RAGHAVAN, G. S. V.; RATTI, C. Foam mat drying of Alphonso mango pulp. **Drying Technology**, v. 25, n. 2, p. 357-365, 2007.

RAMASWAMY, H. S; LO, K. V.; STALEY, L. M. Air drying of shrimp. **Canadian Agricultural Engineering**, v. 24, n. 2, p. 123-128, 1982.

RODRIGUES, A. M. L.; BORGES-AZEVEDO, C. M.; HENRY-SILVA, G. G.. Aspectos da biologia e ecologia do molusco bivalve *Anomalocardia brasiliana* (Gmelin, 1791) (Bivalvia, Veneridae). **Brazilian Journal of Biosciences**, p.377-383, 2010.

SABLANI, S. S.; BAIK, O.-D.; MARCOTTE, M. Neural networks for predicting thermal conductivity of bakery products. **Journal of Food Engineering**, v. 52, p. 299-304, 2002.

SALLES, P. B. D.; MACEDO, Y. B.; FIGUEIREDO, E. L. Caracterização físico-química e microbiológica da carne do molusco Bivalve Sarnambi (*Phacoides pectinitus*) coletado nas praias em Algodual e Salinópolis, no Pará. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 11, n. 1, p.2545-2261, 2017.

SANDE, D.; MELO, T. A.; OLIVEIRA, G. S.A.; BARRETO, L.; TALBOT, T.; BOEHS, G.; ANDRIOLI, J. L. Prospecção de moluscos bivalvez no estudo da poluição dos rios Cachoeira e Santana em Ilhéus, Bahia, Brasil. **Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science**, São Paulo, v. 47, n. 3, p. 190-196, 2010. <https://doi.org/10.11606/issn.1678-4456.bjvras.2010.26854>.

SANKAT C. K.; CASTAIGNE F. **Foaming and drying behaviour of ripe bananas**. *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.* v. 37. p, 517–525. 2004.

SANTOS, T. J. **Modelagem matemática da cinética de secagem da polpa e casca do abricó (*Mammea americana*)**. 2017. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia

Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2017.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y. Avaliação e ações prioritárias para a conservação da biodiversidade da zona costeira e marinha. São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, 1999. Relatório Técnico.

SILVA, A. S.; GURJÃO, C. O.; ALMEIDA, F. A. C.; BRUNO, R. L. A.; PEREIRA, W. E. Desidratação da polpa de tamarindo pelo método de camada de espuma. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 6, p.1899-1905, 2008.

SILVA, B. G. **Modelagem e simulação do processo de secagem dos frutos de aroeiravermelha (Schinus terebinthifolius Raddi)**. 2013. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

SILVA, I. N. de; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. **Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas: curso prático**. Artliber, 2010.

SILVA, L. S.; REIS, G. G.; MANCINI, M. C.; CALÇADA, L. A. **Determinação do coeficiente global de transferência de massa na secagem de sementes de agrião e agrião d'água em leito fixo e leito fluidizado: modelo a duas fases**. *Revista Universidade Rural: Série Ciências Exatas e da Terra*. Seropédica, v.23, n.1-2, p. 18-33, 2004.

SINGH, N. J.; PANDEY, R. K. Neural network approaches for prediction of drying kinetics during drying of sweet potato. **Agricultural Engineering International**, v. 13, n. 1, 2011.

SINGH, S.; RAINA, C. S.; BAWA, A. S.; SAXENA, D. C. Effect of Pretreatments On Drying And Rehydration Kinetics and Color Of Sweet Potato Slices. **Drying Technology**, 24, p. 1487-1494. 2006.

SOUZA, A. V. De; FERNANDES, J. F.; TRALLI, J. P.; GALVÃO, P.; PEDRO, M. A. M. Aplicação da secagem por spray drying para a produção de extratos vegetais secos. **Revista Científica Unilago**, São Jose do Rio Preto, v. 1, n. 1, p.181-193, 2013. Anual.

TREYBAL, R. E. **Mass – transfer operations**. 3 ed. Singapore McGraw-Hill 1980. (Chemical Engineering Series).

VALENTAS K. J.. ROTSTEIN E.; SINGH R,P, **Handbook of food engineering practice**. 1. ed. Florida: CRC Press LLC, 1997. p. 143-158.

VENKATACHALAM, S.; JHON. S. G.; KUPPUSWAMY, K. Foam mat drying of food materials: a review. **Journal of Food Processing and Preservation**, 2014.

VILLA-VÉLEZ, H. A; VÁQUIRO, H. A.; TELIS-ROMERO, J. et al. Study of the specific heat capacity of biomass from banana waste for application in the second-generation ethanol industry. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 34, n. 4, p. 1221-1228, 2015.

VILLA-VÉLEZ; H. A.; VÁQUIRO, H. A.; TELIS-ROMERO, J. The effect of power-ultrasound on the pretreatment of acidified aqueous solutions of banana flower-stalk:

structural, chemical and statistical analysis. **Industrial Crops and Products**, v. 66, p. 52-61, 2015b.

APENDICE A - CINÉTICAS DE SECAGEM DO SARNAMBI EM ESPUMA**Figura A1:** Amostras do sarnambi seco em leito de espuma

ANEXO A – PROGRAMAÇÃO NO MATLAB PARA MODELAGEM POR REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

```

%===== Neural network =====%
format short g, format compact, warning ('off'), clc, clear all

eval(['load(''Dados_Sarnambi.mat'')']);

Xinput=Input;           % Input data
Ytarget=Output;        % target data for silmultenous responses

%-----Network Properties-----%
nTrFcn={'tansig';'softmax';'logsig';'radbas'};
nNType={'newcf';'newff'};
for ntype=1:length(nNType)
fprintf(['\n\nNET TYPE:' nNType{ntype} '\n']);
nHN=3:1:10;
for TF=1:4
fprintf(['\nTransf.Fcn:' nTrFcn{TF} '\n']);
    for HN=1:length(nHN)
        for rep=1:8
            numHiddenNeurons = nHN(HN); % Adjust as desired
            eval(['net = new' nNType{ntype}
' (Xinput,Ytarget,numHiddenNeurons);']);

            net.divideFcn='divideind';
            net.divideParam.trainInd = [1:26 131:156 261:286 27:52
157:182 287:312 53:78 183:208 313:338 79:104 209:234 339:364]; % Sarnambi
            net.divideParam.testInd = [105:130 235:260 365:390]; % Sarnambi
            %=====Train and Apply
Network=====
            %-----Performance function-----
            %-----Train function-----
            %-----Transfer function for new type newfit-----

            net.layers{1}.transferFcn = nTrFcn{TF};
            net.trainParam.min_grad=1e-8;
            net.trainParam.epochs=1000;
            % 'softmax' Softmax transfer function
            % 'logsig' Log-sigmoid transfer function
            % 'netinv' Inverse transfer function
            % 'radbas' Radial basis transfer function
            % 'tansig' Hyperbolic tangpnt sigmoid transfer function
            [net,tr,outputs,E,Pf,Af] = train(net,Xinput,Ytarget);
            [outputs,Pf,Af,E,perf] = sim(net,Xinput);
            % Weight and bias values
            nparam=length(getx(net));
            w1=net.iw{1,1}; %Weight values Layer 1
            b1=net.b{1}; %Bias values Layer 1
            w2=net.lw{2,1}; %Weight values Layer 2
            b2=net.b{2}; %Bias values Layer 2

```

```

%           Desnormalizar las variables
%           Yexp=reshape(Ytarget,1,size(Ytarget,1)*size(Ytarget,1));
%           Ycal=reshape(outputs,1,size(Ytarget,1)*size(Ytarget,1));
Yexp=Ytarget;
Ycal=outputs;
R2=min(min(corrcoef(Yexp,Ycal).^2));
ndata=length(Yexp);
R2adj=1-(1-R2)*(ndata-1)/(ndata-nparam);
MRE=100*sum(abs(Yexp-Ycal)./Yexp)/ndata;
MSE=sum(abs(Yexp-Ycal))/ndata;
RESnetTemp(rep,:)=[nHN(HN) nparam R2 R2adj MRE MSE];
DataXYTemp{rep}=[Ytarget outputs];
NETSTemp{rep}=net;
bestrep=RESnetTemp(:,4)==max(RESnetTemp(:,4));
end;
fprintf(['Test' num2str(HN) ': ' num2str(RESnetTemp(bestrep,:)) '
(rep:' num2str(find(bestrep)) '\n']);
RESnet(HN,:)=RESnetTemp(bestrep,:);
DataXY{TF,HN}=DataXYTemp{bestrep};
NETS{TF,HN}=NETSTemp{bestrep};
end;
RES{1,TF}=nTrFcn{TF};
RES{2,TF}=RESnet;
bestf=RESnet(:,4)==max(RESnet(:,4));
BESTF(TF,:)=RESnet(bestf,:);
fprintf(['*Best: ' num2str(BESTF(TF,:)) '\n']);
end;
thebest=BESTF(:,4)==max(BESTF(:,4));
BESTN{1,1}=nTrFcn{thebest};
BESTN{1,2}=BESTF(thebest,:);
BESTN{1,3}=DataXY{thebest,nHN==BESTF(thebest,1)};
BESTN{1,4}=NETS{thebest,nHN==BESTF(thebest,1)};
filenet=['RES_' nNType{nType} '.mat'];
fprintf(['\n Saving ' filenet ' ... \n']);
eval(['save ( ' filenet ' '
' ', 'DataXY', 'NETS', 'RES', 'BESTF', 'BESTN' )']);
end;
% view(net);
%=====Plot propeties network=====
% plotperf(tr)
% plotfit(net,Xinput,Ytarget)
% plotregression(Ytarget,outputs)

```


ANEXO B - PROGRAMAÇÃO NO MATLAB PARA MODELAGEM COM MODELOS DE CAMADA FINA

```
function secagem_SARNAMBI

format short g, format compact, warning ('off'), clc, clear all, close all;

global model
model='Midilli';

                                % Weibull...
                                % Peleg...
                                % Henderson-Pabis...
                                % Logaritmico...
                                % WangSing...
                                % Lewis...
                                % Page...
                                % Midilli...
                                % DoisTerm...
                                % AproDif...

amostra='SARNAMBI';
eval(['load(''Dados_' amostra '.mat'')']);

%=====
%                               DISCRIMINANDO OS VALORES DE X0 E XE
%=====
x=x;
t=t;
T=T;
sd=sd;
x30=x(1:26,:);
x45=x(27:52,:);
x60=x(53:78,:);
t30=t(1:26,:);
t45=t(27:52,:);
t60=t(53:78,:);
T30=T(1:26,:);
T45=T(27:52,:);
T60=T(53:78,:);
sd30=sd(1:26,:);
sd45=sd(27:52,:);
sd60=sd(53:78,:);

for T=30;
    if strcmp(model,'Weibull')
        beta0 =10560.34;
    elseif strcmp(model,'Peleg')
        beta0 =[1238.6    0.0084712];
    elseif strcmp(model,'Henderson-Pabis')
        beta0 =[23994.3    0.0007];
    elseif strcmp(model,'Logaritmico')
        beta0 =[23994.3    0.0007    2.456];
    elseif strcmp(model,'WangSing')
        beta0 =[23994.3    0.0007];
    elseif strcmp(model,'Lewis')
        beta0 =0.00124;
    elseif strcmp(model,'Page')
        beta0 =[0.00012167    1.0678];
    end
end
```

```

elseif strcmp(model,'Midilli')
beta0 =[0.00034357      0.99379  -1.1739e-05];
elseif strcmp(model,'DoisTerm')
beta0 =[0.00034357      0.99379  2.345 -1.1739e-05];
elseif strcmp(model,'AproDif')
beta0 =[2.0046   0.001914      0.23];
end
fprintf([model ' *****\n'])
%=====
%           FUNÇÕES DE MATLAB EMPREGADAS NA SIMULAÇÃO E MODELAGEM
%=====
beta30=nlinfit(t30,x30,'modeloSARNAMBI',beta0);
%[beta40,resid,J,sigma]=
nlinfit(t40,x40,'dryingmodels',beta0);%statset('Robust','off','WgtFun','log
istic','TolFun',1e-3,'TolX',1e-3,'Display','off','MaxIter',1e3);
%beta40,alpha=0.05;ci =
nlparci(beta40,resid,'covar',sigma,'alpha',alpha);
xec=modeloSARNAMBI(beta30,t30);beta30,
xec30=xec;
resid30=x30-xec30;
%=====
% PARÂMETROS ESTATÍSTICOS
%=====
R30=min(min(corrcoef(x30,xec30).^2));
ndata=length(x30);
if strcmp(model,'Weibull')
nparam=1;
elseif strcmp(model,'Peleg')
nparam=2;
elseif strcmp(model,'Henderson-Pabis')
nparam=2;
elseif strcmp(model,'Logaritmico')
nparam=3;
elseif strcmp(model,'WangSing')
nparam=2;
elseif strcmp(model,'Lewis')
nparam=1;
elseif strcmp(model,'Page')
nparam=2;
elseif strcmp(model,'Midilli')
nparam=3;
elseif strcmp(model,'DoisTerm')
nparam=4;
elseif strcmp(model,'AproDif')
nparam=3;
end
R2adj30=1-(1-R30)*(ndata-1)/(ndata-nparam)
MRE30=100*sum(abs(x30-xec30)./x30)./length(x30)
RMSE30=sqrt(mean(x30-xec30).^2);
MSE30=sum(abs(x30-xec30))/ndata
end;

for T=45;
if strcmp(model,'Weibull')
beta0 =10560.34;
elseif strcmp(model,'Peleg')
beta0 =[1238.6   0.0084712];
elseif strcmp(model,'Henderson-Pabis')
beta0 =[23994.3   0.0007];
elseif strcmp(model,'Logaritmico')
beta0 =[23994.3   0.0007   2.456];

```

```

elseif strcmp(model,'WangSing')
beta0 =[23994.3  0.0007];
elseif strcmp(model,'Lewis')
beta0 =0.00124;
elseif strcmp(model,'Page')
beta0 =[0.00012167      1.0678];
elseif strcmp(model,'Midilli')
beta0 =[0.00011508      0.91001  -2.0505e-05];
elseif strcmp(model,'DoisTerm')
beta0 =[0.00034357      0.99379  2.345  -1.1739e-05];
elseif strcmp(model,'AproDif')
beta0 =[2.212  0.000089374  0.0078];
end
fprintf([model ' *****\n'])
=====
%           FUNÇÕES DE MATLAB EMPREGADAS NA SIMULAÇÃO E MODELAGEM
=====
beta45=nlinfit(t45,x45,'modelosSARNAMBI',beta0);
% [beta56,resid,J,sigma]=
nlinfit(t50,x50,'modelos',beta0,statset('Robust','off','WgtFun','logistic',
'TolFun',1e-3,'TolX',1e-3,'Display','off','MaxIter',1e3));
% beta56,alpha=0.05;ci =
nlparci(beta50,resid,'covar',sigma,'alpha',alpha);
xec=modelosSARNAMBI(beta45,t45);beta45,
xec45=xec;
resid45=x45-xec45;
=====
% PARÂMETROS ESTATÍSTICOS
=====
R45=min(min(corrcoef(x45,xec45).^2));
ndata=length(x45);
if strcmp(model,'Weibull')
nparam=1;
elseif strcmp(model,'Peleg')
nparam=2;
elseif strcmp(model,'Henderson-Pabis')
nparam=2;
elseif strcmp(model,'Logaritmico')
nparam=3;
elseif strcmp(model,'WangSing')
nparam=2;
elseif strcmp(model,'Lewis')
nparam=1;
elseif strcmp(model,'Page')
nparam=2;
elseif strcmp(model,'Midilli')
nparam=3;
elseif strcmp(model,'DoisTerm')
nparam=4;
elseif strcmp(model,'AproDif')
nparam=3;
end
R2adj45=1-(1-R45)*(ndata-1)/(ndata-nparam)
MRE45=100*sum(abs(x45-xec45)./x45)./length(x45)
RMSE45=sqrt(mean(x45-xec45).^2);
MSE45=sum(abs(x45-xec45))/ndata
end;

for T=60;
if strcmp(model,'Weibull')
beta0 =10560.34;

```

```

elseif strcmp(model,'Peleg')
beta0 =[1238.6 0.0084712];
elseif strcmp(model,'Henderson-Pabis')
beta0 =[23994.3 0.0007];
elseif strcmp(model,'Logaritmico')
beta0 =[23994.3 0.0007 2.456];
elseif strcmp(model,'WangSing')
beta0 =[23994.3 0.0007];
elseif strcmp(model,'Lewis')
beta0 =0.00124;
elseif strcmp(model,'Page')
beta0 =[0.00012167 1.0678];
elseif strcmp(model,'Midilli')
beta0 =[0.00011508 0.91001 -2.0505e-05];
elseif strcmp(model,'DoisTerm')
beta0 =[0.00034357 0.99379 2.345 -1.1739e-05];
elseif strcmp(model,'AproDif')
beta0 =[3.4274 0.0000458 0.00804 ];
end
fprintf([model ' *****\n'])
=====
% FUNÇÕES DE MATLAB EMPREGRADAS NA SIMULAÇÃO E MODELAGEM
=====
beta60=nlinfit(t60,x60,'modelosSARNAMBI',beta0);
% [beta60,resid,J,sigma]=
nlinfit(t60,x60,'dryingmodels',beta0,statset('Robust','off','WgtFun','logis
tic','TolFun',1e-3,'TolX',1e-3,'Display','off','MaxIter',1e3));
% beta60,alpha=0.05;ci =
nlparci(beta60,resid,'covar',sigma,'alpha',alpha);
xec=modelosSARNAMBI(beta60,t60);beta60,
xec60=xec;
resid60=x60-xec60;
=====
% PARÂMETROS ESTATÍSTICOS
=====
R60=min(min(corrcoef(x60,xec60).^2));
ndata=length(x60);
if strcmp(model,'Weibull')
nparam=1;
elseif strcmp(model,'Peleg')
nparam=2;
elseif strcmp(model,'Henderson-Pabis')
nparam=2;
elseif strcmp(model,'Logaritmico')
nparam=3;
elseif strcmp(model,'WangSing')
nparam=2;
elseif strcmp(model,'Lewis')
nparam=1;
elseif strcmp(model,'Page')
nparam=2;
elseif strcmp(model,'Midilli')
nparam=3;
elseif strcmp(model,'DoisTerm')
nparam=4;
elseif strcmp(model,'AproDif')
nparam=3;
end
R2adj60=1-(1-R60)*(ndata-1)/(ndata-nparam)
MRE60=100*sum(abs(x60-xec60)./x60)./length(x60)
RMSE60=sqrt(mean(x60-xec60).^2);

```

```

MSE60=sum(abs(x60-xec60))/ndata
end;

```

```

%=====
%           GRAFICO DOS DADOS EXPERIMENTAIS E DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA
%=====

```

```

xect=[xec30; xec45; xec60];
tet=[t30; t45; t60];
xet=[x30; x45; x60];
Tet=[T30; T45; T60];
sdt=[sd30; sd45; sd60];
resid=[resid30; resid45; resid60];

```

```

figure1 = figure('Color',[1 1 1],'Position',[400 200 700 350]);
colormap('gray');

```

```

% Create axes
axes1 = axes('Parent',figure1,...
    'Position',[0.0603060306030603 0.08666666666666667 0.465408255111225
0.8577777777777778]);
view(axes1,[42.5 36]);
box(axes1,'on');
hold(axes1,'all');

```

```

% Crear mesh
tt1=floor(min(min(tet))):500.0:max(max(tet));
tt2=floor(min(min(Tet))):2.0:max(max(Tet));
[Tg,xg]=meshgrid(tt1,tt2);
Yg=griddata(tet, Tet, xect, Tg,xg,'Linear');
mesh(Tg,xg,Yg,'Parent',axes1);
hold on
hidden all
plot3(tet,Tet,xet,'Parent',axes1,'MarkerFaceColor',[0 0 0],'Marker','o',...
    'LineStyle','none',...
    'Color',[0 0 0]);

```

```

% Create xlabel
xlabel({'{\itx} (kg/kg, d.b.)'});
% Create textbox
annotation(figure1,'textbox',...
    [0.413522670877004 0.05777777777777778 0.0964773291229959
0.0546815434681541],...
    'String',{'{\itT} (^{o}C)'},...
    'FitBoxToText','off',...
    'LineStyle','none');

```

```

% Create textbox
annotation(figure1,'textbox',...
    [0.00613764998868016 0.0828571428571429 0.108148064297034
0.062259414225941],...
    'String',{'{\itt} (s)'},...
    'FitBoxToText','off',...
    'LineStyle','none');

```

```

%===== Grafico de residuais anexo figure 1
%=====

```

```

% Create axes
axes2 = axes('Parent',figure1,...

```

```

    'Position',[0.636997962417931 0.265873015873015 0.284430609010641
0.543333333333333]);
box(axes2,'on');
hold(axes2,'all');
plot(xet,xect,'ok',[floor(min(xet)) ceil(max(xet))],[floor(min(xect))
ceil(max(xect))],'--k');
% Create xlabel
xlabel('Calculated data','FontName','Helvetica');
% Create ylabel
ylabel('Experimental data','FontName','Helvetica');

```

```

%=====
%
%                               Criar o grafico de residuais separado
%
%=====

```

```

figure2 = figure('Color',[1 1 1],'Position',[400 200 400 350]);
colormap('gray');
% Create axes
axes3 = axes('Parent',figure2);
box(axes3,'on');
hold(axes3,'all');
% Create axes
plot(xet,xect,'ok',[floor(min(xet)) ceil(max(xet))],[floor(min(xect))
ceil(max(xect))],'--k');
% Create xlabel
xlabel('Calculated data','FontName','Helvetica');
% Create ylabel
ylabel('Experimental data','FontName','Helvetica');

```

```

%=====
%
%                               GRAFICO DOS DADOS EXPERIMENTAIS 2D E RESIDUAIS
%
%=====

```

```

% Create figure
figure3 = figure('Color',[1 1 1],'Position',[400 200 750 350]);
% Create axes
axes4 = axes('Parent',figure3,...
    'Position',[0.07933333333333332 0.125714285714286 0.4753333333333334
0.805714285714286]);
xlim(axes4,[0 21600]);
box(axes4,'on');
hold(axes4,'all');
% Create errorbar
errorbar(t30,x30,sd30,'MarkerFaceColor',[0 0 0],'MarkerEdgeColor',[0 0
0],...
    'Marker','o',...
    'LineStyle','none',...
    'Parent',axes4,...
    'Color',[0 0 0]);
hold on

```

```

errorbar(t45,x45,sd45,'MarkerFaceColor',[0 0 0],'MarkerEdgeColor',[0 0
0]),...
    'Marker','^',...
    'LineStyle','none',...
    'Parent',axes4,...
    'Color',[0 0 0]);
hold on
errorbar(t60,x60,sd60,'MarkerFaceColor',[0 0 0],'MarkerEdgeColor',[0 0
0]),...
    'Marker','square',...
    'LineStyle','none',...
    'Parent',axes4,...
    'Color',[0 0 0]);
hold on
% Create plot
plot(t30,xec30,t45,xec45,t60,xec60,'Parent',axes4,'MarkerFaceColor',[0 0
0]),...
    'MarkerEdgeColor',[0 0 0],...
    'LineWidth',2,...
    'LineStyle',':',...
    'Color',[0 0 0]);
% Create xlabel
xlabel('\itt} (s)','FontName','Helvetica');
% Create ylabel
ylabel('\itX_{e}} (kg/kg, d.b.)');

%===== Grafico de residuais anexo figure 3
=====

% Create axes
axes5 = axes('Parent',figure3,...
    'Position',[0.6573333333333331 0.241428571428571 0.2826666666666668
0.547142857142857]);
box(axes5,'on');
hold(axes5,'all');
% Create axes
plot(xet,xect,'ok',[floor(min(x)) ceil(max(x))],[floor(min(xec))
ceil(max(xec))],'--k');
% Create xlabel
xlabel('Calculated data','FontName','Helvetica');
% Create ylabel
ylabel('Experimental data','FontName','Helvetica');

%=====
%          Superficie de resposta + residuaus + histograma          %
%=====
figure4 = figure('Color',[1 1 1],'Position',[100 200 1000 350]);
colormap('gray');
% Create axes
axes6 = axes('Parent',figure4,...
    'Position',[0.0603060306030603 0.08666666666666667 0.35769396939694
0.8577777777777778]);
view(axes6,[34.5 32]);
box(axes6,'on');
hold(axes6,'all');

% Crear mesh

```

```

tt1=floor(min(min(tet))):500.0:max(max(tet));
tt2=floor(min(min(Tet))):2.0:max(max(Tet));
[Tg,xg]=meshgrid(tt1,tt2);
Yg=griddata(tet, Tet, xect, Tg,xg,'Linear');
mesh(Tg,xg,Yg,'Parent',axes6);
hold on
hidden all
plot3(tet,Tet,xect,'Parent',axes6,'MarkerFaceColor',[0 0 0],'Marker','o',...
      'LineStyle','none',...
      'Color',[0 0 0]);

% Create title
% title({' '});
% Create xlabel
xlabel({'{\itX} (kg/kg, d.b.)'});

% Create textbox
annotation('figure4','textbox',...
          [0.0297265964480929 0.0481318681318682 0.108148064297034
0.062259414225941],...
          'String',{'{\itt} (s)'},...
          'FitBoxToText','off',...
          'LineStyle','none');

% Create textbox
annotation('figure4','textbox',...
          [0.36339141008253 0.094920634920635 0.0964773291229959
0.0546815434681541],...
          'String',{'{\itT} (^{o}C)'},...
          'FitBoxToText','off',...
          'LineStyle','none');

% Create textbox
annotation('figure4','textbox',...
          [0.923244406196214 0.859049906425451 0.035 0.08],'String',{'A'},...
          'LineStyle','none');

%==== Criar o grafico de residuais ====
% Create axes
axes7 = axes('Parent',figure4,...
            'Position',[0.507464283661453 0.246092796092795 0.186535716338547
0.468192918192919]);
% ylim(axes7,[0 4]);
box(axes7,'on');
hold(axes7,'all');
plot(xet,xect,'ok',[floor(min(xet)) ceil(max(xet))],[floor(min(xect))
ceil(max(xect))],'--k');
% Create xlabel
xlabel('Calculated','FontName','Helvetica');
% Create ylabel
ylabel('Experimental','FontName','Helvetica');

%==== Criar o histograma dos residuos ====
% Create axes
axes8 = axes('Parent',figure4,...
            'Position',[0.76479391589679 0.236434216643421 0.18120608410321
0.475653695444491],...
            'CLim',[1 2]);
box(axes8,'on');

```



```

hold(axes8,'all');
[muhat,sigmahat] = normfit(resid);
numbins =12;
[n,xout]=hist(resid,numbins);
barh(xout,n,'histc');
box on
hold all
[bincounts,binpositions] = hist(resid,numbins,'MarkerFaceColor','w',...
    'FaceColor',[1 1 1]);
binwidth = binpositions(2) - binpositions(1);
histarea = binwidth*sum(bincounts);
x = linspace(-max(abs(binpositions)),max(abs(binpositions)),50);
y = normpdf(x,muhat,sigmahat);
plot(histarea*y,x,'Parent',axes8,'LineWidth',2,'Color',[0 0 0]); % linha de
tendência
% Create xlabel
xlabel('Frequency','FontName','Helvetica');
% Create ylabel
ylabel('Residual','FontName','Helvetica');

%=====
%                               ANALISE DE RESIDUAIS                               %
%=====
figure5 =figure('Color',[1 1 1],'Position',[200 300 1000 250]);
%===== Criar o grafico de valores estimados vs calculados =====
% Create subplot1
subplot1 = subplot(1,3,1,'Parent',figure5,'FontName','Helvetica');
box(subplot1,'on');
hold(subplot1,'all');
plot(xet,xect,'ok',[floor(min(xet)) ceil(max(xet))],...
    [floor(min(xect)) ceil(max(xect))], '--k');
xlabel('Calculated data','FontName','Helvetica');
% Create ylabel
ylabel('Experimental data','FontName','Helvetica');
%===== Criar o grafico de residuais =====
% Create subplot2
subplot2 = subplot(1,3,2,'Parent',figure5,'FontName','Helvetica');
plot(resid,'Marker','o','LineStyle','none',...
    'Color',[0 0 0]);
hold on,plot([0 length(resid)],[0 0], '--k') % Linha media do grafico
box(subplot2,'on');
hold(subplot2,'all');
% Create xlabel
xlabel('Datum','FontName','Helvetica');
% Create ylabel
ylabel('Residual','FontName','Helvetica');
%===== Criar o histograma dos residuos =====
% Create subplot3
[muhat,sigmahat] = normfit(resid);
numbins =12;
[n,xout]=hist(resid,numbins);
subplot3 = subplot(1,3,3,'Parent',figure5,'FontName','Helvetica','CLim',[1
2]);
h=barh(xout,n,'histc');
set(h,'FaceColor','none','LineWidth', 1, 'LineStyle','-','EdgeColor',[0 0
0]), hold on
box(subplot3,'on');
hold(subplot3,'all');
[bincounts,binpositions] = hist(resid,numbins,'MarkerFaceColor','w',...
    'FaceColor',[0 0 0]);

```

```

binwidth = binpositions(2) - binpositions(1);
histarea = binwidth*sum(bincounts);
x = linspace(-max(abs(binpositions)),max(abs(binpositions)),50);
y = normpdf(x,muhat,sigmahat);
subplot(1,3,3),plot(histarea*y,x,'k','LineWidth',2); % linha de tendência
% Create xlabel
xlabel('Frequency','FontName','Helvetica');
% Create ylabel
ylabel('Residual','FontName','Helvetica');

% Create textbox
annotation('figure5','textbox',...
    [0.923244406196214 0.859049906425451 0.035 0.08],'String',{'A'},...
    'LineStyle','none');

%===== Teste de distribuição normal dos residuos =====%
[h,p]=lillietest(resid)
end

```