

Estudo teórico e experimental da desidratação da tainha em secador alternativo e estufa comercial

Jesus Marlinaldo de Medeiros ^[1], Ingrid Elvira Silva Cardoso ^[2], Andreza da Silva Nascimento ^[3], Maria de Fátima Alves Figueiredo de Lacerda ^[4], Carlo Reillen Lima Martins ^[5], Márcio Gomes da Silva ^[6]

[1] jesus_medeiros@yahoo.com.br, [2] ingrid_cardoso33@hotmail.com, [3] andrezanascimento98@gmail.com, [4] marialacerda75@yahoo.com.br, [5] carlo.martins@ifpb.edu.br, [6] mgcefet@gmail.com - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB, Campus Cabedelo; Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB, Campus João Pessoa.

RESUMO

A tainha é um dos peixes mais abundantes do litoral brasileiro. Os peixes marinhos, como a tainha, constituem um dos recursos alimentares de melhor qualidade e abundância, graças ao valor nutritivo, fácil digestibilidade e composição equilibrada. No entanto, grande parte do pescado extraído é desperdiçado, devido a sua deterioração rápida, que ocorre em menos de 24 horas. Para combater o desperdício, destaca-se o processo de secagem, método de conservação que influencia no tempo de preservação, qualidade e durabilidade dos alimentos. A escolha pela técnica de secagem convectiva se deve à simplicidade e ao baixo custo de instalação e operação dos equipamentos usados. A secagem convectiva utiliza ar quente, aumentando a sua temperatura, diminuindo a sua umidade relativa e absorvendo a umidade contida no material a secar. Neste estudo, investigou-se o processo da secagem convectiva da tainha, visando determinar o tempo de secagem – por meio de ensaios numa bancada experimental construída em laboratório fazendo uso de materiais alternativos – e também testar o modelo matemático da segunda Lei de Fick, com a devida comparação com os dados experimentais obtidos. A secagem foi realizada em filés de tainha submetidos à temperatura de 48 °C e à velocidade de deslocamento do ar de 2,5 m/s, no secador alternativo com convecção forçada e também em estufa comercial com convecção natural, realizando-se medições da massa do pescado a cada 15 minutos. Os resultados experimentais mostraram que a desidratação do filé de tainha foi mais rápida no secador alternativo em comparação com o processo em estufa comercial. Um ajuste do coeficiente de difusividade efetiva resultou na faixa de 2.10-10 a 2.7.10-10 m²/s para os filés de tainha avaliados e erro relativo máximo de 5% entre os resultados numéricos e os dados experimentais. Os modelos empíricos de polinômios de quarto grau e logaritmo tiveram os melhores ajustes com os dados experimentais.

Palavras-chave: Pescado. Desidratação. Secador alternativo. Transferência de calor e massa. Modelagem matemática.

ABSTRACT

The mullet is one of the most abundant fish in the Brazilian coast. Marine fish, such as mullet, is one of the food resources of better quality and abundance, thanks to its nutritional value, easy digestibility and balanced composition. However, much of the extracted fish is wasted due to their rapid deterioration occurring in less than 24 hours. To combat waste, there is the drying process, which is a food preservation method, influencing the preservation time, quality and durability of food. The choice of convective drying technique is due to simplicity and low cost of installation and operation of this equipment used. The convective drying using hot air, increasing the air temperature, reducing its relative humidity and absorb moisture available on the material to be dried. In this study, we investigated the process of convective drying mullet, to determine the drying time by testing in a test rig constructed in the laboratory making use of alternative materials and also test the mathematical model of the second Fick's Law with proper comparison with experimental data. Drying was performed on mullet fillets subjected to a temperature of 48 °C and air velocity of 2.5 m/s in the alternate drier with forced convection and also commercial greenhouse with natural convection, making mass measurements of fish every 15 minutes. The experimental results showed that the dehydration of mullet fillet was faster in alternate dryer compared to the process in commercial greenhouse. An adjustment of the effective diffusivity coefficient resulted in the range of 2.10-10 to 2.7.10-10 m²/s for the mullet fillets evaluated and maximum relative error of 5% between the numerical results and experimental data. The empirical models of fourth degree polynomials and logarithm had the best fit with the experimental data.

Keywords: Fish. Dehydration. Alternative dryer. Heat and mass transfer. Mathematical modeling.

1 Introdução

A denominação genérica “pescado” compreende todo organismo aquático, como peixes, crustáceos, moluscos, anfíbios, quelônios, mamíferos e algas, quer sejam de água doce ou salgada (GUSMÁN, 1994). O pescado é uma das principais fontes de proteína na alimentação humana, caracterizado por sua fácil digestibilidade e alto valor biológico, além de um elevado teor de ácidos graxos poli-insaturados, sendo um alimento mais saudável do ponto de vista nutritivo (ORDÓÑEZ, 2005).

No entanto, apesar de sua importância em termos de contribuição para economia, saúde, segurança alimentar e melhoria das condições de vida de pescadores artesanais em muitos países em desenvolvimento, cerca de 50% dos peixes extraídos nesses países é desperdiçado. Isso acontece porque o pescado é extraído com alta umidade – teor médio de $5 \text{ kg/kg}_{\text{base seca}}$ – e, sem conservantes, sofre deterioração rápida em menos de 24 h, mesmo sem contaminação externa (KITUU *et al.*, 2010). Portanto, a conservação de tais peixes é importantíssima para melhorar os rendimentos dos pescadores artesanais, garantindo a segurança alimentar e assegurando o desenvolvimento sustentável da atividade.

O processo de secagem é uma das operações unitárias mais antigas e comuns, sendo encontrada nos mais diversos processos de indústrias químicas, alimentícias, agrícolas, entre outras. Esse processo envolve um conjunto de fenômenos físicos e químicos, utilizando tecnologia e conhecimento empírico com décadas de tradição, baseados numa ampla observação experimental.

Durante muito tempo, a secagem foi realizada artesanalmente e sem base científica. Progressivamente, foram surgindo novos métodos de secagem devido à necessidade crescente de processos mais eficientes e rápidos. A escolha pela técnica de secagem artificial deve-se à simplicidade e baixo custo de instalação e operação dos equipamentos usados. Essa técnica é a mais conhecida e empregada para conservação do pescado. Pela ação do calor, promove-se a preservação contra deterioração, a conservação de suas propriedades e condições aceitáveis de armazenamento durante a estocagem.

A secagem artificial, que se faz por meio de secadores, é um processo que usa o ar como meio

para conduzir o calor e transferir o excesso de água dos produtos para a atmosfera, ou seja, os dois mecanismos principais envolvidos são a transferência de calor e a transferência de massa.

Essa técnica baseia-se na propriedade pela qual o aumento da temperatura do ar diminui a sua umidade relativa e o torna capaz de absorver a umidade disponível no material a secar. Assim, na secagem, ocorre uma perda de massa, que é o resultado da evaporação de parte da água existente no produto. O calor fornecido possibilita a migração da água para a superfície do produto, e esta é carregada pelo fluxo de ar que flui pelos materiais. Observa-se que os transportes de calor e de massa ocorrem simultaneamente. Portanto, o ar de secagem deve possuir uma quantidade de calor a ceder ao produto e condições de reter e transportar uma quantidade de massa de água na forma de vapor.

No que diz respeito às condições termodinâmicas do processo, os fatores mais importantes na secagem do pescado são a temperatura, a umidade relativa e a velocidade do ar, que são as grandes variáveis a controlar nesse processo (BOERI, 2012):

- Temperatura: quanto maior a temperatura do ar de secagem, mais rápido ocorre o processo, diminuindo a umidade relativa do ar e aumentando o gradiente de umidade entre a superfície do produto e o ar;

- Velocidade do ar: um acréscimo na velocidade de escoamento do ar ocasiona um aumento na taxa de transferência de massa, sendo a umidade da superfície do produto transportada para o ar de secagem;

- Umidade relativa: na secagem como um todo, este parâmetro é fator determinante na umidade de equilíbrio, ou seja, no teor de umidade atingido pelo produto ao final do processo. Adicionalmente, quanto maior for a diferença de pressão parcial do vapor entre a atmosfera e a superfície, maior a taxa de secagem.

Em relação à natureza do produto, o tempo de secagem do pescado é influenciado pelos seguintes fatores (BOERI, 2012):

- Umidade: nos produtos frescos (antes de ser aplicada a salga), a concentração de umidade no músculo está entre 60% e 80% (base úmida). Nos produtos salgados destinados à secagem, o seu conteúdo de umidade está entre 50% e 55%, tendo

a matéria-prima fresca perdido uma quantidade substancial de umidade em função do seu tratamento com sal;

- Tamanho e forma do pescado: quanto mais espesso for o músculo do peixe, maior o tempo de secagem. Isto se deve ao fato de que, durante a secagem, a água a ser evaporada tem que percorrer um caminho maior do centro à superfície do músculo;

- Superfície do pescado: a superfície do pescado, as suas dimensões e a sua massa têm influência na secagem;

- Espaçamento da matéria-prima no secador: para uma secagem uniforme, os peixes devem ser dispostos no secador de forma que não fiquem uns sobre os outros;

- Efeito de película: influencia o processo de secagem porque consiste num endurecimento superficial da carne, que isola o músculo, ainda úmido, da corrente externa de ar. Tal endurecimento se dá em virtude da desnaturação das proteínas, motivada por processo inadequado de salga e secagem.

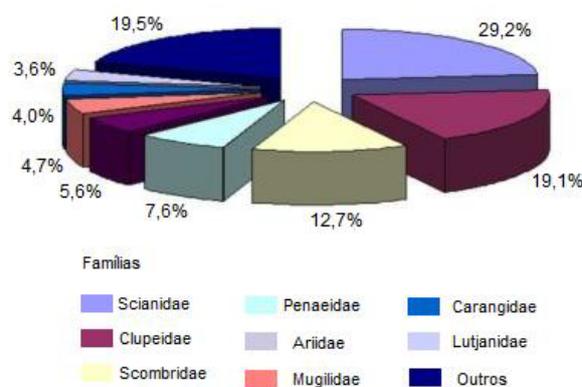
No processo de secagem, as condições operacionais, a caracterização do produto a secar, a seleção e dimensionamento dos equipamentos envolvidos e o custo devem ser levados em consideração. Devem ser analisados, ainda, os efeitos de temperatura, a umidade relativa, a velocidade do ar no processo de secagem, para estabelecer a influência na cinética de secagem, e os mecanismos de movimentação de umidade no alimento a ser secado (NGUYEN *et al.*, 2010; JAIN, 2006; PARK, VOHNIKOVA, BROD, 2002).

No Brasil, a tainha, cujo nome científico é *Mugil sp.*, da família Mugilidae, é encontrada em praticamente toda a costa, do Maranhão ao Rio Grande do Sul. Seus representantes são pelágicos costeiros de águas relativamente rasas, hábitos gregários e que nadam próximos à superfície, com movimentos rápidos, em cardumes que variam de 15 a 80 indivíduos em média (CARVALHO; CORNETA; UIEDA, 2007). Na costa brasileira, ocorrem sete espécies de Mugil, dentre as quais quatro são muito abundantes na região Nordeste (MENEZES; FIGUEIREDO, 1985) e, conseqüentemente, muito exploradas pela pesca artesanal, constituindo, assim, um importante recurso à alimentação humana.

Dados da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) indicam que, em 2007, as tainhas foram o sexto grupo mais capturado no

Brasil. A Figura 1 ilustra esses resultados, indicando pescadas e corvinas (Scianidae) como as espécies mais capturadas no Brasil, seguidas das sardinhas (Clupeidae), atuns (Scombridae), camarões (Penaeidae), bagres (Ariidae), tainhas (Mugilidae), arabaiana e xaréu (Carangidae), pargos (Lutjanidae) e demais espécies (Outros).

Figura 1 - Dados da pesca marinha no Brasil em 2007



Fonte: Adaptado de FAO (2010).

O desenvolvimento de modelos matemáticos que descrevam o processo de secagem tem sido estudado por parte de pesquisadores, recorrendo a soluções matemáticas de natureza numérica ou analítica com o objetivo de estabelecer uma relação entre dados experimentais e um modelo específico (MIDILLI; KUCUK; YAPAR, 2002). Assim, têm surgido vários modelos que reproduzem a cinética de secagem em diversos produtos biológicos e que podem ser divididos em (PARK *et al.*, 2007): modelos empíricos, modelos teóricos difusivos e modelos semi-empíricos (logarítmicos ou exponenciais).

Os modelos empíricos baseiam-se no conhecimento experimental da relação entre o teor de umidade e o tempo de secagem e apenas consideram a resistência externa; já os teóricos difusivos fundamentam-se na teoria da difusão de um líquido ou vapor no interior do produto, ou seja, na taxa de transferência de calor e massa dentro do sólido e consideram a resistência interna ao fluxo de calor e massa (PIRES, 2013).

O modelo matemático utilizado para descrever o fenômeno de transferência de massa no processo de secagem convectiva da tainha foi a segunda Lei de Fick.

Neste estudo, investigou-se o processo da secagem artificial (convectiva) do pescado (tainha) visando determinar o tempo de secagem – por meio de ensaios em uma bancada experimental – e testar o modelo matemático da segunda Lei de Fick para descrever esse processo, com a devida comparação com os dados experimentais obtidos.

2 Revisão bibliográfica

O desenvolvimento de pesquisas sobre o processo de secagem de alimentos foi impulsionado por fatores socioeconômicos que têm levado a um aumento das exigências quanto à higiene, conservação e garantia da qualidade desses alimentos. As teorias mais conhecidas utilizadas, atualmente, para explicar os fenômenos associados aos processos de secagem são (BROD; PARK; OLIVEIRA, 2003):

- Teoria da Difusividade de Lewis e Sherwood: é uma simplificação da equação geral de transferência de massa que descreve a secagem no período da taxa de secagem decrescente. Assim, o fluxo de massa é controlado pela pressão e a difusividade é influenciada pelo diferencial de concentração descrito pela segunda de Lei de Fick;

- Teoria Capilar de Buckingham: descreve o fluxo de líquido num sólido; não se aplica a materiais biológicos, mas fornece ferramentas que permitem fundamentar as equações de transferências simultâneas de calor e massa;

- Teoria de Condensação-Evaporação de Henry: utiliza balanços de massa e energia para analisar a transferência de calor equipolar e pressupõe que a umidade migra exclusivamente na forma de vapor.

Entre os vários mecanismos de transferência de umidade em sólidos, destacam-se a transferência por difusividade líquida provocada por gradiente de concentração de umidade e a transferência por difusividade de vapor movida por gradiente de concentração de umidade e de pressão parcial de vapor, causados por gradiente de temperatura e fluxo de líquido e de vapor originados por diferença de pressão externa, contração, alta temperatura e capilaridade.

Na análise do processo de secagem, deve-se levar em consideração: o conteúdo inicial de água do produto; o conteúdo final de água que o produto pode atingir (água de equilíbrio); a água que se encontra ligada à estrutura do sólido; e a transferência de

água do interior até a superfície do sólido durante a secagem.

A maioria dos alimentos é modelada como meio higroscópico capilar poroso, no qual a água pode apresentar-se em três formas: água livre, água ligada e vapor, que coexistem em equilíbrio termodinâmico local (DOE, 1998).

Alguns estudos sobre o processo de secagem do pescado serviram de base para o desenvolvimento desta pesquisa, como Cornejo (1987), Rodrigues (1996), Park *et al.* (2005), Bellagha *et al.* (2007), Kituu *et al.* (2010), Pacheco *et al.* (2011), Boeri (2012), Chaves (2013), Pires (2013) e Defraeye (2014).

Cornejo (1987) estudou os parâmetros de secagem e construiu um secador de baixo custo para filés salgados de cação. Os ensaios foram realizados com ar de secagem sob temperaturas entre 35°C e 40°C, umidade relativa variando de 40% a 50% e velocidade do ar entre 0,5 e 1 m/s. A construção do secador foi viável e desidratou os filés avaliados.

Rodrigues (1996) investigou a secagem de files de tambacu (*Colossoma macroporum*), previamente salgados e defumados de forma experimental e matemática, usando o modelo de difusão de Fick, considerando a difusividade efetiva constante e a velocidade do ar de 1,5 m/s. O modelo matemático ajustou-se aos dados experimentais com coeficiente de correlação de 0,97.

Park *et al.* (2005) simularam a secagem do cação via segunda Lei de Fick em uma placa plana unidimensional, obtendo uma boa concordância entre os dados simulados e os resultados obtidos experimentalmente, com desvios relativos variando entre 3,84% e 6,51%.

Bellagha *et al.* (2007) estudaram a secagem de sardinha (*Sardinella aurita*), para uma temperatura do ar de 40 °C, umidade relativa de 15% e velocidade de 1,5 m/s, não tendo detectado qualquer período de taxa de secagem constante.

Kituu *et al.* (2010) estudaram a secagem de tilápia (*Oreochromis niloticus*) num secador solar e desenvolveram modelos matemáticos para prever a temperatura da câmara de secagem, bem como da perda de umidade do peixe, comparando os resultados obtidos com os dados experimentais. Os parâmetros que influenciaram a secagem foram a temperatura da câmara, a umidade relativa, a densidade, a espessura e a difusividade do peixe. O modelo difusivo de Fick foi utilizado para simular os

dados de secagem, obtendo-se uma alta correlação (0,995) na comparação com os dados experimentais.

Pacheco *et al.* (2011) estudaram a curva de secagem e as isotermas de equilíbrio utilizando amostras de 80 gramas do pescado. As curvas de secagem foram determinadas com temperaturas do ar de 50°C, 60°C, 70°C e 80°C e velocidades de fluxo de ar de 1,5 m/s, 2,5 m/s e 3,5 m/s. Os resultados mostraram que as curvas de secagem e as isotérmicas de equilíbrio foram influenciadas significativamente por variações da temperatura do ar de uma forma semelhante aos materiais sólidos, conforme descrito na literatura. Também foram obtidos resultados estatísticos via modelos de Page e Peleg com ajuste de parâmetros que apresentaram resultados satisfatórios em relação aos dados experimentais.

Boeri (2012) analisou a cinética de secagem do bacalhau salgado verde (*Gadus morhua*) em secador convectivo a ar. Foram apresentados a análise da composição físico-química dos bacalhaus utilizados nos ensaios experimentais, bem como o estudo das isotermas de sorção do produto, por meio de experiências e modelação matemática.

Chaves (2013) promoveu uma revisão da literatura do processo de produção do bacalhau, englobando a salga e a secagem para redução da quantidade de água do alimento. Também realizou uma revisão referente à legislação brasileira no que se refere à definição do Pescado Salgado Seco, ao comércio e ao consumidor, além dos procedimentos de boas práticas na fabricação e comercialização.

Pires (2013) desenvolveu uma modelagem e simulação semi-empírica do fenômeno de secagem convectiva a ar do bacalhau salgado verde, resultando numa boa concordância entre dados experimentais e simulações. Constatou-se, entretanto, que a modelagem e a simulação são válidas apenas sob as condições experimentais nas quais os dados foram obtidos.

Defraeye (2014) apresentou uma revisão dos processos de secagem, empregando modelos computacionais avançados para desidratação de diversos produtos: alimentos, madeiras e cerâmicas. A secagem foi abordada como um problema multifísico, envolvendo diversos processos acoplados de transferência de calor, de massa e de quantidade de movimento que ocorrem no interior do material. Também foram estudados os processos de troca com o meio e a matéria prima e nas interfaces.

3 Materias e métodos

O pescado sugerido para a presente análise – a tainha, nome científico *Mugil sp.*, da família Mugilidae – apresenta ampla distribuição geográfica, ocorrendo em águas tropicais e subtropicais de todo o globo, principalmente em águas costeiras e estuarinas, sendo representado por 17 gêneros e 80 espécies (MENEZES, 1983).

Na Figura 2 é apresentado o pescado utilizado (Tainha, *Mugil sp.*) e a operação de filetagem como método de obtenção primeiramente do filé com pele – em seguida, separa-se a pele do filé com a faca. O filé foi obtido a partir da musculatura dorsal nas duas laterais do peixe no sentido longitudinal, ao longo de toda a extensão de sua coluna vertebral e costelas.

Figura 2 - Pescado e operação de filetagem



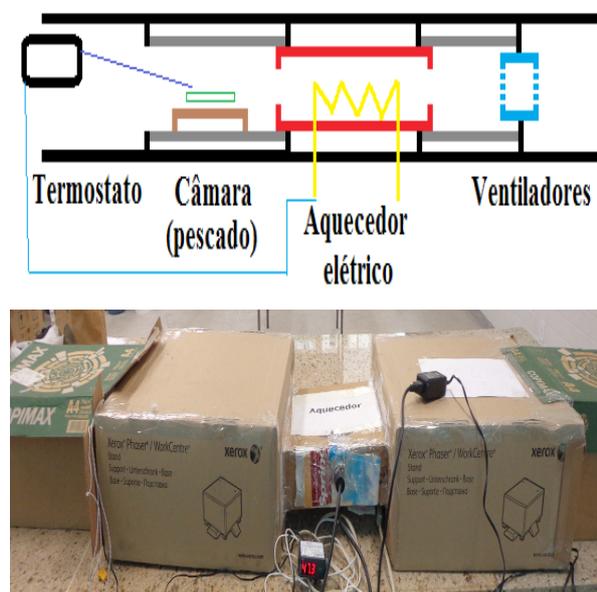
Fonte: Elaborada pelo autor.

O processo de secagem artificial foi realizado com o uso de um secador convectivo alternativo dotado de instrumentos de temperatura, de vazão de insuflamento de ar quente e da umidade relativa do ar, bem como de uma balança eletrônica para a medição da massa da amostra úmida (pescado) ao longo do tempo, até atingir a umidade de equilíbrio do ar de secagem. No final do processo, foi garantido ao

pescado maior tempo de conservação na temperatura ambiente com eliminação do desperdício.

Na Figura 3 é apresentado o diagrama esquemático e a montagem real do secador convectivo alternativo utilizando insuflamento de ar através de ventiladores (*coolers*) com aquecimento via resistência elétrica. A montagem possui um controle de temperatura eletrônico via termostato digital modelo TIC17RGTi fabricante Full Gauge que é de fácil ajuste e instalação.

Figura 3 - Diagrama esquemático e montagem real do secador convectivo alternativo



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 4 é apresentada a estufa comercial utilizada para realização da secagem com convecção natural e os filés de tainha após dois dias de secagem.

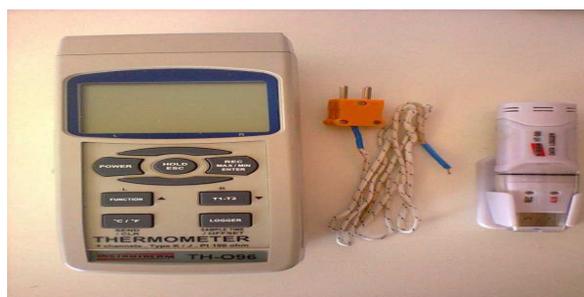
Figura 4 - Diagrama esquemático e montagem real do secador convectivo alternativo



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 5, por sua vez, demonstra os instrumentos de medição utilizados na obtenção das velocidades, temperaturas e umidade relativa do ar no interior do secador convectivo.

Figura 5 - Instrumentos empregados no secador convectivo





Fonte: Elaborada pelo autor.

O Termômetro digital TH-096 e Termopares Tipo K S-02K, ambos da Instrutherm, foram empregados para medição das temperaturas do ar e do pescado nos ensaios experimentais. As características principais do instrumento Termopar tipo K são: medição de -199,9°C a 999,9°C; precisão de ± 0,75% leitura ou 2,2°C; utilização de até 4 termopares; tempo de resposta de 1 segundo; interface RS-232; armazenamento de 16000 dados; e precisão de ± (0,5% + 1°C).

O *Datalogger* HT-500, da Instrutherm, foi utilizado para medição da temperatura e umidade relativa do ar na entrada do secador convectivo e na câmara de secagem. As características principais do instrumento são: medição de umidade relativa de 0% a 100%; temperaturas de -40°C a 70°C; precisão da umidade ± 3%; temperatura ± 1°C; possui ciclo de medição em segundos, minutos ou horas; interface USB; memória de 16000 para temperatura e 16000 para umidade relativa do ar.

O Termo-Anemômetro Digital Portátil TAVR-650, fabricado pela Instrutherm, possui display de cristal líquido (LCD) de 4 dígitos. Suas escalas são: área: 0.01 a 9999 m²; 0.01 a 9999 Ft²; vazão: 0.01 a 9999 x 100 (CMM)*; obs.: CMM = m³ / min 0.01 a 9999 x 100 (CFM)*; obs.: CFM = Ft³ / min; velocidade: 0,3 a 45,0 m/s; 1,0 a 140,0 Km/h; 0,6 a 88,0 Knots; 60 a 8800 Ft/min; 0,7 a 100,0 mile/h; precisão: ± 3%; resolução básica: 0.1; temperatura: 0°C a 45°C / 32°F a 133°F; precisão: ± 1.0°C / ± 1.8°F; resolução: 0.2°C / 0.36°F;

interface serial: RS-232; armazenamento: 2.000 registros; e sensor do tipo ventoinha.

O Termo-Higrômetro Digital HTR-170, fabricado pela Instrutherm, com Ponto de Orvalho, *DataLogger* e RS-232, possui Display de Cristal Líquido (LCD) de 4 dígitos. Suas escalas são: temperatura: 0°C a 50°C / 32°F a 122°F; precisão: ± 0,8°C / ± 1,5°F -; resolução: 0,01°C / 0,01°F; umidade: 0% a 95% UR-; precisão: 70% UR- ± (3% da leitura + 1% UR) < 70% UR - ± 3% UR-; resolução: 0,01% UR; ponto de orvalho: -25,3°C a 48,9°C / -13,5°F a 120,1°F.; sensor separado do instrumento; tempo de resposta: 5 a 30 segundos; interface serial: RS-232; *DataLogger*: armazenamento de até 1000 dados; intervalo de amostragem programável de 1 até 3.600 segundos; tempo de amostragem: 0,8 segundos.

O termostato digital modelo TIC17RGTi fabricado pela Full Guage possui alimentação de 115 ou 230 Vac; temperatura de controle de -50 a 105°C; resolução: 0,1°C (entre -10°C e 100°C) e 1°C no restante da faixa; e corrente máxima de 16(8)A / 250 Vac 1 hp.

A balança de precisão digital YP-b30001-bi, do fabricante Bioscale, mede de 0,1 a 3.000 gramas e tem capacidade (g) de: 3.000; tara: 0 ~ 3.000g; legibilidade de 0,1g; linearidade ≤ ± 0,2g; e reprodutibilidade ≤ 0,1g.

No desenvolvimento matemático, foi considerado apenas o problema de difusão de massa com solução aproximada, levando-se em conta a geometria de uma placa plana infinita de espessura *l*, que representa o comprimento característico do produto ou a espessura. O procedimento utilizado para resolver a equação diferencial parcial para a difusão de massa é um processo analítico que recorre à aplicação do método exato e à técnica da separação de variáveis, considerando o gradiente de concentração de umidade como força condutora, representado pela segunda Lei de Fick, expressa por:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{ef} \frac{\partial X}{\partial y} \right) \quad (1)$$

Solução analítica:

$$X^* = \frac{\bar{X} - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_e t}{4l^2}} \quad (2)$$

A resolução analítica da equação da 2ª Lei de Fick pode ser determinada quando a difusividade efetiva é considerada constante e as condições iniciais e de fronteira são especificadas. As soluções desta equação diferencial, em termos da posição e do tempo, estão em função do teor da umidade. Estas soluções permitem a elaboração de um modelo para a cinética de secagem de materiais a partir dos dados experimentais da variação de massa de um sólido em função do tempo de secagem e, com base neste modelo, pode-se estimar o coeficiente de difusividade efetiva (PIRES, 2013).

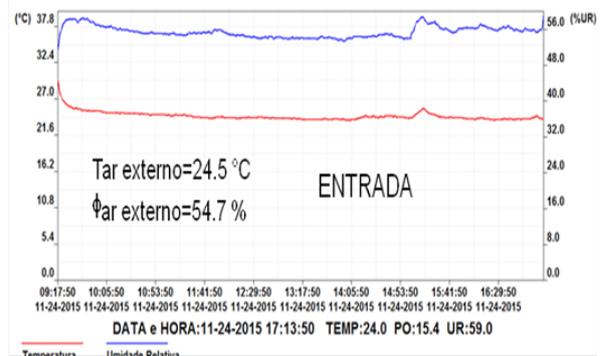
4 Resultados e discussão

4.1 Ensaios experimentais

Os estudos para secagem do filé de tainha foram realizados no laboratório de beneficiamento do pescado. Inicialmente, foram levantados os perfis de temperatura e umidade relativa do ar na entrada do secador (insuflamento dos ventiladores) e na câmara de secagem com controle de temperatura, conforme Figuras 6 e 7, respectivamente.

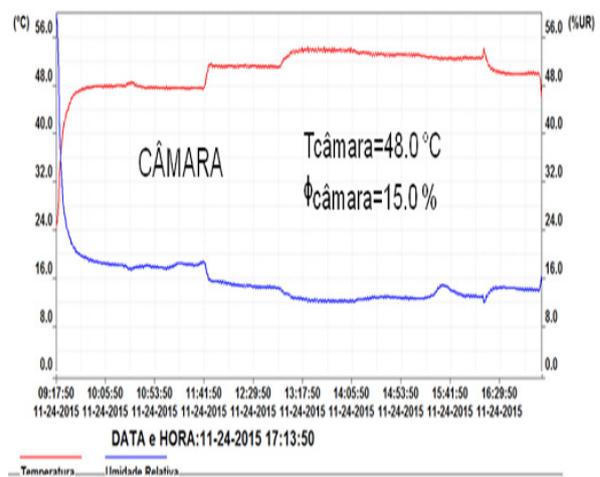
Observa-se que a temperatura e umidade relativa do ar na entrada do secador convectivo alternativo são mantidas nas condições do ambiente (laboratório climatizado, com temperatura do ar em torno de 24,5 °C e umidade relativa de 55%). Ao passo que, na câmara de secagem, a temperatura do fluxo de ar vai aumentando rapidamente, devido ao calor gerado na resistência elétrica, até atingir a temperatura de processo com controle via termostato digital. O aumento da temperatura provoca a diminuição da umidade relativa do ar, resultando numa condição de temperatura do ar em torno de 48 °C e umidade relativa de 15%.

Figura 6 - Perfis de temperatura e de umidade relativa do ar na entrada do secador



Fonte: Elaborada pelo autor.

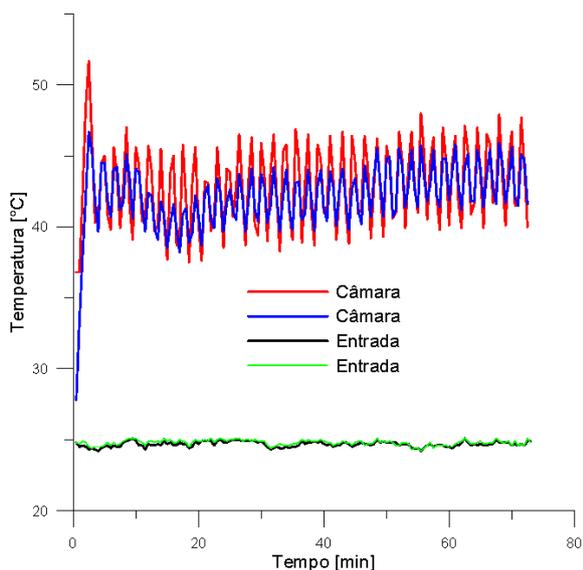
Figura 7 - Perfis de temperatura e de umidade relativa do ar na câmara de secagem



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 8, a seguir, apresenta o perfil de temperatura do ar na entrada do secador alternativo (insuflamento dos ventiladores) e na câmara de secagem com controle de temperatura, mostrando a uniformidade da temperatura ambiente e a oscilação da temperatura na câmara de secagem:

Figura 8 - Instrumentos empregados no secador convectivo

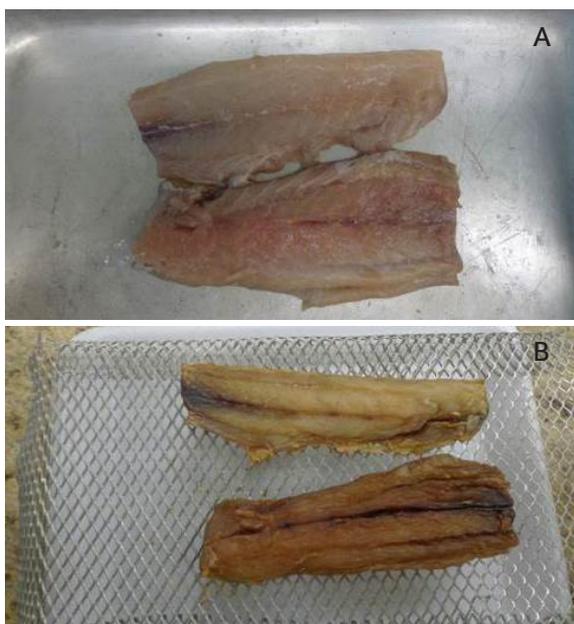


Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 9 são apresentados filés de tainha antes e após a operação de secagem convectiva para sua desidratação.

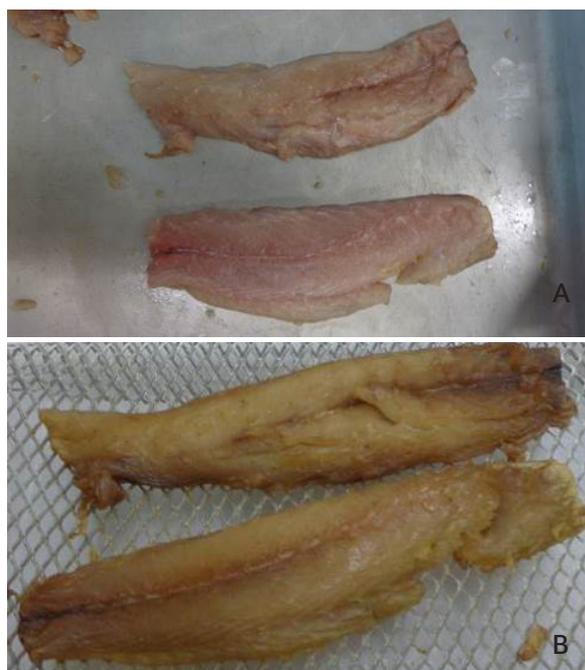
A Figura 10, por sua vez, apresenta filés de tainha antes e após a operação de secagem em estufa comercial com convecção natural para desidratação.

Figura 9 - Filés de tainha antes (A) e após (B) a operação de secagem convectiva no secador alternativo



Fonte: Elaborada pelo autor.

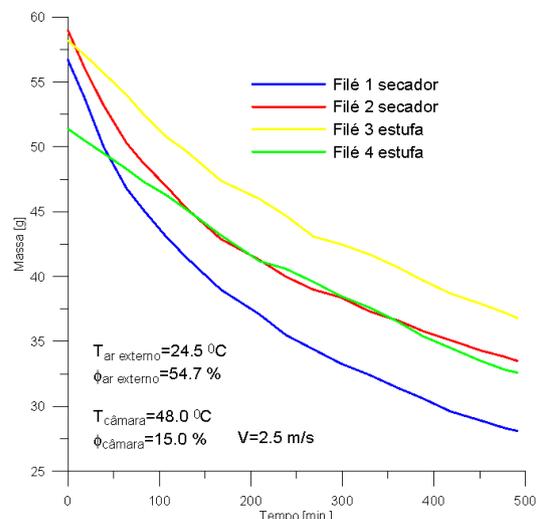
Figura 10 - Filés de tainha antes (A) e após (B) a operação de secagem em estufa comercial



Fonte: Elaborada pelo autor.

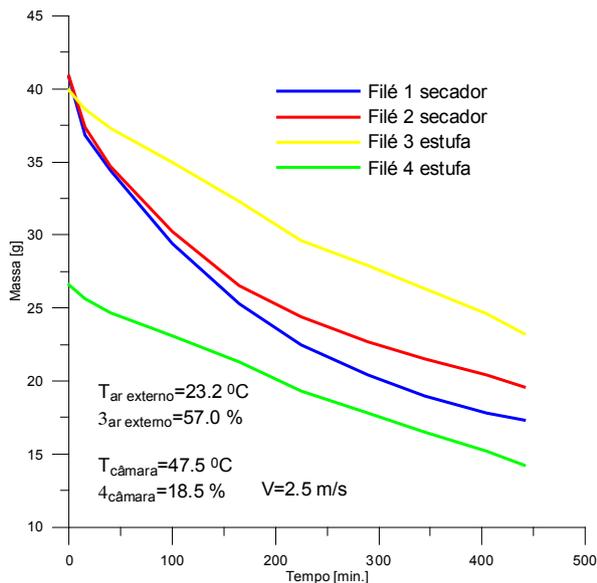
A variação de massa do pescado (tainha) no processo de secagem via secador convectivo alternativo e via estufa comercial sem convecção forçada no tempo é mostrado nas Figuras 11 e 12. Observa-se que os filés submetidos à convecção forçada desidratam mais rapidamente que os filés submetidos à convecção natural.

Figura 11 - Variação da massa do pescado no processo de secagem experimento 1



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 12 - Variação da massa do pescado no processo de secagem experimento 2



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como observado nas Figuras 11 e 12, a convecção forçada conduziu a um maior grau de secagem que a convecção natural. Isso também foi verificado na secagem de abóboras (BORGES *et al.*, 2008).

4.2 Resultados numéricos

Na análise do processo de secagem dos filés de tainha, as otimizações das curvas experimentais e o cálculo da difusividade efetiva foram realizados com base na solução analítica da segunda Lei de Fick. Assumindo-se que a forma geométrica do produto é uma placa plana infinita, onde a transferência interna de umidade durante a secagem é unidimensional, a secagem ocorre apenas em uma das faces, a resistência externa ao transporte da massa e o encolhimento do produto é desprezível, a umidade, temperatura e velocidade do ar de secagem são constantes e a umidade na superfície do produto é constante e igual à umidade de equilíbrio.

Com a finalidade de determinar o coeficiente de difusividade efetiva para a tainha, foi desenvolvido um procedimento de ajuste dos dados experimentais a uma regressão não linear, com otimização pelo método dos mínimos quadrados entre os dados experimentais e resultados extraídos pelo modelo, através da manipulação dos parâmetros do modelo, determinando-se um valor estimado do coeficiente

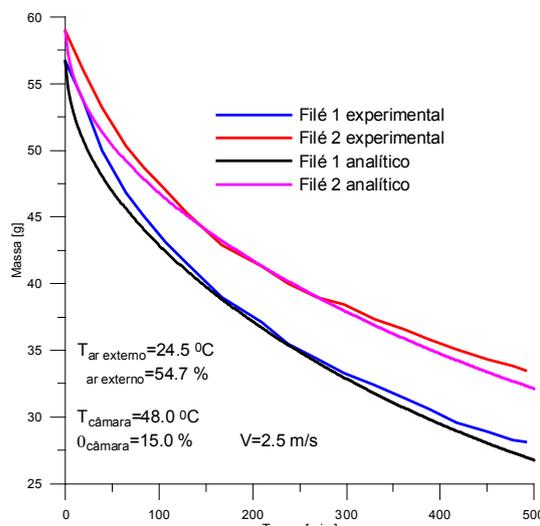
de difusividade efetiva para cada uma das condições experimentais.

A solução da difusividade efetiva, a partir da simulação computacional, considerando os dados dos ensaios experimentais de secagem convectiva no secador alternativo, resultou num ajuste do coeficiente de difusividade efetiva na faixa de $2.10 \cdot 10^{-10}$ a $2.7 \cdot 10^{-10}$ m²/s para os filés de tainha avaliados, com erro relativo inferior a 5%.

Na literatura, não foi encontrado o valor da difusividade da tainha. No entanto, a faixa de utilização do coeficiente de difusividade efetiva para peixes está entre 10^{-10} e 10^{-9} m²/s (PIRES, 2013).

Na Figura 13 são apresentadas curvas de secagem convectiva no secador alternativo com dados experimentais e ajuste com base na solução analítica da segunda Lei de Fick. Verifica-se que no ensaio 1 existiu uma tendência de dispersão dos valores mais acentuada no período inicial e período final do processo de secagem. Esse tipo de comportamento é relatado na literatura.

Figura 13 - Validação do modelo analítico com dados experimentais ensaio 1



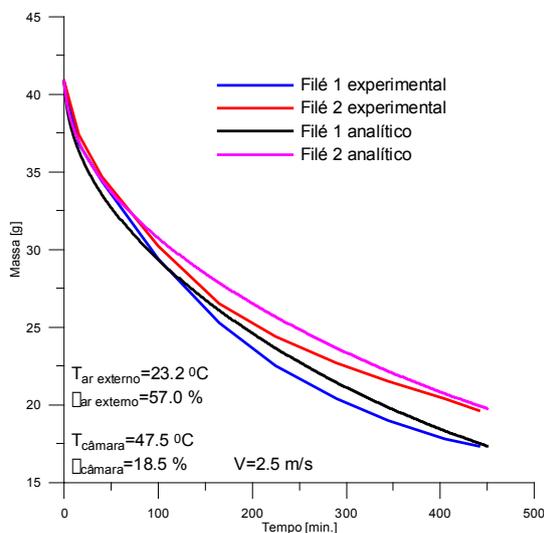
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 14 são apresentadas curvas de secagem convectiva no secador alternativo com dados experimentais e ajuste com base na solução analítica da segunda Lei de Fick. Verifica-se que no ensaio 2 não existiu uma tendência de dispersão como a apresentada no ensaio 1. Isto significa que as condições de ar de entrada interferem no processo de secagem,

principalmente quando associadas à sua umidade relativa.

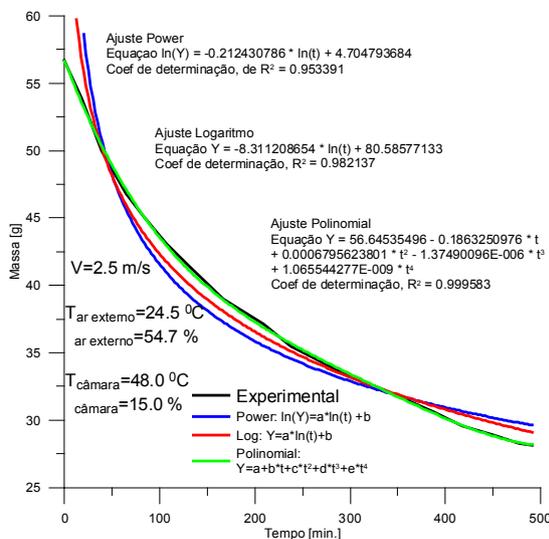
Já a Figura 15 apresenta as curvas de secagem convectiva no secador alternativo, com dados experimentais e curvas a partir de modelos empíricos na secagem da tainha. É possível perceber que os modelos polinomial de quarta ordem e logarítmico apresentaram maior concordância entre os valores experimentais e os valores otimizados, com coeficiente de determinação (R²) de 0.999583 e 0.982137, respectivamente, segundo demonstra a Figura 15.

Figura 14 - Validação do modelo analítico com dados experimentais ensaio 2



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 15 - Validação do modelo analítico com dados experimentais ensaio 2



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 Desempenho e viabilidade dos equipamentos

A análise dos dados coletados dos dois equipamentos avaliados para desidratação da tainha – via secador convectivo elétrico e via estufa comercial – mostraram que, devido à convecção forçada do secador alternativo, a retirada de água do filé é mais rápida do que a da estufa comercial com convecção natural.

Em relação ao desempenho térmico, pode-se afirmar que os dois equipamentos conseguem desidratar o pescado (tainha) sob condições de teste.

A viabilidade econômica de cada sistema precisa ser melhor explorada para uma conclusão mais consistente, pois os volumes das câmaras utilizadas nos experimentos são diferentes. No entanto, foi possível fazer uma análise qualitativa a partir da potência elétrica nominal de cada equipamento e do tempo de operação realizada sobre os filés de tainha.

A estufa comercial modelo NL-80-27 (27 litros) fabricada pela NEW LAB utilizada tinha uma potência elétrica nominal de 500 W, enquanto o secador convectivo construído tinha uma potência elétrica nominal de 1000 W. Como os dois equipamentos funcionam com o termostato digital em regime liga-desliga não foi possível precisar efetivamente o consumo elétrico de cada equipamento no período de 8 horas de secagem para devida comparação. Todavia, a partir dos dados experimentais apresentados nas Figuras 11 e 12, é possível estimar que o tempo gasto para secar o filé de tainha na estufa comercial foi quase o dobro do tempo do secador alternativo e, como a potência elétrica do secador é duas vezes maior que a da estufa, os processos são equivalentes no que diz respeito ao custo energético.

Além disso, os dados experimentais mostraram que a velocidade de insuflamento do ar interfere no resultado do processo de secagem e desidratação do pescado.

5 Conclusões

Atualmente, a população está em busca de uma vida mais saudável, e isso tem se refletido na procura de uma alimentação também mais saudável. O pescado tem atendido a essas expectativas, sobretudo,

no que se refere a uma dieta rica em nutrientes e de baixo valor calórico.

No Brasil, o consumo de pescado se encontra em progressão. Porém, para que seja garantida a sustentabilidade da atividade pesqueira e a qualidade do pescado consumido, é necessário usar técnicas que evitem a deterioração rápida e minimize o desperdício. A ação de microorganismos, sejam bactérias ou fungos, altera a apresentação do pescado e torna-o impróprio para o consumo, pois traz riscos à saúde humana.

Por essa razão, a presente investigação do processo da secagem artificial (convectiva) do pescado (tainha) – visando determinar o tempo de secagem através de ensaios em uma bancada experimental e testar o modelo matemático da segunda Lei de Fick para descrever o processo de secagem convectiva da tainha fazendo a devida comparação com os dados experimentais obtidos – foi importante para conservação desse alimento.

Neste trabalho, foi realizado um estudo de modelação e simulação de secagem por comparação de resultados simulados com dados experimentais obtidos em um secador alternativo e uma estufa comercial. Procurou-se, desse modo, obter ferramentas de natureza preditiva que antecipem o comportamento do pescado e que contribuam para a otimização da secagem.

Os equipamentos testados para desidratação do pescado obtiveram desempenho térmico satisfatório, aumentando a conservação do pescado e minimizando o desperdício. A desidratação do filé de tainha foi mais rápida no secador alternativo quando comparado ao processo em estufa comercial, que utiliza convecção forçada.

Uma boa concordância entre os resultados numéricos usando modelo analítico e os dados experimentais foi verificada. Um ajuste do coeficiente de difusividade efetiva resultou em valores numa faixa de 2.10-10 a 2.7.10-10 m²/s para os filés de tainha avaliados e erro relativo máximo de 5% entre os resultados numéricos e os dados experimentais. Os modelos empíricos polinômios de quarto grau e logarítmicos tiveram os melhores ajustes com os dados experimentais.

Por meio da análise dos dados numéricos, confirmou-se que não existe um modelo único que satisfaça a correta previsão do comportamento da secagem

do pescado (tainha) em todas as condições experimentais. No entanto, existem um ou mais modelos que mais se aproximam dos dados experimentais, para cada conjunto de condições termodinâmicas. Ou seja, cada modelo é válido apenas nas condições experimentais nas quais os dados foram obtidos.

Os modelos analíticos e numéricos podem ser utilizados para prever as condições otimizadas para o processo de secagem do pescado, diminuindo o tempo de realização desse procedimento para a espécie objeto do presente estudo.

6 Agradecimentos

Agradecemos o apoio financeiro disponibilizado pelo IFPB para o desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- BELLAGHA, S.; SAHLI, A.; FARHAT, A.; KECHAOU, N. AND GLENZA, A. Studies on salting and drying of sardine (*Sardinella aurita*): Experimental kinetics and modeling. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 3, p. 947-952, 2007.
- BOERI, C. N. **Secagem convectiva de produtos alimentares: otimização e controlo**. 2012. 358 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)—Universidade de Aveiro, Aveiro-Portugal, 2012.
- BORGES, S. V. *et. al.* Secagem de fatias de abóboras (*Cucurbita moschata*, L.) por convecção natural e forçada. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, v. 28, supl. p. 245-251, dez. 2008.
- BROD, F. P. R.; PARK, K. J.; OLIVEIRA, R. A. Modelos Matemáticos para Representar a Secagem de Raiz de Chicória. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal-SP. v. 23, n. 2, p. 354-363, 2003.
- CARVALHO, C. D.; CORNETA, C. M.; UIEDA, V. S. Schooling Behavior of *Mugil curema* (Perciformes: Mugilidae) in na estuary in southeastern Brazil. **Neotropical Ichthyology**, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 81-83, mar. 2007.

- CHAVES, M. V. **Pescado salgado seco: o bacalhau (uma revisão)**. 2013. 35 f. Monografia (Bacharelado em Medicina Veterinária)—Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- CORNEJO, F. E. P. **Estudo dos parâmetros de secagem e construção de um secador de baixo custo para filés salgados de pescado**. 1987. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)—Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1987.
- DEFRAEYE, T. Advanced computational modelling for drying processes – A review. **Applied Energy**, v. 131, p. 323-344, 2014.
- DOE, P. E. (Ed.). **Fish Drying & Smoking: Production and Quality**. Boca Raton: CRC Press, 1998. 250 p.
- GUSMÁN, E. C. **Bioquímica de pescados e derivados**. Campinas: Editora Funep, 1994.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Fishery and Aquaculture Country Profiles: The Federative Republic of Brazil**. 2010. Disponível: <<http://www.fao.org/fishery/facp/BRA/en>>. Acesso em: 24 dez. 2015.
- JAIN, D. Determination of Convective Heat and Mass Transfer Coefficients for Solar Drying of Fish. **Bio-systems Engineering**, v. 94, n. 3, p. 429-435, 2006.
- KITUU, G. M.; SHITANDA, D.; KANALI, C. L.; MAILUTHA, J. T.; NJOROGI, C. K.; WAINAINA, J. K.; SILAYO, V. K. Thin layer drying model for simulating the drying of Tilapia fish (*Oreochromis niloticus*) in a solar tunnel dryer. **Journal of Food Engineering**, v. 98, p. 325-331, 2010.
- MENEZES, N. A. Guia prático para o conhecimento e identificação de tainha e paratis (*Pisces, Mugilidae*), do litoral brasileiro. **Revista brasileira de Zoologia**, v. 2, n. 1, p. 1-12, 1983.
- MENEZES, N. A.; FIGUEIREDO, J. L. **Manual de peixes marinhos sudoeste do Brasil**. São Paulo: Museu de Zoologia, Universidade de São Paulo, 1985. 160 p.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, v. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002.
- NGUYEN, M. V.; JONSSON, A.; GUDJONSDOTTIR, M.; ARASON, S. Drying kinetics of salted cod in a heat pump dryer as influenced by different salting procedures. **Asian Journal of Food and Agro-Industry**, v. 4, n. 1, p. 22-30, 2010.
- ORDÓÑEZ, J. A. **Tecnologia de alimentos de origem animal**. São Paulo: Artmed, 2005.
- PACHECO, A. C. W. *et. al.* Modeling of drying and adsorption isotherms of the fish feed. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 54, n. 3, p. 577-588, 2011.
- PARK, K. J.; ARDITO, T. H.; ITO, A. P. K.; PARK, J. B.; OLIVEIRA, R. A.; CHIORATO, M. Effective diffusivity determination considering shrinkage by means of explicit finite difference method. **Drying Technology**, v. 25, n. 7-8, p. 1313-1319, 2007.
- PARK, K. J.; ITO, A. P.; ARDITO, T. H.; OLIVEIRA, R. A. de; CHIORATO, M.; PARK, K. J. B. Aplicação de um Método de Diferenças Finitas Explícito na Secagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, 24., 2005, Canoas, **Anais...** Canoas: 2005. p.1-3.
- PARK, K. J.; VOHNIKOVA, Z.; BROD, F. P. R. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). **Journal of Food Engineering**, v. 51, n. 3, p. 193-199, 2002.
- PIRES, J. F. M. **Modelação semi-empírica da secagem de bacalhau salgado verde**. 2013. 159 f. Dissertação (Engenharia Mecânica)—Universidade de Aveiro, Aveiro-Portugal, 2013.
- RODRIGUES, A. M. C. **Secagem e defumação de peixe de água doce**. 1996. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos)—Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.