



PPGCTA
Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Tecnologia de Alimentos



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
ALIMENTOS**

MATHEUS YURI DE OLIVEIRA ROSA

**CINÉTICA DE SECAGEM DO CAMARÃO-DA-
AMAZÔNIA (*Macrobrachium amazonicum*) POR
*REFRACTANCE WINDOW***

BELÉM – PA, BRASIL

2023

MATHEUS YURI DE OLIVEIRA ROSA

**CINÉTICA DE SECAGEM DO CAMARÃO-DA-AMAZÔNIA (*Macrobrachium amazonicum*) POR
*REFRACTANCE WINDOW***

Dissertation presented to the Graduate Program of Food Science and Technology (PPGCTA) of the Federal University of Pará (UFPA) in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master in Food Science and Technology.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos (PPGCTA) da Universidade Federal do Pará (UFPA) como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Orientador(a): Antonio Manoel da Cruz Rodrigues.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA.

BELÉM – PA, BRASIL

2023

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

R788c Rosa, Matheus Yuri de Oliveira.
Cinética de secagem do Camarão-da-Amazônia
(*Macrobrachium amazonicum*) por Refractance window / Matheus
Yuri de Oliveira Rosa. — 2023.
89 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Antonio Manoel da Cruz Rodrigues
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Tecnologia de Alimentos, Belém, 2023.

1. Alimentos. 2. Etanol. 3. Modelagem matemática. 4.
Pescado. 5. Secagem. I. Título.

CDD 664

Data da defesa: 19 de outubro de 2023.

COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **Antonio Manoel da Cruz Rodrigues**
Data: 20/12/2023 13:40:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Antonio Manoel da Cruz Rodrigues
Universidade Federal do Pará – PPGCTA/ITEC
Orientador – Presidente da comissão

Documento assinado digitalmente
 **Luiza Helena da Silva Martins**
Data: 12/12/2023 21:46:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr.^a Luiza Helena da Silva Martins
Universidade Federal do Pará – PPGCTA/ITEC
Membro titular interno

Documento assinado digitalmente
 **CAMILO BARROSO TEIXEIRA**
Data: 12/12/2023 16:38:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Camilo Barroso Teixeira
Universidade Federal do Pará – FEA/ITEC
Membro titular externo

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros também encontra-se registrada no SIGAA e disponível na Secretaria do PPGCTA-UFPA.

*À minha família, aos amigos e professores,
dedico.*

AGRADECIMENTOS

É muito gratificante chegar a esse momento, em que posso agradecer às pessoas que participaram diretamente e indiretamente para a conclusão deste curso de mestrado, bem como agradecer a todos e todas que ajudaram, participaram, incentivaram e torceram pelo meu desenvolvimento e pela minha felicidade ao longo da vida. Ao meu ver, essa é uma oportunidade de demonstrar com palavras não apenas a gratidão, mas também a importância daqueles que passaram e marcaram de alguma forma a minha vida acadêmica.

Primeiramente, agradeço a Deus, por me proporcionar vida, inteligência, saúde e paciência, sobretudo nos momentos mais difíceis da minha trajetória. Agradeço também pela oportunidade de poder estudar em uma Instituição de Ensino Superior Pública – a partir da minha aprovação no vestibular pude proporcionar um momento de felicidade àqueles que sempre estiveram ao meu lado.

À minha mãe, **Marcia Loureiro de Oliveira**, mãe solteira, guerreira e trabalhadora, que me deu a vida e sempre enfrentou barreiras, trabalhou e trabalha duro para me proporcionar uma vida confortável e digna. Sou grato por estar ao meu lado em todos os momentos, felizes e infelizes, por me educar, por me incentivar, sonhar e batalhar junto comigo para alcançar todos os meus sonhos e objetivos.

Aos meus avós, **Francisca Xavier Loureiro de Oliveira e Olivaldo Sousa de Oliveira**, os quais me criaram desde o nascimento e participaram de toda a minha formação. Com eles, além de valores de vida e educação, aprendi sobre amor e proteção, seja do jeito mais “durão” de D. Diva, seja do jeito mais preocupado e “curioso” do Rei. Sou grato por todo apoio dado e ao incentivo aos estudos.

Agradeço também aos demais familiares que se fizeram presentes durante a minha caminhada.

Ao **Flavio Henrique Souza Lobato**, toda a minha gratidão. A pessoa que esteve comigo em todos os momentos da minha vida acadêmica, com quem eu aprendi e continuo aprendendo muito, que não mediu esforços para me auxiliar em tudo que fosse possível. Sou grato por todos os ensinamentos, por todos os conhecimentos repassados e adquiridos, por todo apoio e paciência.

Aos meus amigos, **Fernanda Ferreira Borges e Raylson Max da Silva Castro**, obrigado por todas as conversas, as risadas e, mais que isso, por toda a troca de conhecimento e por toda a parceria.

Às minhas companheiras de mestrado **Simone da Silva Santos, Deyse Dayan Freitas de Sousa e Jéssica Cohém de Mélo**, que me acompanharam nas lutas diárias, seja durante as disciplinas, seja nos experimentos de laboratório (sabemos que não foi fácil).

À **Dayala Albuquerque da Silva**, que em meio a tantos compromissos, sempre foi uma pessoa solícita e sanou diversas dúvidas durante o processo de escrita da dissertação.

Ao meu professor e orientador, **Antonio Manoel da Cruz Rodrigues**, pela orientação e por me apresentar a temática com a qual estou me tornando mestre. Sou eternamente grato pela oportunidade de ser bolsista de mestrado, pois, por meio dessa experiência, pude me aprofundar no universo da pesquisa científica.

À banca, em especial à Prof.^a **Luiza Helena da Silva Martins** e ao Prof. **Camilo Barroso Teixeira**, pelas importantes contribuições dadas ao meu trabalho.

A todos os professores e a todas as professoras que me ensinaram tanto durante o curso.

Ao **Laboratório de Processos de Desidratação e Secagem** e ao **Laboratório de Medidas Físicas**, por disponibilizarem os instrumentos necessários para a obtenção dos meus dados.

À **Universidade Federal do Pará (UFPA)** e ao **Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos (PPGCTA)**, pela formação pessoal, acadêmica e profissional que me foi dada. Sou feliz por ter feito parte da história dessas instituições.

À **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)**, pela bolsa de pesquisa que possibilitou a elaboração deste trabalho e a conclusão do mestrado.

A todos e a todas, minha eterna gratidão!

AGRADECIMENTOS ÀS AGÊNCIAS DE FOMENTO À PESQUISA
(Acknowledgement to the research funding agencies)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

(This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brazil (CAPES) - Finance Code 001).

*“As pessoas têm que saber
que investimento em Educação é
o melhor e o mais barato investimento
que um Estado pode fazer”.*

(Luiz Inácio Lula da Silva).

RESUMO

Na região amazônica, os camarões de água doce estão distribuídos por toda a extensão das sub-bacias hidrográficas. O *Macrobrachium amazonicum*, conhecido popularmente como Camarão-da-Amazônia, é a espécie com a maior produção na região e apresenta o maior potencial para a pesca e para a aquicultura. A captura e a comercialização é uma das principais e/ou única fonte(s) de renda para diversas famílias, sobretudo as ribeirinhas, em virtude do destino final dessa produção, com o escoamento em portos do Pará e do Amapá. Embora o camarão seja conhecido por seu alto valor nutricional, essa característica pode ser afetada quando esse alimento não passa por um método de conservação adequado ao prolongamento da sua vida útil. Dada a importância desse alimento, é necessária a busca por novas tecnologias, como o uso do etanol no pré-tratamento de alimentos – que tem a capacidade de agir na dissolução das membranas celulares, alterar a estrutura da amostra a ser desidratada, melhorar a transferência de umidade e reduzir o tempo da secagem, quando atrelado a secagem por *Refractance Window* (RW), método que é conhecido, na literatura, como uma inovação tecnológica, tendo em vista as suas vantagens, quais sejam: retem compostos bioativos; preserva a qualidade e o aumento da vida útil do produto; possui eficiência energética; depende de um menor custo operacional; e é ambientalmente viável. O objetivo desta dissertação foi avaliar o desempenho do método de secagem por RW associado ao pré-tratamento com etanol assistido por agitação mecânica e ultrassom no processo de desidratação de uma matriz de origem animal (Camarão-da-Amazônia – *Macrobrachium amazonicum*). Simultaneamente, buscou-se determinar parâmetros de transferência de massa e as propriedades termodinâmicas que controlam o processo de secagem. As amostras (abdômen descascado) foram pré-tratadas com etanol 100% (1:18) em agitação mecânica (PTAG) e em ultrassom (PTUS), por 10 minutos, além da amostra sem o pré-tratamento (SPT). Logo, as amostras passaram pelo processo de secagem em RW sob as temperaturas de 50, 70 e 90°C. Os parâmetros dos modelos matemáticos de Dincer & Dost, de Crank e de Motta Lima e Massarani foram estimados por meio do *Software Origin 2023*. As análises foram realizadas em duplicata com a utilização da análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey a 5% de probabilidade. Além disso, a qualidade do ajuste, para os dados experimentais da cinética de secagem (CS), foi estimada pelo coeficiente de variação (R^2) e pelo Chi-quadrado (X^2). Após a obtenção dos dados, a determinação de umidade apontou que, com a temperatura de 90°C, as amostras PTAG ($12,93 \pm 0,16\%$) e PTUS ($11,86 \pm 1,59\%$) apresentaram os menores teores de umidade final. Por meio da ANOVA, os resultados mostram que as amostras ASPT e PTUS apresentaram diferença significativa, por outro lado, a amostra PTAG não apresentou diferença significativa ($p < 0,05$) entre as temperaturas. Acerca da modelagem matemática da CS, o modelo de Motta Lima e Massarani foi o que apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais, com $R^2 \geq 0,98$ e valores reduzidos de X^2 para todas as temperaturas. As propriedades termodinâmicas foram calculadas a partir dos dados obtidos pelo modelo de Dincer & Dost, tais como: Energia de ativação (E_a) com variação entre o intervalo de 42,97 – 30,37 kJ/mol; valores de entalpia (ΔH) positivos, que houve necessidade de energia na forma de calor para a ocorrência da secagem; e a entropia (ΔS) com valores negativos, que indica que o processo ocorreu sem o aumento, significativo, da desordem no sistema. Evidenciou-se que a combinação de pré-tratamento com etanol assistida por AG e US, atrelada à secagem por RW, reduziu notavelmente o tempo necessário para a secagem do Camarão-da-Amazônia.

Palavras-chave: Alimentos; Etanol; Modelagem matemática; Pescado; Secagem.

ABSTRACT

In the Amazon region, freshwater prawns are distributed throughout the hydrographic sub-basins. *Macrobrachium amazonicum*, popularly known as the Amazon Prawn, is the species with the highest production in the region and has the greatest potential for fishing and aquaculture. Its capture and commercialization are one of the main and sometimes the only source of income for several families, especially those living along the riversides, due to the final destination of this production, with distribution in ports in Pará and Amapá. Although prawns are known for their high nutritional value, this characteristic can be affected when this food does not undergo a suitable preservation method to extend its shelf life. Given the importance of this food, it is necessary to explore new technologies, such as the use of ethanol in food pretreatment - which has the ability to dissolve cell membranes, alter the sample structure to be dehydrated, improve moisture transfer, and reduce drying time when combined with Refractance Window (RW) drying, a method that is known in literature as a technological innovation, in view of its advantages, which are: it retains bioactive compounds; it preserves quality and increases the product's shelf life; it has energy efficiency; it involves lower operating costs; and it is environmentally viable. The objective of this dissertation was to evaluate the performance of the RW drying method associated with ethanol pretreatment assisted by mechanical agitation and ultrasound in the dehydration process of an animal-based matrix (Amazon Prawn – *Macrobrachium amazonicum*). Simultaneously, mass transfer parameters and thermodynamic properties controlling the drying process were determined. The samples (peeled abdomen) were pretreated with 100% ethanol (1:18) under mechanical agitation (PTAG) and ultrasound (PTUS) for 10 minutes, in addition to the sample without pre-treatment (SPT). Then, the samples subjected to the drying process in RW at temperatures of 50, 70, and 90°C. The parameters of the mathematical models by Dincer & Dost, Crank, and Motta Lima and Massarani were estimated using Origin Software 2023. The analyses were done in duplicate using analysis of variance (ANOVA) and the Tukey test at 5% probability. Additionally, the quality of fit for the experimental drying kinetics (CS) data was estimated by the coefficient of variation (R^2) and the chi-squared (X^2). After obtaining the data, the moisture determination indicated that at a temperature of 90°C, the PTAG ($12.93 \pm 0.16\%$) and PTUS ($11.86 \pm 1.59\%$) samples had the lowest final moisture content. Through ANOVA, the results show that the ASPT and PTUS samples presented a significant difference, while the PTAG sample did not present a significant difference ($p < 0.05$) between the temperatures. Regarding the mathematical modeling of CS, the Motta Lima and Massarani model showed the best fit to the experimental data, with $R^2 \geq 0.98$ and reduced X^2 values for all temperatures. Thermodynamic properties were calculated based on data obtained by the Dincer & Dost model, such as activation energy (E_a) with a range between 42.97 - 30.37 kJ/mol; positive enthalpy (ΔH) values, indicating the need for heat energy for the drying process to occur; and negative entropy (ΔS) values, indicating that the process occurred without a significant increase in disorder in the system. Based on the results, it was evident that the combination of pretreatment with ethanol assisted by AG and US, coupled with RW drying, significantly reduced the time required for drying the Amazon Prawn.

Keywords: Food; Ethanol; Mathematical modeling; Fishery; Drying.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Morfologia do camarão	22
Figura 2 – Cadeia produtiva do camarão-da-Amazônia (<i>Macrobrachium amazonicum</i>)	23
Figura 3 – Representação da pesca do camarão-da-Amazônia	24
Figura 4 – Representação de um secador <i>Refractance Window</i>	35
Figura 5 – Vantagens da secagem por <i>Refractance Window</i> em alimentos.....	36
Figura 6 – Pré-tratamento com EtOH 100% em agitador mecânico (AG)	44
Figura 7 – Pré-tratamento com EtOH 100% em ultrassom (US)	44
Figura 8 – Diagrama esquemático do sistema de secagem por RW	45
Figura 9 – Exemplo da organização das amostras durante a secagem em RW.....	46
Figura 10 – Cinéticas de secagem por RW das amostras de camarão a diferentes temperaturas: A) 50°C; B) 70°C; e C) 90°C	58
Figura 11 – Experimental e predito do conteúdo de umidade adimensional em função do tempo de secagem das amostras com o modelo de Dincer & Dost: A) ASPT; B) PTAG; e C) PTUS	60
Figura 12 – Experimental e predito do conteúdo de umidade adimensional em função do tempo de secagem das amostras com o modelo de Crank: A) ASPT; B) PTAG; e C) PTUS.....	65
Figura 13 – Experimental e predito do conteúdo de umidade adimensional em função do tempo de secagem das amostras com o modelo de Motta Lima e Massarani: A) ASPT; B) PTAG; e C) PTUS.....	68
Figura 14 – Relação entre $\ln(D_m)$ versus $1/T$ na secagem de camarão por RW/SPT	71
Figura 15 – Relação entre $\ln(D_m)$ versus $1/T$ na secagem de camarão por RW com tratamento prévio em Etanol e assistido por AG	72
Figura 16 – Relação entre $\ln(D_m)$ versus $1/T$ na secagem de camarão por RW com tratamento prévio com Etanol e assistido por US	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Quadro sobre os métodos e técnicas de secagem de camarão convencionais	30
Quadro 2 – Quadro sobre os métodos e técnicas de secagem de camarão não convencionais	32
Quadro 3 – Codificação das amostras submetidas à secagem por RW	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos teóricos aplicados na modelagem da cinética de secagem	40
Tabela 2 – Modelos semi-teóricos aplicados na modelagem da cinética de secagem.....	41
Tabela 3 – Umidade final do camarão-da-Amazônia secos em RW	57
Tabela 4 – Parâmetros do ajuste do modelo Dincer & Dost	61
Tabela 5 – Parâmetros de transferência de massa pelo ajuste do modelo Dincer & Dost.....	62
Tabela 6 – Valores da difusividade obtidos por meio do modelo de Crank	67
Tabela 7 – Parâmetros do ajuste do modelo Motta Lima e Massarani	69
Tabela 8 – Valores da energia de ativação (E_a) e os parâmetros estatístico para secagem de camarão por RW a diferentes sistemas	73
Tabela 9 – Propriedades termodinâmicas obtidas para secagem de camarão por RW	74

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A	Área superficial da matriz sólida
AG	Agitação mecânica
AMS	Acúmulo de massa no sistema
ANOVA	Análise de variância
AOAC	Association of Official Analytical Chemists
ASPT	Amostra sem pré-tratamento
a_w	Atividade de água
b. u.	Base úmida
Bim	Biot efetivo de massa
CS	Cinética de secagem
CTD	<i>Cast-Tape Drying</i>
D_0	Valor da difusividade para o teor infinito de umidade
D_{eff}	Difusividade efetiva
DVA	Doença Veiculada por Alimentos
E_a	Energia de ativação
E_a	Energia de ativação (Kj/mol)
EMS	Entrada de massa no sistema
EtOH	Etanol
EUA	Estados Unidos da América
FEA	Faculdade de Engenharia de Alimentos
g	Gramas
GMS	Geração de massa no sistema
h	Hora
H ₂ O	Água
K	Constante de taxa de secagem [T ⁻¹]
Km	Coefficiente de transferência de umidade
ks	Coefficiente global de transferência de massa [M.L ⁻² T ⁻¹]
L	Espessura da camada
LAMEFI	Laboratório de Medidas Físicas
MA	Massachusetts
M_i	Massa individual
mL	Mililitro

mm	Milímetro
MR	Razão de umidade adimensional
M_T	Massa total
N	Fluxo mássico de água removido do sistema (matriz sólida)
NaCl	Cloreto de sódio
°C	Graus Celsius
OK	Oklahoma
PA	Pará
pH	Potencial hidrogeniônico
PTAG	Amostra pré-tratada com agitação mecânica
PTUS	Amostra pré-tratada em ultrassom
r	Raio do cilindro
R	Representação da constante universal de gás
R^2	Coefficiente de variação
R_p	Raio da partícula esférica ou cilíndrica
RTIQ	Regulamentos Técnicos de Identidade e Qualidade
RW	<i>Refractance window</i>
SMS	Saída de massa no sistema
SPT	Sem pré-tratamento
T	Temperatura
t	Tempo
T_{abs}	Temperatura absoluta
UF	Umidade final
UFPA	Universidade Federal do Pará
US	Ultrassom
W	Teor de umidade (base seca) em qualquer momento
W_e	Teor de umidade de equilíbrio (base seca)
X^2	Chi-quadrado
X_e	Umidade de equilíbrio
X_o	Umidade inicial
X_t	Umidade média do sólido
ΔG	Energia livre de Gibbs
ΔH	Entalpia
ΔS	Entropia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivo geral	20
2.2	Objetivos específicos	20
3	REVISÃO DE LITERATURA	21
3.1	Camarão-da-Amazônia (<i>Macrobrachium amazonicum</i>)	21
3.2	Uso do etanol como pré-tratamento para a secagem de alimentos	26
3.3	Secagem como método de conservação	27
3.4	<i>Refractance window</i>	35
3.5	Modelagem matemática de secagem	38
3.6	Propriedades termodinâmicas da secagem	41
4	MATERIAL E MÉTODOS	43
4.1	Material	43
4.2	Métodos	43
4.2.1	Pré-tratamento com etanol.....	43
4.2.2	Secagem por <i>Refractance window</i>	45
4.2.3	Modelagem matemática.....	47
4.2.3.1	Modelo matemático de Dincer & Dost.....	48
4.2.3.2	Modelo matemático de Crank.....	50
4.2.3.3	Modelagem matemática de Motta Lima e Massarani	50
4.2.4	Propriedades termodinâmicas	54
4.2.5	Análise estatística	55
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1	Avaliação da umidade do camarão seco por <i>Refractance window</i>	56
5.2	Cinética de secagem	57
5.3	Modelagem para predição dos parâmetros de transferência de massa	59
5.3.1	Modelagem matemática de Dincer & Dost	59
5.3.2	Modelagem matemática de Crank.....	60
5.3.3	Modelagem matemática de Motta Lima e Massarani	68
5.4	Propriedades termodinâmicas	71
6	CONCLUSÃO	76
7	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

O camarão é uma das principais fontes de proteínas de alto valor biológico, fator muito importante para a alimentação humana, além de sua fácil digestibilidade e alto teor de ácidos graxos poli-insaturados, o que torna esse alimento saudável (Ogawa; Maia, 1999). Embora apresente alto valor nutricional, o camarão é um alimento com alta perecibilidade, fator que contribui para a facilidade de contaminação e deterioração (Castañeda-López *et al.*, 2021).

A Região Amazônica apresenta uma rica fauna, em que o Camarão-da-Amazônia (*Macrobrachium amazonicum*) é um alimento muito presente na cultura e na mesa do consumidor, de modo que a frequência de consumo mensal do paraense é de aproximadamente 62,8% (Marques *et al.*, 2020). O camarão é facilmente encontrado em feiras e/ou mercados públicos, porém em condições impróprias de compra e venda, o que pode comprometer as características originais e o transformar em um produto de risco à saúde dos consumidores. No entanto, com base no estudo de Martins e Oetterer (2010), entende-se que a qualidade nutricional e a preferência de consumo nem sempre estão diretamente ligadas ao valor de mercado, mas sim às questões culturais e sensoriais.

A secagem é um método que pode ser aplicado na conservação do camarão, contudo, o tempo prolongado para a finalização e a baixa eficiência dos métodos tradicionais acarretam na busca por novas técnicas, como a secagem por *Refractance Window* (RW), método que apresenta a vantagem de preservar os parâmetros nutricionais e de qualidade (Waghmare, 2021). Com base nisso, comumente no processo de conservação do camarão, o produto inteiro é imerso em soluções concentradas de agentes osmóticos onde ocorre dois fluxos de massa simultaneamente, o fluxo de água do sólido para a solução (em virtude da diferença na pressão osmótica) e a transferência do soluto da solução para o sólido (em razão do gradiente de concentração) (Mai *et al.*, 2015).

Sob outra perspectiva, como técnica para a aceleração dos processos de secagem, o uso do etanol (EtOH) no pré-tratamento de alimentos pode ser uma alternativa. O solvente orgânico (etanol) tem a capacidade de agir na dissolução das membranas celulares, altera a estrutura da amostra a ser desidratada e melhora a transferência de umidade, a qual reduz o tempo do processo da secagem (Cunha *et al.*, 2020; Freitas *et al.*, 2021).

Associado às questões apontadas, é importante que haja um profundo conhecimento sobre cinética de secagem, bem como dos parâmetros de transferência de massa que envolvem a temática (Adeyeye, 2019). Para tanto, a cinética de secagem pode ser descrita por meio das

propriedades de transporte, quais sejam: a condutividade térmica; a difusividade térmica; a difusividade de umidade, assim como, pelos coeficientes de transferência de calor e massa da interface (Costa *et al.*, 2018). À vista disso, estes parâmetros são considerados importantes para o projeto, para a simulação e para a otimização do processo de secagem a partir da aplicação da modelagem matemática.

Diante desse contexto, a relevância do estudo da secagem do camarão-da-Amazônia pré-tratado com a combinação de EtOH com agitação mecânica e ultrassom, sobretudo com o propósito de compreender a fenomenologia da transferência de massa e de identificar variantes capazes de reduzir o tempo do processo de secagem, tal como os custos de produção. Em razão disso, este estudo pretende avaliar a aplicabilidade do modelo matemático com o uso dos dados experimentais da secagem por RW de amostras sólidas de músculo de camarão em formato cilíndrico, pré-tratadas com etanol, para determinar os parâmetros de transferência de massa e as propriedades termodinâmicas envolvidas no processo de secagem.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho do método de secagem por RW associado ao pré-tratamento com etanol assistido por agitação e ultrassom no processo de desidratação de uma matriz de origem animal (Camarão-da-Amazônia – *Macrobrachium amazonicum*). Simultaneamente determinar parâmetros de transferência de massa e propriedades termodinâmicas que controlam o processo de secagem.

2.2 Objetivos específicos

- Utilizar o etanol no pré-tratamento do Camarão-da-Amazônia para posterior secagem;
- Realizar a secagem das amostras de camarão por RW em 50, 70 e 90°C;
- Quantificar as cinéticas de secagem por RW da amostra em estudo, com e sem aplicação de pré-tratamento com uso de etanol;
- Modelar o comportamento da cinética de secagem por RW das amostras utilizando modelo analítico e modelo semi empírico;
- Avaliar o efeito de temperatura sobre as propriedades termodinâmicas e os parâmetros de transferência de massa na secagem por RW da amostra estudada.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Camarão-da-Amazônia (*Macrobrachium amazonicum*)

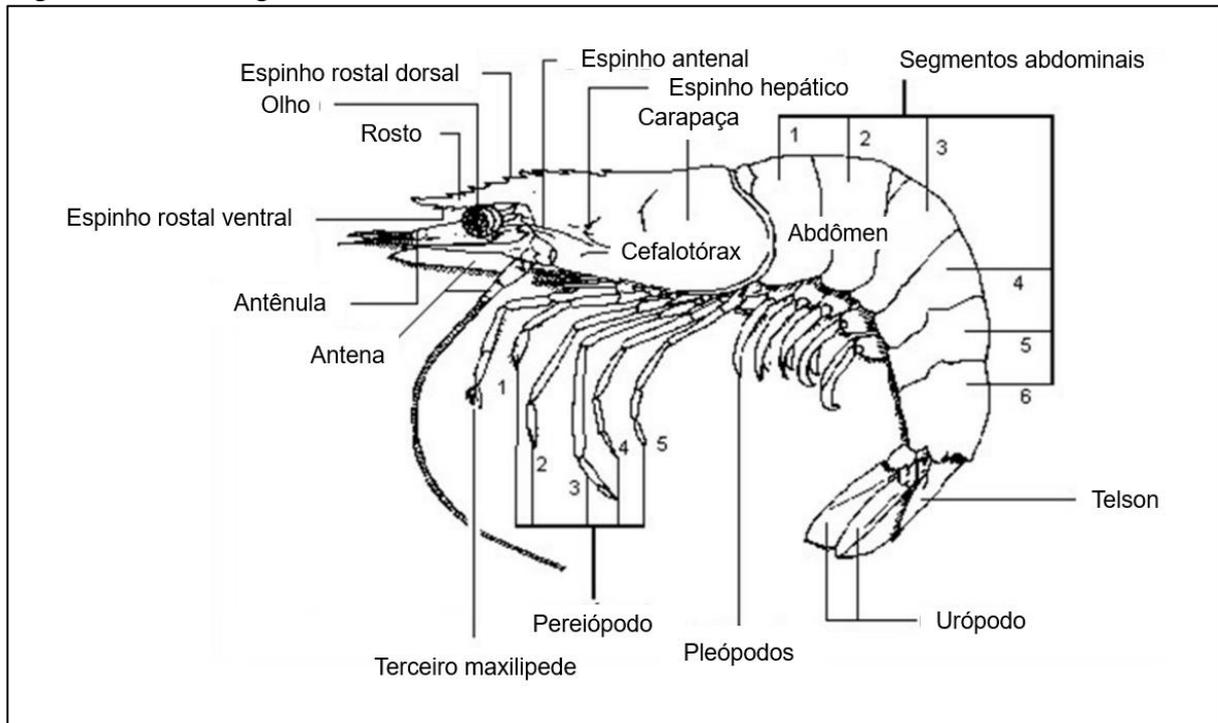
A musculatura do camarão é constituída por um frágil tecido conjuntivo, com potencial hidrogeniônico (pH) em torno da neutralidade e pelo alto valor de atividade de água (a_w) (Zhang *et al.*, 2015). As características nutricionais do camarão podem variar de acordo com a estação do ano, a época da captura, a idade, as condições do meio e a alimentação. A água, as proteínas e os lipídeos são os constituintes mais significativos da composição química e nutricional do camarão, bem como são determinantes para o valor calórico, para as características sensoriais e para a capacidade de conservação (Castañeda-López *et al.*, 2021).

Os crustáceos apresentam um exoesqueleto espesso e rígido, o que os diferencia dos demais artrópodes. Estudos apontam a existência de, aproximadamente, 38.000 espécies de crustáceos nos ecossistemas terrestres e aquáticos (dulcícola, marinho e salobro) (Cintra; Silva; Muniz, 2003), em que 2.500 espécies já foram registradas no Brasil (Amaral; Jablonski, 2005). Nesse sentido, a biodiversidade de táxons de camarões presente na Amazônia paraense representa 3,2% da diversidade carcinológica de costas e bacias brasileiras (Quaresma; Martinelli-Lemos, 2020).

Entre os crustáceos, os mais conhecidos e consumidos são o camarão, a lagosta e o caranguejo. Na Região Amazônica, os camarões de água doce estão distribuídos por toda a extensão das sub-bacias hidrográficas, em que, somente no Estado do Pará foram identificadas pelo menos 16 espécies das famílias Euryrhynchidae, Palaemonidae e Sergestidae (Pimentel; Magalhães, 2014). O *Macrobrachium amazonicum*, conhecido popularmente como camarão-da-Amazônia, é a espécie com maior produção na região, a qual apresenta um maior potencial para a pesca e para a aquicultura (FAO, 2016).

A morfologia do camarão é dividida em duas partes, a saber: cefalotórax e abdômen. O cefalotórax é constituído por seis cefálicos e oito torácicos, os quais formam uma única carapaça. O abdômen, por sua vez, é composto por seis segmentos que finalizam com uma estrutura pontiaguda (telso) (Koushik *et al.*, 2020). Com dois pares de antenas, um par de olhos e diversos pares de pernas, o camarão possui o corpo alongado e lateral achatada, envolto de um exoesqueleto formado por quitina (carboidrato) e sais de cálcio. Possuem ainda estruturas dentadas na superfície superior e inferior (Paschoal, 2017) (Figura 1).

Figura 1 – Morfologia do camarão



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

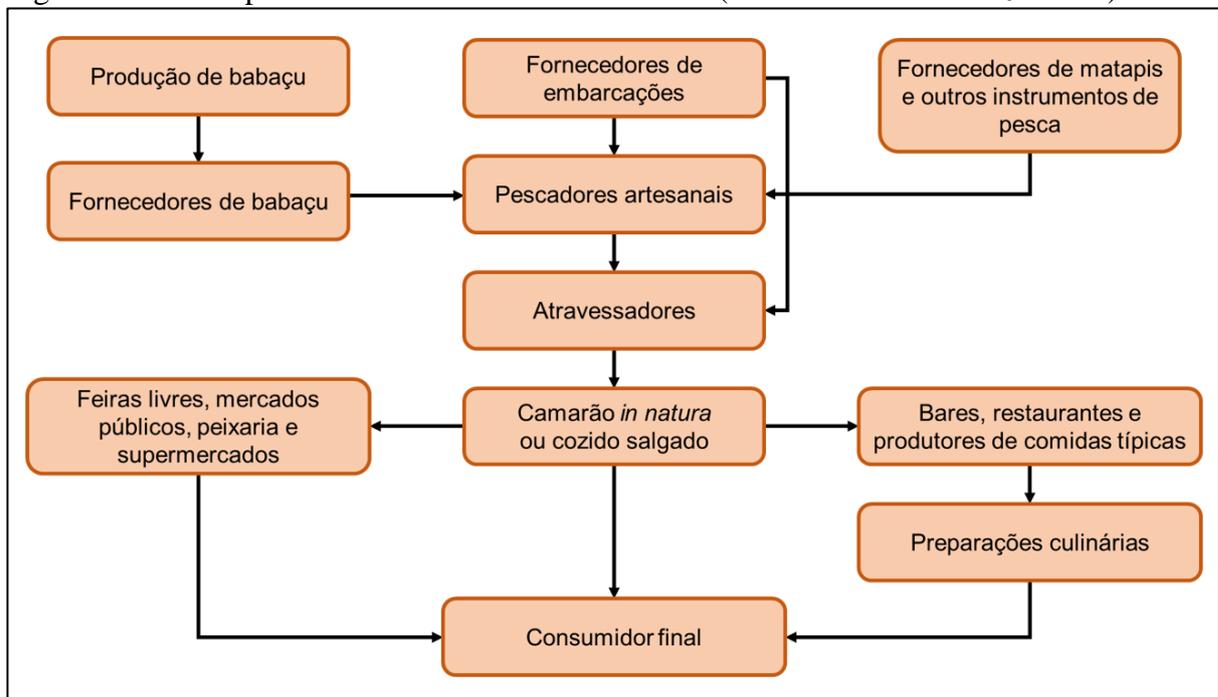
O *M. amazonicum* é a espécie mais abundante da bacia Amazônica, distribuída desde a região costeira até os rios do interior da Amazônia, bem como em diversos tipos de corpos d'água – águas brancas, águas claras e águas pretas (Maciel; Valenti, 2009). Essa é a espécie de água doce mais encontrada no Brasil, mas, também pode ser encontrada ainda por toda a América do Sul, mais especificamente nas Bacias do Orinoco (Venezuela), Amazonas, Araguaia-Tocantins, São Francisco (Brasil) e La Plata (Brasil, Paraguai e Uruguai) (Lima *et al.*, 2016). As espécies *Macrobrachium* são crepusculares, ou seja, apresentam uma atividade mais intensa durante o fim e início do dia, ao saírem para buscar alimentos, com período reprodutivo relacionado ao período de chuvas e a variação térmica (Paschoal, 2017).

Em relação a biometria, na pesquisa de Lima, Duarte e Damasceno (2018), os autores encontraram um comprimento total do *M. amazonicum* que varia entre 54,30 mm a 123,70 mm, com massa úmida total de 1,10 a 11,20 g. Nesse sentido, as populações estuarinas do *M. amazonicum* configuram-se por apresentar um maior comprimento médio, ao serem comparadas com populações continentais, um dos motivos para a espécie ser a mais indicada para a criação em cativeiro (Freire; Marques; Silva, 2012; Lima; Duarte; Damasceno, 2018).

O grande volume do Camarão-da-Amazônia em regiões tropicais e subtropicais o tornou alvo da exploração comercial em muitos países, o que contribui para a valorização desses animais como fonte de alimentação. O *M. amazonicum* possui o maior potencial para a pesca

(Maciel; Valenti, 2009). A extração do camarão para posterior comercialização é uma das principais e/ou única fonte(s) de renda para diversas famílias, sobretudo as ribeirinhas (Silva *et al.*, 2017), em virtude do destino final desta produção, através do escoamento em portos do Pará e do Amapá (Silva; Farias Júnior; Pereira, 2022). Ao prosseguir na cadeia produtiva do camarão-da-Amazônia, com ajuda de intermediários, a comercialização ocorre em feiras livres e/ou mercados públicos, de onde são destinados às redes de supermercado, serviços de alimentação, até a mesa do consumidor. O fluxograma abaixo (Figura 2) exemplifica como ocorre a cadeia produtiva do camarão-da-Amazônia.

Figura 2 – Cadeia produtiva do camarão-da-Amazônia (*Macrobrachium amazonicum*)

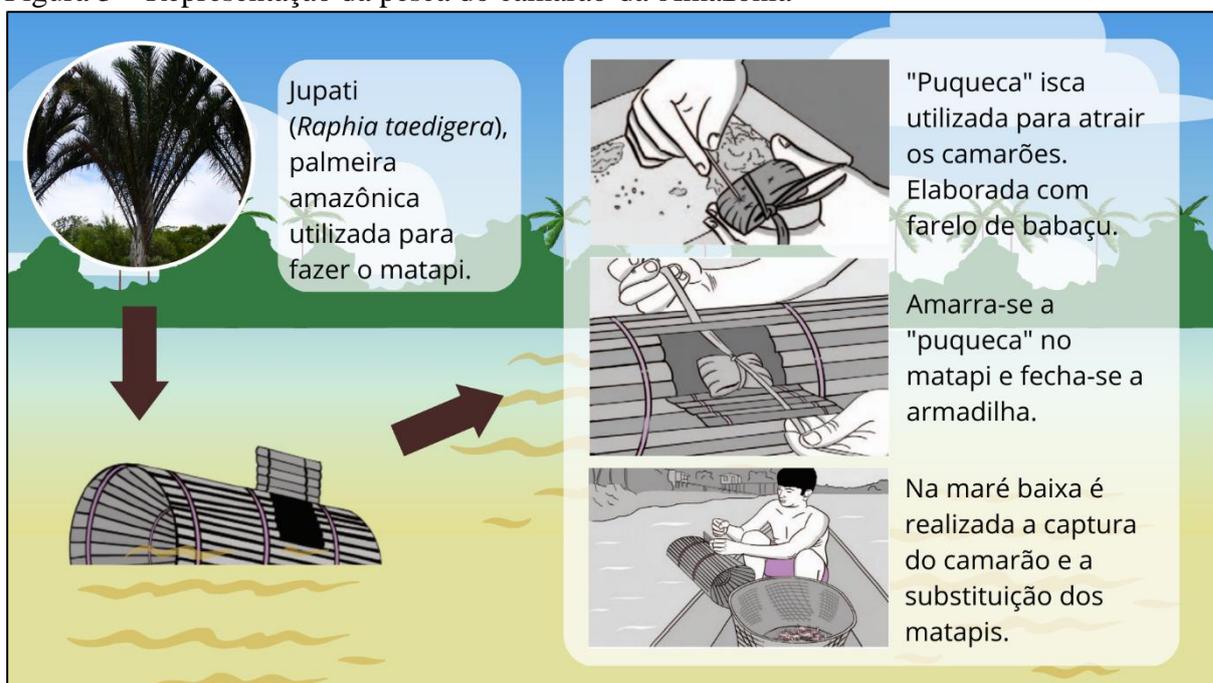


Fonte: Adaptado de Lima *et al.* (2016).

Na Região Norte do Brasil, o Pará captura um grande volume de camarão, tradicionalmente em áreas marinhas, estuarinas e continentais, atividade destaque da produção pesqueira (Quaresma; Martinelli-Lemos, 2020). O camarão de água doce (*M. amazonicum*) é o principal crustáceo explorado comercialmente nos estados do Pará e do Amapá, por meio da pesca artesanal, estes locais possuem uma significativa comercialização. No Pará, os municípios da microrregião de Cametá (Abaetetuba, Mocajuba e Igarapé Miri) realizam a pesca do camarão nos afluentes do rio Tocantins, próximo à hidrelétrica de Tucuruí (Silva; Farias Júnior; Pereira, 2022). Por outro lado, na microrregião do Marajó, estudos mostraram uma pesca significativa na Ilha das Araras, distrito do município de Curalinho (Costa *et al.*, 2020).

Por mais que os estudos tenham sido realizados em diferentes locais, nos dois citados (microrregiões de Cametá e do Marajó) é possível verificar coincidências na pesca, como a utilização do matapi, equipamento em formato cilíndrico, fechado por dois cones que possuem uma abertura em funil (para que o camarão não consiga sair) (Costa *et al.*, 2016). Os matapis são majoritariamente construídos com talas de jupati (*Raphia taedigera*), palmeira amazônica, em que no seu interior, são introduzidos farelo de babaçu e/ou farelo do coco babaçu para atrair os animais (Figura 3). No entanto, outros materiais podem ser utilizados para esta finalidade, como: malhadeiras; tarrafas; puçá, etc. (Aviz *et al.*, 2020). Na pesca do camarão podem ser capturados de 2 a 4 quilos durante a pré-safra, e de 8 a 10 quilos, por dia, durante a safra (Silva; Farias Júnior; Pereira, 2022).

Figura 3 – Representação da pesca do camarão-da-Amazônia



Fonte: Elaborado pelo autor (2023), adaptado de ProVárzea (2005).

Além da importância econômica, o camarão-da-Amazônia possui, também, uma importância cultural na Região Amazônica, tendo em vista a culinária rica e típica da região, que utiliza o camarão em várias receitas como o vatapá, o caruru, no acompanhamento do açaí, entre outros (Vieira; Guedes, 2021). Em um estudo sobre os impactos socioambientais relacionados com a pesca do *M. amazonicum* na Vila de Pescadores do Rio São José, em Abaetetuba (PA), os pescadores afirmaram que a comercialização do pescado não apresenta dificuldade, devido a apreciação dos consumidores para o uso deste alimento em preparações culinárias (Silva; Farias Júnior; Pereira, 2022).

Após a captura do camarão ocorrem diversas reações químicas, físicas e microbiológicas, até o estágio da completa deterioração. As alterações *post mortem* do camarão podem ser exemplificadas da seguinte forma: 1) captura – etapa iniciada na despesca, passa pelo transporte até a chegada do pescado ao abatedouro; 2) *rigor mortis* – estágio caracterizado pela contração muscular ocasionada pela morte do animal; 3) flacidez – etapa da redução da rigidez do músculo do camarão; e 4) autólise – etapa que resulta da ação enzimática do suco digestivo atrelada à ação enzimática dos tecidos do animal, rompe a parede intestinal e cria um ambiente propício para a multiplicação microbiana, o que acelera a sua deterioração (Ogawa; Maia, 1999; Castañeda-López *et al.*, 2021).

O camarão apresenta um importante valor nutricional devido a sua proteína com alto valor biológico, vitaminas e ácidos graxos insaturados (Silva *et al.*, 2017). No entanto, a composição nutricional pode ser afetada, devido que o produto (camarão) não possui e/ou não passou por um método de conservação que retarde a sua vida útil. Na região amazônica, os métodos de conservação de pescados são antigos, como a salga, o cozimento e a secagem ao sol (Chagas; Fernandes, 2019), os quais promovem o aumento da “vida de prateleira” sob condições inadequadas de manipulação.

Os métodos de conservação tradicionalmente aplicados ao camarão baseiam-se na redução da a_w do alimento, por meio da desidratação osmótica, habitualmente com o uso do cloreto de sódio (NaCl) na tentativa de inibir a proliferação microbiana (Evangelista-Barreto; Silva; Cerqueira, 2016). Contudo, apesar da relação bactericida do sal e da secagem, e os efeitos dessa combinação, nos produtos da pesca, tende a ocorrer a contaminação e/ou a multiplicação dos microrganismos, os quais são indicadores de condições e práticas higiênico-sanitárias inadequadas, durante as etapas da pesca e do beneficiamento (Chagas; Fernandes, 2019).

Ainda que a salga e a secagem artesanal, comumente aplicadas na conservação do camarão, sejam capazes de ocasionar a redução da a_w e da carga microbiana de pescados, estas contribuem, também, na redução da qualidade desses produtos (Evangelista-Barreto; Silva; Cerqueira, 2016), o que propicia riscos à saúde dos consumidores ao entrarem em contato com possíveis Doenças Veiculadas por Alimentos (DVA). Por esse motivo, torna-se necessária a implementação, adaptação e o estudo da viabilidade de novas tecnologias capazes de melhorar o pré-tratamento dos produtos de origem animal, como o camarão, além das já estabelecidas. Assim, como alternativa metodológica, está a utilização do EtOH no pré-tratamento do camarão-da-Amazônia a fim de reduzir o tempo de desidratação do produto.

3.2 Uso do etanol como pré-tratamento para a secagem de alimentos

Este tópico apresentará o método, o qual já possui aplicação viável em produtos de origem vegetal, como as frutas e hortaliças. O EtOH é um composto orgânico polar, com ponto de ebulição de 78°C e, com ponto de fusão de -114°C, capaz de dissolver membranas celulares (Morceli, 2006). Nos últimos anos, nacional e internacionalmente, diversos estudos utilizaram o EtOH no pré-tratamento de alimentos de origem vegetal (Granella; Bechlin; Crist, 2022; Zhou *et al.*, 2020). Como mencionado, o uso desse composto é capaz de reduzir consideravelmente o tempo de secagem, desde que esteja associado a métodos de secagem eficientes.

O EtOH no pré-tratamento de produtos vegetais tem apresentado bons resultados. Junqueira *et al.* (2021) ao reproduzirem esse método em folhas de taioba, observaram que houve uma redução significativa no tempo de secagem das folhas, sob diferentes temperaturas em secagem a vácuo. A aplicação do etanol no pré-tratamento de fatias de maçã ao serem submetidas à secagem convectiva assistida por ultrassom, resultou na diminuição do tempo da secagem a $70 \pm 2\%$ (Rojas; Augusto; Cárcel, 2020). Os resultados apontaram a eficiência da combinação do etanol com tecnologias de secagem, tendo em vista a diminuição do tempo do processo, bem como a não mudança nas características físico-químicas e sensoriais (Cunha *et al.*, 2020).

Ao realizarem o estudo com e sem etanol em folhas de guaco (*Mikania glomerata*), Silva, Celeghini e Silva (2018) observaram a redução do tempo de secagem que foi de 16 e 20% sob temperatura de 50 e 60°C, respectivamente. Em estudo análogo, o melão cantaloupe pré-tratado com etanol na concentração de 100% por 30 minutos, apresentou uma maior taxa de secagem e, como consequência, uma redução no tempo de processo (Cunha *et al.*, 2020). O etanol conta com uma menor tensão superficial e maior volatilidade se comparado a água pura, por exemplo, e na solução deste composto orgânico pode-se produzir um movimento convectivo, forte, que resulta em uma tensão de cisalhamento superficial, a qual facilita a remoção de água de um alimento (Gambaryan-Roisman, 2015).

Com o objetivo de aumentar a vida de prateleira dos alimentos, bem como melhorar as características sensoriais sem afetar as características nutricionais, inúmeras tecnologias têm sido utilizadas. Nesse contexto, a salga, a secagem, a marinação, a defumação e/ou a combinação destes métodos no beneficiamento de pescados, agrega valor ao produto final. Ademais, esses métodos podem reduzir a carga microbiana, aumentar a atratividade para o consumo (por meio do melhoramento do aroma, do sabor, da textura) e, além disso, promover um aumento na renda familiar de comunidades que dependem do extrativismo pesqueiro

(Oliveira *et al.*, 2022). Por esse motivo, é interessante a utilização do etanol do pré-tratamento dos produtos de origem animal, sobretudo aqueles que possuem uma alta perecibilidade como o camarão, à medida que contribui para a redução do tempo da secagem e mantém as características do produto.

3.3 Secagem como método de conservação

A secagem é uma das operações unitárias mais eficazes da indústria de alimentos, considerada uma das técnicas mais antigas para o aumento da validade dos produtos alimentícios, uma vez que inibe o desenvolvimento microbiano e a atividade enzimática (Assegehegn *et al.*, 2019), que ocorre por meio da remoção de água do alimento. Os métodos tradicionais ocasionam diversas alterações nas características físico-químicas e nutricionais do alimento, alterações estas que influenciam diretamente na escolha do produto por parte do consumidor (Waghmare, 2021).

A nível industrial, é ampla a discussão do melhor método de secagem e qual o secador é o mais adequado, etapa crucial e complexa (Costa *et al.*, 2018). Em outras palavras, para a escolha do melhor secador deve-se considerar parâmetros como o custo (do equipamento e do processo), a qualidade, a facilidade de manuseio, tempo de processo, bem como as características da amostra seca, com o propósito de viabilizar a metodologia (Martins *et al.*, 2020). Dessa forma, conforme Raghavi, Moses e Anandharamakrishnan (2018), a desvantagem dos processos tradicionais de secagem é o intenso consumo de energia, em que, aproximadamente 12 a 20% de energia são consumidas durante a produção de alimentos. Entre os métodos convencionais estão a secagem em estufa e o uso do liofilizador.

A secagem em estufa é um dos métodos mais comuns e utilizados na área de alimentos, fundamentado na remoção de água por meio da aplicação de calor. No equipamento insere-se o alimento, o qual será exposto a uma corrente de ar quente em ambiente fechado. O ar quente transmite calor à superfície do alimento que será seco por meio da convecção, logo, efetua-se trocas de calor da superfície para com o centro do alimento, tendo em vista a diferença de temperatura existente entre as duas regiões (Fellows, 2006).

O processo da secagem em estufa é considerado viável economicamente, devido ao seu valor mais acessível e por ser um método simples, mas para que este seja eficiente deve haver um bom controle de temperatura e da circulação de ar dentro do equipamento, tamanho, espessura e posição das amostras de forma adequada (Shende; Datta, 2020). Em contrapartida, o longo tempo de secagem (aproximadamente 24 h), o alto consumo de energia, degradação de

compostos e secagem não uniforme, são algumas desvantagens da secagem dos alimentos por estufa (Fellows, 2006).

A liofilização, por sua vez, é o processo que ocorre por meio da sublimação da água dos alimentos sob baixa temperatura e vácuo. Por conta disso, o material que passará pela secagem deve ser previamente congelado (Fellows, 2006). Dessa forma, a liofilização ocorre com base em três estágios, a saber: 1) congelamento –, em que o alimento ao alcançar -5°C , a água presente é congelada; 2) secagem primária –, onde a água no estado sólido é removida pela sublimação e; 3) secagem secundária –, em que o aquecimento provoca a desorção da água (Fellows, 2006; Ogawa, 1999).

Uma vez que a liofilização ocorre sob baixas temperaturas e com ausência de ar, este método possui algumas vantagens, como: ocasiona moderadas alterações nas características nutricionais e/ou sensoriais dos alimentos (Puente *et al.*, 2020), inativa reações enzimáticas, bem como reduz a perda de voláteis, dispende de uma menor contração do material e solubilidade elevada, o que não afeta a qualidade do alimento (Puente *et al.*, 2020; Waghmare, 2021).

Porém, por mais que a liofilização apresente vantagens capazes de torna-la um método totalmente viável, uma limitação deste é o tempo de secagem, devido ao baixo desempenho para a transferência de calor interno do equipamento, atrelado às baixas pressões de trabalho (Nindo; Tang, 2007). Tais fatores fazem com o que a radiação seja a responsável pela transferência de calor, afinal há pouca convecção e reduzida condução entre a superfície de contato sob o vácuo.

Como resultado, o método necessita de energia em grande quantidade para que ocorram a sublimação e a remoção do vapor de água da câmara, o que torna este um método caro (Nindo; Tang, 2007). Além do mais, o próprio equipamento já possui um alto valor, ou seja, a nível industrial, deve-se buscar por novas técnicas de secagem que apresentem um custo mais acessível, com menor duração de processo e que produzam alimentos com qualidade (Baeghbali *et al.*, 2019).

Além dos métodos comumente utilizados para a secagem de camarão, seja ao sol, seja com o uso de equipamentos (estufa e liofilizador), mencionados anteriormente, ressalta-se a importância da escolha de um método e/ou técnica que possua convergência com o tipo de produto a ser seco, volume da produção, disponibilidade de recursos e o investimento demandado.

Os métodos e técnicas possuem suas especificidades, logo suas vantagens e desvantagens, além dos desafios que garantam a obtenção de uma secagem que proporcione

alimentos secos com qualidade em suas características sensoriais e nutricionais. Por esse motivo, os Quadros 1 e 2 apresentam alguns métodos e/ou técnicas convencionais e não convencionais para a secagem de pescados, como o camarão, conforme os estudos encontrados na literatura especializada. É importante destacar que, cabe aos pesquisadores ou à indústria investigar qual método e/ou técnica mais adequada para alcançar os seus objetivos.

Quadro 1 – Quadro sobre os métodos e técnicas de secagem de camarão convencionais

Método ou técnica	Vantagens	Desvantagens
<p>Secagem por fumaça ou defumação</p> <p>Chagas (2023); Nunes (1999); Santos e Ribas (2021).</p>	<p>I – Características sensoriais: A utilização da fumaça durante o processo de defumação confere aos camarões um sabor e aroma característicos, o que os torna mais saborosos e valorizados. A defumação resulta em uma textura mais firme nos camarões, confere uma consistência única que pode ser desejável em determinados pratos;</p> <p>II – Conservação: A defumação é um método de preservação altamente eficaz, uma vez que a fumaça contém compostos antimicrobianos naturais que ajudam a inibir o crescimento de microrganismos. Isso resulta em uma maior vida útil do camarão, garantindo sua qualidade por mais tempo;</p> <p>III – Método tradicional: A secagem de camarão por meio da defumação é um método que possui uma longa tradição em diversas culturas, transmitido ao longo de gerações. Isso confere um valor cultural e histórico significativo ao produto final.</p>	<p>I – Duração do processo: A secagem de camarão por defumação é um processo que requer um tempo relativamente longo, o qual pode levar horas ou até mesmo dias para ser concluído. A duração varia de acordo com o tamanho dos camarões e a intensidade da fumaça desejada;</p> <p>II – Limitações: A defumação, por vezes, é realizada em pequena escala, o que limita a capacidade de produção quando comparada com outros métodos de secagem.</p> <p>III – Dependência de equipamentos e fonte de fumaça: Este método requer equipamentos específicos (defumadores), além de fonte de fumaça alimentada com madeira/serragem adequadas, o que exige investimentos iniciais e disponibilidade de recursos;</p> <p>IV – Risco de contaminação: No processo de defumação deve-se garantir o uso de fumaça oriunda de fontes seguras e que sejam livres de contaminantes e/ou substâncias tóxicas.</p>
<p>Secagem por salga</p> <p>Chagas e Fernandes (2019); Farias <i>et al.</i> (2022).</p>	<p>I – Conservação prolongada: Comumente utilizado após a pesca do camarão, este método propõe remover a umidade e inibir o desenvolvimento microbiano, os quais são responsáveis pela deterioração do produto. Esta permite que o camarão seja armazenado por longos períodos;</p> <p>II – Simplicidade: A secagem por salga é um método simples e conta com baixa tecnologia, não requer equipamentos complexos ou processos elaborados. Pode ser facilmente realizada em escala doméstica ou em pequenas operações de processamento de alimentos;</p> <p>III – Baixo custo: O sal é um ingrediente de baixo custo, logo, torna a secagem pela salga uma alternativa econômica ao ser comparada com outros métodos e/ou técnicas de secagem.</p>	<p>I – Teor de sódio elevado: A secagem por salga utiliza e, como consequência, possui um alto teor de sódio. Dessa forma, abre um alerta com as restrições dietéticas com relação ao sódio. Ademais, a salga resulta em um sabor salgado nos camarões, o qual não é comumente apreciado por consumidores;</p> <p>II – Perda de nutrientes: A secagem por salga pode acarretar na perda de nutrientes (vitaminas, minerais e outros) devido a remoção da umidade. Porém, o impacto nutricional pode ser reduzido se o consumo for em quantidades moderadas;</p> <p>III – Requer enxágue antes do consumo: Antes do consumo o deve ocorrer o enxágue do camarão para remover o excesso de sal. Este pode adicionar uma etapa a mais na preparação, antes do consumo.</p>
<p>Secagem por ventilação forçada</p> <p>Fellows (2006); Shende e Datta, 2020.</p>	<p>I – Redução no tempo de secagem: A ventilação forçada acelera o fluxo de ar sobre as amostras;</p> <p>II – Controle das condições de secagem: Neste tipo de secagem, pode-se realizar o controle da velocidade do ar, da temperatura e da umidade relativa, o que permite um bom ajuste nas condições de secagem;</p> <p>III – Menor risco de contaminação: Por ser realizada em um ambiente fechado, a ventilação forçada pode minimizar os riscos de contaminação das amostras (poeira, insetos e microrganismos);</p> <p>IV – Capacidade de produção: Pode-se realizar uma produção em larga escala, o que permite o processamento de um grande volume de camarões de forma eficiente.</p>	<p>I – Custo de investimento: Para a secagem por ventilação forçada deve haver a instalação de ventiladores e/ou sistemas de ventilação, o que requer investimentos iniciais;</p> <p>II – Consumo de energia: Requer alto consumo de energia elétrica, devido ao uso de ventiladores e/ou sistemas de ventilação;</p> <p>III – Monitoramento constante: Para garantir que a secagem ocorra de maneira eficiente, deve haver monitoramento constante da velocidade do ar, da temperatura e da umidade relativa;</p> <p>IV – Superaquecimento: A depender da temperatura do ar, se estiver muito alta, pode ocorrer superaquecimento, o que pode resultar na redução da qualidade dos produtos e causar alterações indesejadas</p>

Método ou técnica	Vantagens	Desvantagens
<p style="text-align: center;">Secagem por salmoura</p> <p>Costa <i>et al.</i> (2022); Lin <i>et al.</i> (2022); Pamungkaningtyas (2022).</p>	<p>I – Controle da umidade: A salmoura é uma solução salina, a qual permite retirar a umidade de amostras de pescados, como o camarão, de forma controlada. Desse modo, permite ajustar o teor de sal para alcançar o nível de desidratação desejada;</p> <p>II – Menor risco de contaminação: A imersão em salmoura pode auxiliar a reduzir o risco de contaminação microbiológica, devido às propriedades antimicrobianas do sal, as quais dificultam o crescimento e proliferação de microrganismos;</p> <p>III – Características sensoriais: A secagem por salmoura pode preservar o sabor próximo ao natural do camarão, o sabor é retido no processo de desidratação;</p> <p>IV – Redução no tempo de secagem: A aplicação da salmoura pode acelerar a secagem, ao ser comparada a outros métodos de secagem convencionais.</p>	<p>I – Alto teor de sódio: A secagem por salmoura pode apresentar um alto teor de sódio. Deve haver maior atenção de pessoas que possuem restrições dietéticas relacionadas ao sódio;</p> <p>II – Redução de nutrientes: Esse processo pode ocasionar a perda de nutrientes (como vitaminas e minerais), devido a redução da umidade;</p> <p>III – Custo de sal: A secagem por salmoura em larga escala necessita de um grande volume de sal, ou seja, exige um custo adicional para o processo.</p>
<p style="text-align: center;">Secagem por secadores de tambor</p> <p>Indiarto <i>et al.</i> (2021); Martins <i>et al.</i> (2020).</p>	<p>I – Redução no tempo de secagem: Secadores de tambor são projetados para que haja uma secagem rápida e eficiente, o que resulta em uma secagem em menor tempo;</p> <p>II – Controle do processo: Nesta secagem é permitido um controle preciso das condições da secagem (temperatura, velocidade do tambor e umidade), o que permite realizar ajustes para otimizar a qualidade do produto final;</p> <p>III – Capacidade de produção: Estes secadores são projetados para operações industriais, logo, podem processar grandes volumes de camarão, ideal para produção a larga escala;</p> <p>IV – Preservação de nutrientes: Esta secagem ocorre em ambiente controlado, o que auxilia na preservação de nutrientes e das características sensoriais.</p>	<p>I – Custo de investimento: A implementação necessita de alto investimento inicial, fator crucial para pequenos produtores e/ou empresas com poucos recursos;</p> <p>II – Consumo de energia: Secadores de tambor necessitam de alto consumo de energia durante a secagem;</p> <p>III – Complexidade operacional: A operação exige treinamento especializado, sobretudo para garantir que a secagem seja adequada e que o equipamento seja manuseado corretamente;</p> <p>IV – Risco de deterioração: Se as condições de secagem não forem controladas, pode ocorrer a deterioração do material a ser seco.</p>

Fonte: Organizado pelo autor (2023).

Quadro 2 – Quadro sobre os métodos e técnicas de secagem de camarão não convencionais

Método ou técnica	Vantagens	Desvantagens
<p>Secagem por infravermelho distante</p> <p>Cheng <i>et al.</i> (2021); Delfiya <i>et al.</i> (2022); Pei <i>et al.</i> (2022).</p>	<p>I – Redução no tempo de secagem: Esse é um método rápido e eficiente, o qual resulta em um menor tempo de secagem ao ser comparado com outros métodos convencionais;</p> <p>II – Controle preciso da temperatura: Esse sistema permite que haja um controle da temperatura de forma precisa, o que otimiza a qualidade do produto final;</p> <p>III – Eficiência energética: Esse método é capaz de reduzir o consumo de energia, o que resulta em um menor custo operacional, devido: possuir aquecimento direto; possuir eficiência na transferência de calor; e menor desperdício de calor;</p> <p>IV – Preservação de nutrientes e qualidade sensorial: Esse método auxilia na preservação dos nutrientes e das características sensoriais do produto a ser seco, o que resulta em uma maior qualidade do produto final.</p>	<p>I – Custo de investimento: Para a sua implementação é necessário um alto investimento inicial, o que pode ser um desafio aos produtores pequenos e/ou a empresas com poucos recursos;</p> <p>II – Complexidade operacional: Esse método exige treinamento especializado, sobretudo para que se garanta condições de secagem adequadas, bem como o bom manuseio do equipamento;</p> <p>III – Risco de superaquecimento: Se o controle da temperatura não for realizado de forma adequada, é possível que haja riscos de superaquecimento no produto, o que pode resultar na perda da qualidade (sabor e textura indesejados);</p> <p>IV – Equipamentos especializados: Esse método exige equipamentos especializados para a secagem por radiação infravermelha, isso limita o acesso e a disponibilidade do método.</p>
<p>Secagem por infravermelho de ondas curtas</p> <p>Obajemihi, Cheng e Sun (2023).</p>	<p>I – Redução do tempo de secagem: O tempo de secagem é menor ao ser comparado com outros métodos, devido possuir uma eficiência na transferência de calor nas camadas internas do produto;</p> <p>II – Economia de energia: A secagem por infravermelho de ondas curtas possui eficiência energética, já que o calor é aplicado de forma direta no alimento, logo não há necessidade do aquecimento de grandes quantidades de ar;</p> <p>III – Preservação da qualidade: Esse método é capaz de penetrar profundamente os alimentos, isso auxilia na preservação da qualidade sensorial dos produtos secos (cor, sabor, nutrientes);</p> <p>IV – Espaço compacto: A projeção dos equipamentos de secagem em infravermelho por ondas curtas pode ocorrer de forma compacta, logo, ocupa um espaço menor.</p>	<p>I – Custo de investimento: Para a sua implementação é necessário um alto investimento inicial, o que pode ser um desafio aos produtores pequenos e/ou a empresas com poucos recursos;</p> <p>II – Complexidade operacional: Esse método exige treinamento especializado, sobretudo para que se garanta condições de secagem adequadas, bem como o bom manuseio do equipamento;</p> <p>III - Equipamentos especializados: Esse método exige equipamentos especializados para a secagem por radiação infravermelha, isso limita o acesso e a disponibilidade do método;</p> <p>IV – Risco de superaquecimento: Se o controle da temperatura não for realizado de forma adequada, é possível que haja riscos de superaquecimento no produto, o que pode resultar na perda da qualidade (sabor e textura indesejados).</p>
<p>Secagem por leito de espuma</p> <p>Araújo <i>et al.</i> (2020).</p>	<p>I – Superfície expandida: A espuma oportuniza uma superfície expandida atrelada a uma estrutura porosa, a qual propicia uma maior área de contato do ar quente com o alimento, o que resulta uma eficiente transferência de calor e uma uniformidade na secagem;</p> <p>II – Maior contato: Os alimentos ficam suspensos, o que garante que todas as partes entrem em contato com o ar quente, a qual promove uma secagem homogênea e minimiza uma possível aglomeração e/ou aderência entre as amostras;</p>	<p>I – Custo de investimento: Para a sua implementação é necessário um alto investimento inicial, o que pode ser um desafio aos produtores pequenos e/ou a empresas com poucos recursos;</p> <p>II – Complexidade operacional: Esse método exige treinamento especializado, sobretudo para que se garanta condições de secagem adequadas, bem como o bom manuseio do equipamento;</p> <p>III - Equipamentos especializados: Esse método exige equipamentos especializados para a secagem por radiação infravermelha, isso limita o acesso e a disponibilidade do método;</p>

Método ou técnica	Vantagens	Desvantagens
	<p>III – Redução do tempo de secagem: A secagem por espuma tende a ser mais rápida ao ser comparada com outros métodos de secagem, uma vez que a estrutura porosa oportuniza a retirada da umidade do alimento;</p> <p>IV – Preservação da qualidade: Esse tipo de secagem auxilia na preservação da qualidade sensorial do alimento (cor, sabor, textura), uma vez que evita o superaquecimento e/ou danos causados na estrutura celular do alimento;</p> <p>V – Redução de perdas: A estrutura porosa impede que pequenos alimentos e/ou partículas caiam no fluido de secagem, o que reduz a perda de material durante o processo de secagem.</p>	<p>IV – Escala de produção: A viabilidade econômica desse método depende da escala de produção. Recomenda-se que a secagem por leito de espuma para operações industriais em larga escala.</p>
<p>Secagem por eletrohidrodinâmica</p> <p>Anukiruthika, Moses e Anandharamakrishnan (2021); Mousakhani-Ganjeh <i>et al.</i> (2021); Paul e Martynenko (2021).</p>	<p>I – Redução do tempo de secagem: A secagem por eletrohidrodinâmica tende a ser mais rápida ao ser comparada com outros métodos de secagem, em consequência da eficiente transferência de massa do líquido para a fase gasosa;</p> <p>II – Redução do consumo de energia: O uso de campos elétricos auxilia na redução do consumo de energia necessária para a retirada da umidade, o que torna esse método como eficiente em termos energéticos;</p> <p>III – Preservação da qualidade: Esse processo é rápido e suave, portanto, preserva as características sensoriais e nutricionais dos alimentos secos;</p> <p>IV – Temperatura reduzida: Essa secagem, por ser realizada com a utilização de temperaturas mais baixas, beneficia os alimentos termo sensíveis.</p>	<p>I – Custo de investimento: Para a sua implementação é necessário um alto investimento inicial, tanto na aquisição de equipamento como no desenvolvimento de tecnologia, o que pode ser um desafio aos produtores pequenos e/ou a empresas com poucos recursos;</p> <p>II – Complexidade operacional: A operação desse método exige treinamento especializado, sobretudo para que se garanta condições de secagem adequadas, bem como o bom manuseio do equipamento;</p> <p>III - Equipamentos especializados: Essa secagem necessita de e equipamentos específicos para aplicar o campo elétrico, isso limita o acesso e a disponibilidade do método;</p> <p>IV – Risco de superaquecimento: A depender de como estiver a intensidade do campo elétrico, se não estiver controlada de forma adequada, há o risco de superaquecimento do alimento, prejudicando a qualidade (sabor e textura).</p>
<p>Secagem por pulso de vácuo</p> <p>Pandiselvam <i>et al.</i> (2021); Roratto <i>et al.</i> (2021).</p>	<p>I – Redução do tempo de secagem: A aplicação de vácuo e pressão, intermitentemente, acelera a evaporação da umidade, o que resulta em um menor tempo de processo;</p> <p>II – Preservação da qualidade: Esse processo é rápido e suave, portanto, preserva as características sensoriais e nutricionais dos alimentos secos;</p> <p>III – Uniformidade: A aplicação intermitente do vácuo e da pressão auxilia a promoção de uma secagem uniforme por toda a superfície do alimento;</p> <p>IV – Menor consumo de energia: O uso de vácuo e pressão, de forma intermitente, provoca a redução do consumo de energia, ao comparar esse método a outros secadores contínuos com uso de vácuo constante.</p>	<p>I – Custo de investimento: Para a sua implementação é necessário um alto investimento inicial, tanto na aquisição de equipamento como no desenvolvimento de tecnologia, o que pode ser um desafio aos produtores pequenos e/ou a empresas com poucos recursos;</p> <p>II – Complexidade operacional: A operação desse método exige treinamento especializado, sobretudo para que se garanta condições de secagem adequadas, bem como o bom manuseio do equipamento;</p> <p>III – Equipamentos especializados: Essa secagem necessita de e equipamentos específicos, isso limita o acesso e a disponibilidade do método;</p> <p>IV – Risco de deterioração da qualidade: A depender do controle das condições de secagem, se não estiver controlada, há o risco de deterioração da qualidade do alimento, e como consequência, menor valor aos produtos finais.</p>

Método ou técnica	Vantagens	Desvantagens
<p data-bbox="163 371 418 427">Secagem por radiação ultrassônica</p> <p data-bbox="174 464 407 552">Huang <i>et al.</i> (2020); Malvandi, Feng e Kamruzzaman (2022).</p>	<p data-bbox="443 264 1211 352">I – Eficiência de secagem: As ondas ultrassônicas proporcionam uma rápida transferência de calor e massa, o que resulta em uma secagem com maior eficiência;</p> <p data-bbox="443 357 1211 413">II – Preservação da qualidade: Esse processo é suave, portanto, preserva as características sensoriais e nutricionais dos alimentos secos;</p> <p data-bbox="443 418 1211 505">III – Menor consumo de energia: A eficiência desse método pode ser mais econômica do que outros métodos de secagem, em termos energéticos;</p> <p data-bbox="443 510 1211 566">IV – Redução do tempo de secagem: A eficiência da secagem por radiação ultrassônica pode reduzir o tempo dos processos de secagem;</p> <p data-bbox="443 571 1211 659">V – Processo sustentável: Considera-se esse método como sustentável, uma vez que reduz o uso de altas temperaturas e/ou a utilização de produtos químicos no decorrer da secagem.</p>	<p data-bbox="1234 264 2002 384">I – Custo de investimento: Para a sua implementação é necessário um alto investimento inicial, tanto na aquisição de equipamento como no desenvolvimento de tecnologia, o que pode ser um desafio aos produtores pequenos e/ou a empresas com poucos recursos;</p> <p data-bbox="1234 389 2002 477">II – Complexidade operacional: Esse método exige treinamento especializado, sobretudo para que se garanta condições de secagem adequadas, bem como o bom manuseio do equipamento;</p> <p data-bbox="1234 481 2002 569">III - Equipamentos especializados: Esse método exige equipamentos específicos para a geração de ondas ultrassônicas, o que limita o acesso e a disponibilidade do método;</p> <p data-bbox="1234 574 2002 662">IV – Escala de produção: A viabilidade econômica desse método depende da escala de produção. Recomenda-se que a secagem por radiação ultrassônica para operações industriais em larga escala.</p>

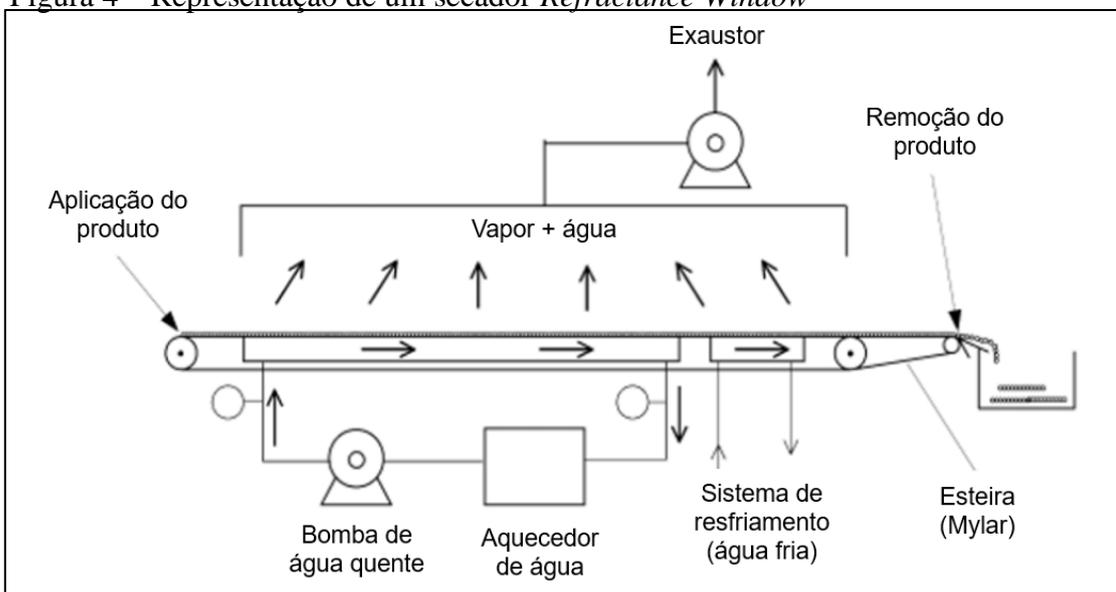
Fonte: Organizado pelo autor (2023).

É sempre importante estudar e/ou comparar os diferentes equipamentos secadores e métodos de secagem de alimentos, bem como avaliar a viabilidade e aplicação do uso de secadores alternativos. Por esta razão, um método alternativo para a remoção da água presente no alimento é a secagem por RW, onde a amostra é seca em uma fina camada em superfície aquecida. Além de que, com o uso em alimentos, mostra-se eficaz na redução de energia e na retenção dos compostos termolábeis (Puente *et al.*, 2020; Waghmare, 2021). O método será melhor detalhado a seguir.

3.4 *Refractance window*

A secagem por RW é conhecida na literatura como uma tecnologia inovadora para a secagem, a qual é capaz de converter inúmeras soluções e suspensões líquidas e/ou viscosas em pós ou flocos (Zotarelli *et al.*, 2017). Conforme Zotarelli *et al.* (2017), a RW é uma variação da *Cast-Tape Drying* (CTD). O método da RW ocorre com a utilização de água quente circulante (95-97°C) sob pressão atmosférica, a fim de dispor de energia térmica à amostra a ser seca, a qual é inserida em um filme fino sob água quente circulante, como o auxílio de uma correia plástica transportadora, características que promovem uma rápida secagem da amostra (Baeghballi; Niakousari; Farahnaky, 2016). Para que o produto (amostra) seco possa ser retirado do equipamento, de forma facilitada, pode-se mover o produto sob água fria –, etapa importante para reduzir a temperatura da amostra do ponto de transição vítrea (Azizi *et al.*, 2017; Nindo; Tang, 2007). As etapas da secagem por RW podem ser observadas na Figura 4.

Figura 4 – Representação de um secador *Refractance Window*

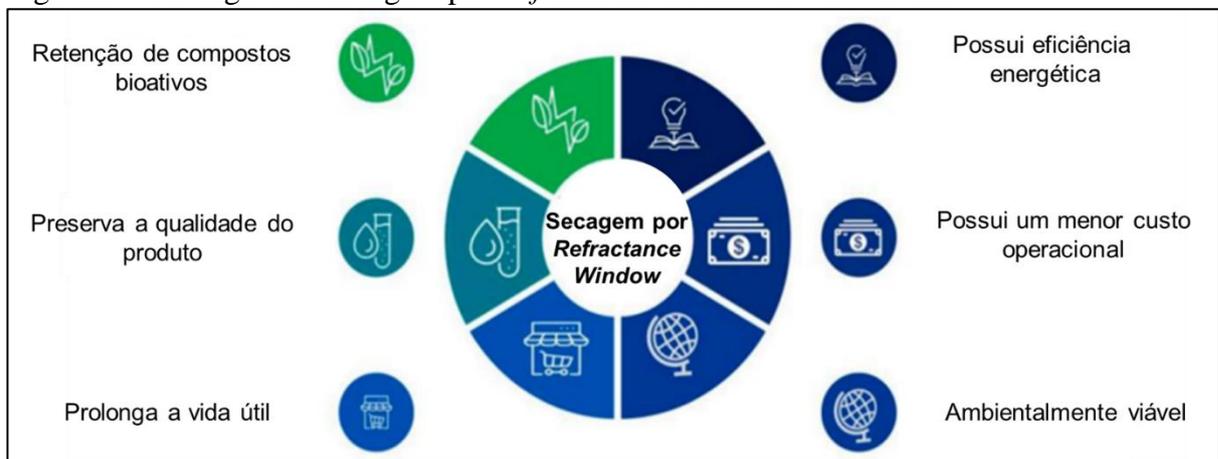


Fonte: Ning e Tang (2007).

No equipamento, a água em alta temperatura transfere a energia térmica por convecção (da água para a esteira) e por condução (da esteira para o alimento), tais modos estão predominantemente presentes na transferência de calor, que concede energia necessária para a secagem do alimento. Por outro lado, pode ocorrer a transferência por radiação na esteira ao alimento, no entanto, esta atividade é muito baixa (Waghmare, 2021; Zotarelli *et al.*, 2017). O processo de secagem por RW é autônomo, ou seja, a temperatura reduzida da amostra no decorrer da secagem é provocada pelo resfriamento evaporativo na superfície do alimento. Em baixa temperatura, as características sensoriais e nutricionais, que são sensíveis ao calor, podem ser mantidas no produto seco, afinal, o vapor saturado limita a interação da amostra e do oxigênio (Puente *et al.*, 2020), a utilização da secagem por RW pode ser aplicado em diversos produtos alimentícios (Waghmare, 2021), como no Camarão-da-Amazônia.

Quem encerra o processo é o calor conduzido, em que, por meio da redução da transferência de calor contribui para a retenção das características da amostra. A umidade é retirada pelo ar que circula na superfície do material e/ou devido ao sistema de exaustão (Bernaert *et al.*, 2019; Ortiz-Jerez; Ochoa-Martinez, 2015). Como mencionado anteriormente, ao utilizar água quente para a redução da umidade, o método pode ser considerado como uma “secagem suave”, pois a temperatura da amostra não ultrapassa 80°C (Puente *et al.*, 2020). Conforme Waghmare (2021, p. 654), as principais vantagens que norteiam o uso do RW para a secagem de alimentos são: a retenção de compostos bioativos; preservação da qualidade e o aumento da vida útil do produto; eficiência energética; menor custo operacional e; é ambientalmente viável (Figura 5).

Figura 5 – Vantagens da secagem por *Refractance Window* em alimentos



Fonte: Adaptado de Waghmare (2021).

Após a secagem em RW, a textura é um fator determinante para a qualidade de um produto alimentício, sobretudo em relação à aceitabilidade por parte do público consumidor. Segundo apontam os estudos, o RW apresenta uma melhor eficácia em alimentos pastosos e líquidos, do que em pedaços de frutas e hortaliças (Waghmare, 2021). A temperatura e a taxa de secagem detêm influência sobre a textura de alimentos, em que a umidade presente na superfície carrega solutos do alimento e gera tensão na estrutura, a depender do tipo da amostra, da composição e das condições da secagem, alterações estruturais que refletem na textura final da amostra seca (Guiné, 2018).

Diversos estudos têm realizado secagens com a utilização do RW (Bernaert *et al.*, 2019; Ortiz-Jerez; Ochoa-Martinez, 2015; Puente *et al.*, 2020). A técnica promove inúmeras melhorias e acarreta em benefícios aos alimentos submetidos a secagem (Waghmare, 2021). Apesar do método possuir várias vantagens, algumas limitações não podem passar despercebidas, onde a maior delas é a necessidade de uma superfície plástica de correia com maior área, para que uma maior quantidade de amostras possa passar pela secagem. Além disso, deve haver atenção para a correta e recorrente higienização do equipamento (Guiné, 2018). Outras limitações do RW podem ser citadas, quais sejam: a não operação em altas temperaturas e a não manipulação de pó com alta concentração de açúcares, em razão da alta viscosidade (Karadbhajne *et al.*, 2019). É de suma importância a aplicação deste método em uma variedade maior de alimentos, a fim de promover e difundir a técnica.

Em amostras secas por RW há uma menor retração, o que configura em estruturas mais porosas. Ademais, a firmeza do alimento está atrelada ao método da secagem, como comprovado pela pesquisa de Jafari *et al.* (2016), ao compararem amostras de kiwi secas tradicionalmente e por RW sob temperaturas de 80, 90 e 100°C, em que todas as amostras que passaram por secagem em RW apresentaram melhor textura. Por outro lado, Franco *et al.* (2019), estudaram o comportamento de difusão, de textura e de cor em RW, e os dados mostraram que, para a maçã, houve uma redução de 50% no tempo de secagem, para o pescado, houve redução na firmeza, e para a carne bovina houve alteração na coloração. Por mais que não obteve-se resultados positivos, devido às alterações nas características sensoriais, os autores apontaram a necessidade da aplicação da metodologia em outros tipos de alimentos, com o intuito de aprimorar a metodologia e explorá-la de forma mais ampla (Franco *et al.*, 2019).

3.5 Modelagem matemática de secagem

Os modelos matemáticos apresentam-se úteis, seja para novos projetos e/ou para aprimorar os sistemas de secagem e análise dos fenômenos de transferência de massa no decorrer do processo. Os modelos matemáticos apresentam-se úteis, seja para novos projetos e/ou para aprimorar os sistemas de secagem e análise dos fenômenos de transferência de massa no decorrer do processo de secagem já estabelecidos (Davila, 2016). Um controle ótimo para um processo de secagem é crítico, o qual precisa de informações completas acerca da secagem, ou seja, torna-se necessário um modelo preciso, que seja capaz de prever as taxas da remoção de água e que consiga descrever o comportamento do produto e a performance da secagem sob diversas condições (Ersan; Tugrul, 2021).

Para as pesquisas relacionadas à sistemas de secagem, focadas no dimensionamento, na otimização e na determinação da viabilidade da aplicação comercial com objetivo de reduzir efeitos adversos e/ou possíveis danos operacionais de secagem, torna-se necessário haver um bom conhecimento sobre os processos físicos envolvidos, atrelado a isto, diversos estudos sobre a análise de processos de secagem têm sido realizados, tais como: consideração sobre as condições externas do ar (umidade relativa e velocidade); taxa de secagem do produto a ser desidratado; considerações das condições internas do produto, enfatizando os mecanismos de movimento de umidade e os efeitos que norteiam o mesmo (Mendonça *et al.*, 2015).

Nesse sentido, a aplicação de modelos matemáticos, que simulem de forma satisfatória a perda de água no decorrer do processo de secagem de produtos alimentícios, é uma alternativa comumente utilizada para minimizar possíveis danos e custos na operação de secagem (Crank, 1975; Davila, 2016). Por várias décadas os pesquisadores têm utilizado a modelagem matemática com o intuito de predizer o processo de secagem (Adeyeye, 2019). Estes, por vezes, buscavam relacionar seus dados experimentais particulares de secagem aos modelos que, por sua vez, são divididos entre teóricos, semi teóricos, empíricos e modelos formalizados na termodinâmica dos processos irreversíveis (Ertekin; Firat, 2017).

Os estudos da cinética de secagem em alimentos, na grande maioria, são descritos por meio dos modelos matemáticos teóricos e semi teóricos. Os modelos matemáticos teóricos consideram a transferência de calor e massa e ar de secagem no interior do produto, uma vez que, quando ocorre de a resistência convectiva ser desprezível, se comparada com a resistência difusiva, pode-se considerar somente as transferências no interior da amostra (difusão) (Davila, 2016).

Sob outra perspectiva, nos modelos semi teóricos são considerados somente a resistência externa à temperatura e a umidade relativa do ar (Faria *et al.*, 2012; Ratti, 2009). Além do mais, a difusão é o modelo mais estudado entre os modelos teóricos aplicados ao processo de secagem, tendo em vista que este considera, como principal mecanismo, a difusão baseando-se na segunda Lei de Fick (Equação 1), a qual estabelece uma relação entre a taxa de variação temporal e espacial da concentração de água, mediante o coeficiente de difusão (Park; Vohnikova; Brod, 2002).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla(D_{\text{eff}}\nabla X) \quad (1)$$

Os modelos que utilizam a teoria da difusão são capazes de descrever o perfil da distribuição de água no interior de um determinado alimento, desde que se consiga correlacionar a sua forma à geometria de um sólido perfeito, tal como, a exigência de estabelecer uma relação funcional do coeficiente de difusão, do teor de umidade e da temperatura. John Crank, em 1975, desenvolveu diversas soluções partindo da segunda Lei de Fick para as condições de contorno e iniciais variadas, no entanto, estas soluções ficam restritas a materiais de forma geométrica simples (placas, cilindros, cubos, esferas). Além disso, os modelos de Crank assumem algumas hipóteses, como a ínfima redução no volume de sólidos, a difusividade constante ou a variação linear do decorrer do processo de secagem (Crank, 1975). A solução truncada da segunda Lei de Fick, desenvolvida por Crank (1975) pode ser expressa pela Equação 2.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 X}{\partial y^2} + \frac{m}{y} \frac{\partial X}{\partial y} \right) \quad (2)$$

A equação anterior pode ser descrita como: “y” é a distância de um ponto do centro do sólido, e a constante “m”, por sua vez, corresponde ao valor de 0, em caso de placa plana, e o valor de 1 para as formas cilíndricas e esféricas (Crank, 1975). Nesse modo, a Tabela 1 contém as soluções analíticas da segunda Lei de Fick para a placa plana, para cilindro infinito e para a esfera.

Tabela 1 – Modelos teóricos aplicados na modelagem da cinética de secagem

Solução analítica da segunda Lei de Fick	Geometria	Equação
$\frac{X_t - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{L^2}\right)$	Placa plana	(3)
$\frac{X_t - X_e}{X_o - X_e} = 4 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2} \exp\left(- \frac{\mu_n^2 D_{eff} t}{R_p^2}\right)$	Cilindro infinito	(4)
$\frac{X_t - X_e}{X_o - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(- n^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{R_p^2}\right)$	Esfera	(5)

D_{eff} : coeficiente de difusão efetiva de massa ($m^2.s^{-1}$); X_t : umidade média do sólido no instante t , em base seca (kg água/ kg sólido seco); X_o e X_e : umidades inicial e de equilíbrio do sólido em base seca (kg água/ kg sólido seco); L : espessura da camada (m); R_p : raio da partícula esférica ou cilíndrica (m) e; μ_n : raízes das funções.

Fonte: Crank (1975).

É interessante mencionar que, com o uso do modelo da difusão, é possível determinar as principais propriedades termodinâmicas que estão envolvidas no fenômeno da desidratação, como a entalpia, a entropia e a energia livre (Nadi; Tzempelikos, 2018). O conhecimento sobre as propriedades termodinâmicas da secagem é a principal fonte de informação para projetar equipamentos, realizar cálculo da energia requerida pelo processo, estudar propriedades da água adsorvida e, também, avaliar a microestrutura do alimento, assim como para o estudo dos fenômenos físicos que acontecem na superfície desses alimentos (Mendonça *et al.*, 2015).

Os modelos semi-teóricos baseiam-se na Lei de Newton para o resfriamento, em que é aplicada à transferência de massa. Essa lei, ao ser utilizada, pode presumir que as condições são isotérmicas e que a resistência à transferência de umidade fique restrita à superfície (Ertekin; Firat, 2017). Nesse sentido, os modelos semi-teóricos são comumente utilizados no processo de secagem em camada delgada, esta refere-se ao processo que o material a ser seco é exposto ao ar que se move através dele. A Lei de Newton (Equação 6) é utilizada para representar a taxa de variação da temperatura de um corpo circulado por um fluido sob uma temperatura constante (Ratti, 2009).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\xi(\theta - \theta_e) \quad (6)$$

Na Equação 6, o ξ é a constante de resfriamento ou aquecimento ($m^2.s^{-1}$), o θ (K) é a temperatura do alimento em qualquer tempo (t) e o θ_e (K) é a temperatura do meio em que o produto está envolvido. Esta é uma equação diferencial linear de primeira ordem, em que a

solução pode ser obtida por meio da separação de variáveis e pela posterior integração, que resulta a equação exponencial apresentada a seguir.

$$\int_{\theta_e}^{\theta} \frac{d\theta}{(\theta - \theta_e)} = \int_{t_0}^t -\xi dt \quad (7)$$

$$\frac{(\theta - \theta_e)}{(\theta_0 - \theta_e)} = \exp(-\xi dt) \quad (8)$$

Os modelos semi-teóricos são bastante utilizados para analisar curvas de secagem de matrizes sólidas. Na tabela 2 são listados alguns desses modelos matemáticos a com grande aplicação na área de alimentos.

Tabela 2 – Modelos semi-teóricos aplicados na modelagem da cinética de secagem

Modelos	Equação	Referências
$M_R = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-kt^N)$	Modelo de Page (9)	Adeyeye (2019).
$M_R = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-kt)$	Modelo de Lewis (10)	Mghazli <i>et al.</i> (2017)
$M_R = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = a \cdot \exp(-kt)$	Modelo de Henderson-Pabis (11)	Henderson e Pabis (1961)
$M_R = \exp(n + kt)$	Modelo de Peleg (12)	Ertekin e Firat (2017)

MR: razão de umidade adimensional; k, k1 e k2: constantes de velocidade de secagem (s^{-1} , m^{-1} , h^{-1}); N: constantes do modelo.

Fonte: Organizado pelo autor (2023).

3.6 Propriedades termodinâmicas da secagem

A termodinâmica é uma abordagem utilizada na compreensão das propriedades da água e do cálculo dos requisitos de energia, relacionados ao calor e a transferência de massa nos sistemas biológicos, como os alimentos. Algumas propriedades termodinâmicas são usadas ao analisar o comportamento da secagem dos sistemas biológicos, como a entalpia, a entropia e a energia livre de Gibbs (Araújo *et al.*, 2017).

A mudança de entalpia fornece a medida de variação de energia, quando ocorre a interação das moléculas de água com os constituintes do produto, durante o método de secagem. A entropia pode estar relacionada à ligação ou repulsão das forças no sistema e, também, ao

arranjo espacial da relação água-produto. Dessa forma, a entropia caracteriza e/ou define o grau da ordem ou desordem que existe no sistema água-produto (McMinn; Al-Muhtaseb; Magee, 2005).

A energia livre de Gibbs avalia a afinidade entre o produto e a água, a qual pode indicar a espontaneidade da saída de água do produto durante o processo de secagem. Ao ser positiva, indica a não espontaneidade do método e, quando negativa, é capaz de indicar que o fenômeno ocorreu de forma espontânea (Araújo *et al.*, 2017).

As principais propriedades termodinâmicas vinculadas aos fenômenos da desidratação, como a entalpia, a entropia e a energia livre de Gibbs, podem ser determinadas a partir da aplicação dos modelos matemáticos (Araújo *et al.*, 2017). Por esse motivo a importância do conhecimento acerca das propriedades termodinâmicas presentes na secagem, as quais podem ser fonte de informação para o projeto de equipamentos, para o cálculo da energia requerida durante o processo, para investigar as propriedades de adsorção da água, assim como, para avaliar a microestrutura e para estudar os fenômenos físicos ocorrentes na superfície do alimento seco (Davila, 2016).

A literatura especializada conta com inúmeras pesquisas sobre a secagem de produtos alimentícios de origem vegetal (Bernaert *et al.*, 2019; Ortiz-Jerez; Ochoa-Martinez, 2015; Puente *et al.*, 2020). No entanto, na literatura consultada, não foram encontradas referências sobre a cinética de secagem do músculo de pescados originários do bioma amazônico em camada delgada, com a aplicação da secagem por RW associada ao pré-tratamento com etanol, assim como, pesquisas sobre modelagem matemática quanto as propriedades termodinâmicas utilizando os dados experimentais da secagem por RW.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

A matéria-prima (Camarão-da-Amazônia – *Macrobrachium amazonicum*) foi obtida no Mercado Público de Icoaraci, Distrito de Belém, Pará, em maio de 2023. As amostras foram inseridas em caixas isotérmicas, cobertas por gelo em escama e direcionadas para o Laboratório de Medidas Físicas (LAMEFI) da Faculdade de Engenharia de Alimentos (FEA), da Universidade Federal do Pará (UFPA), onde foram classificadas e armazenadas sob congelamento em *freezer* à temperatura de -20°C, até que fossem realizados os respectivos experimentos.

4.2 Métodos

4.2.1 Pré-tratamento com etanol

Para o pré-tratamento, com as amostras ainda congeladas (para evitar a degradação e consequente perda de água antes do pré-tratamento), retirou-se o cefalotórax e a casca das amostras de camarão para obter apenas o abdômen (parte de interesse do experimento), deixando-o em formato cilíndrico. Posteriormente, as amostras foram divididas entre os respectivos tratamentos (quatro unidades de camarão para cada): sem pré-tratamento (SPT); agitação mecânica (AG); e ultrassom (US). Após, realizou-se a pesagem da massa total (M_T) das amostras.

Nos pré-tratamentos AG e US, as amostras foram introduzidas em béqueres de 100mL, preenchidos com solução de EtOH 100% na proporção de 1:18 (peso da amostra/volume de solução de etanol). Cada pré-tratamento teve duração de 10 minutos. As Figuras 6 e 7 ilustram essas etapas. É importante destacar que a metodologia aplicada nestas ações foi baseada nas pesquisas de Cunha *et al.* (2020) e Junqueira *et al.* (2021), com algumas modificações.

Figura 6 – Pré-tratamento com EtOH 100% em agitador mecânico (AG)



Fonte: Registro do autor (2022).

Figura 7 – Pré-tratamento com EtOH 100% em ultrassom (US)



Fonte: Registro do autor (2022).

Para quantificar a perda de água após a aplicação dos pré-tratamentos nas amostras, ao fim do período de 10 minutos, foram levemente secas em papel absorvente (papel toalha) para posteriormente serem pesadas individualmente (M_i) e, em seguida, submetidas a secagem por RW. Para o cálculo do percentual de umidade removida utilizou-se a Equação 13.

$$PH_2O (\%) = \frac{M_T - M_i}{M_T} \quad (13)$$

Onde:

PH_2O (%): Percentual de umidade removida;

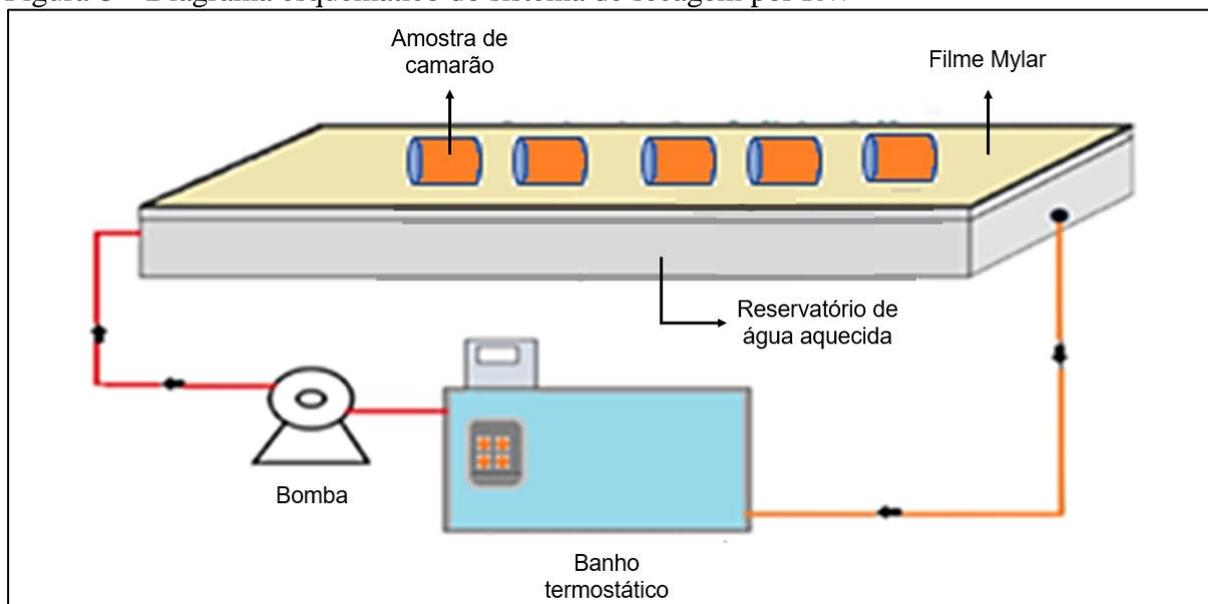
M_i : Massa da amostra após pré-tratamento;

M_T : Massa da amostra antes do pré-tratamento.

4.2.2 Secagem por *Refractance window*

O equipamento operado em laboratório, em escala de batelada, foi construído usando o mesmo princípio descrito por Castoldi *et al.* (2015), com modificações. O secador (Figura 8), consiste em um recipiente metálico (0,9 x 0,15 x 0,10 m) com circulação de água quente a partir de um banho termostático (Quimis, Q214M2, Brasil), de um controlador digital de temperatura PID (Minipa, MT 1044, Brasil) e de um filme de Mylar com espessura de 0,20 mm (DuPont, tipo D, EUA). O filme de mylar foi preso ao topo do recipiente metálico.

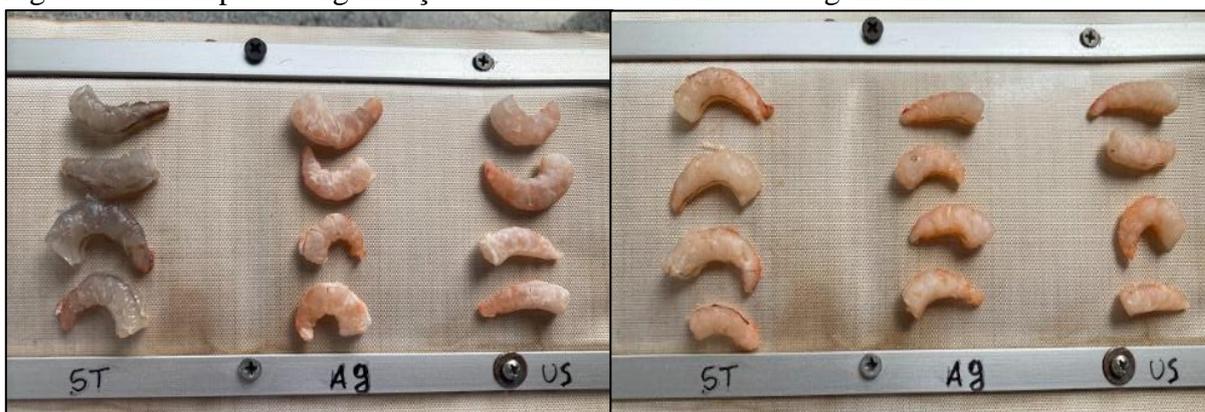
Figura 8 – Diagrama esquemático do sistema de secagem por RW



Fonte: Adaptado pelo autor (2023).

Foi utilizado termômetro infravermelho (Infrared Thermometer B-MAX, China) para monitoramento da temperatura durante o processo. As temperaturas usadas durante a secagem foram 50, 70 e 90 °C. Para a secagem do camarão na forma cilíndrica, as amostras foram depositadas sobre a superfície do filme de Mylar (Figura 9). É importante mencionar que as amostras SPT com etanol foram, também, submetidas ao processo de secagem por RW.

Figura 9 – Exemplo da organização das amostras durante a secagem em RW



Fonte: Registro do autor (2022).

A determinação do teor de água ao longo do processo realizada por gravimetria, pesando-se as amostras em intervalo crescente de tempo, como o auxílio de uma balança semi-analítica (Shimadzu/Marte, UW-620H, Japão), com precisão de ± 0.001 g. A finalização da secagem ocorreu após as amostras atingirem um equilíbrio no teor de água, ou seja, a estabilização da massa das amostras.

A umidade inicial (U_i) e a umidade de final (U_f) das amostras foram determinadas a partir da metodologia 934.06 da Association of Official Analytical Chemistry (AOAC, 1990). Para tal, utilizou-se uma estufa a vácuo (Marconi, MA030, Brasil) e uma balança analítica (Shimadzu AY220, Japão) com precisão de ± 0.0001 g.

Para mais, o Quadro 3 apresenta as codificações das amostras pré-tratadas com etanol e as amostras não tratadas com etanol, as quais foram submetidas ao processo de secagem por RW nas diferentes temperaturas.

Quadro 3 – Codificação das amostras submetidas à secagem por RW

Codificação	Amostra
ASPT	Abdômen do <i>Macrobrachium amazonicum</i> sem pré-tratamento.
PTAG	Abdômen do <i>Macrobrachium amazonicum</i> com pré-tratamento assistido por agitação mecânica e EtOH 100%.
PTUS	Abdômen do <i>Macrobrachium amazonicum</i> com pré-tratamento assistido por ultrassom e EtOH 100%.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.2.3 Modelagem matemática

Neste estudo, conforme mencionado anteriormente, efetuou-se o ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem do Camarão-da-Amazônia. Neste contexto, a seguir, são apresentadas as condições fenomenológicas envolvidas e assumidas como condições associadas ao desenvolvimento matemático, que visa a obtenção da solução analítica de cada modelo.

É importante salientar que na modelagem matemática, em matrizes alimentícias, na busca por descrever o processo de redução/diminuição de umidade durante o processo de secagem, comumente assume-se que a migração do teor de água é governada, periodicamente, por meio do mecanismo de difusão. Nesse sentido, ao aplicar esse mecanismo, é habitual a adoção de de uma série de suposições, a exemplo: I) “as propriedades termofísicas do sólido e do meio de secagem são constantes”; II) “o efeito da transferência de calor na perda de umidade é insignificante”; III) “a difusão de umidade ocorre em uma direção (perpendicular à superfície) e; IV) “existem resistências internas e externas finitas à transferência de umidade dentro dos produtos (referindo-se a $0,1 < \text{Biot efetivo de massa (Bim)} < 100$). Nestas condições, em um processo de secagem, a equação da difusão em um sólido em que a geometria se aproxime a de um cilindro infinito pode ser descrita conforme a Equação 14 (Tripathy; Kumar, 2009).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_m \frac{1}{r} \frac{\partial X}{\partial r} \left(\frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (14)$$

Ao considerar a difusividade efetiva de massa (D_m) constante, em que o teor de U_i esteja distribuído na amostra uniformemente e que o gradiente de umidade seja simétrico em torno da amostra, as condições de contorno, de simetria central e de limite convectivo na superfície da amostra podem ser expressas, respectivamente, por meio das equações a seguir:

$$X(r, 0) = X_o = \text{"Cte"} \quad (15)$$

$$\left[\frac{\partial X}{\partial r} (0, t) \right] = 0 \quad (16)$$

$$-D_m \left(\frac{\partial X}{\partial r} (R, t) \right) = k_m [X(R, t) - X_\infty] \quad (17)$$

Onde:

X_o : Umidade inicial;

X_∞ : Umidade do ar circundante;
 R: Raio do cilindro;
 r e t: As coordenadas de espaço e tempo, respectivamente;
 k_m e D_m : Representam os coeficientes de transferência de massa convectiva e difusão efetiva de umidade do produto, respectivamente.

Destaca-se, também, que a solução da Equação 14 como o teor médio de umidade pode ser representado em termos de teor de umidade adimensional (Φ) dado como (Equação 18):

$$\Phi = \frac{\bar{X}(t) - X_e}{X_o - X_e} \quad (18)$$

Onde:

$\bar{x}(t)$: Teor de umidade;

X_e : Umidade de equilíbrio.

4.2.3.1 Modelo matemático de Dincer & Dost

Conforme Dincer & Dost, a solução guiada pela Equação 14 com as condições de contorno (Equações 15, 16 e 17), em termos de distribuição de umidade central adimensional para amostras em formato cilíndrico (Dincer; Dost, 1995, 1996), pode ser expressa por:

$$\Phi = \sum_{n=1}^{\infty} A_n * B_n \quad (19)$$

A solução da Equação 19 pode ser simplificada quando número de Fourier for maior que 0,2 ($Fo > 0,2$). Dessa forma, as soluções de séries infinitas podem ser aproximadas pelo primeiro termo da série (Dincer; Dost, 1995), tal como:

$$\Phi \cong A_1 B_1 \quad (20)$$

Cabe mencionar que durante a secagem das amostras, a cinética do processo de remoção de umidade apresenta um comportamento com tendência exponencial decrescente. Assim, Dincer & Dost (1996), propuseram que os valores do conteúdo de umidade adimensional com o tempo pudessem ser expressos por um modelo exponencial, como mostra a Equação 21:

$$\Phi = G \exp(-St) \quad (21)$$

O parâmetro “G” (adimensional) é capaz de indicar a resistência interna à transferência de umidade. Por sua vez, o parâmetro “S” é a representação do coeficiente de secagem, o qual mostra a “capacidade de secagem de um objeto ou produto por unidade de tempo” (Santos, 2020, p. 39). Com base nisso, esses parâmetros são estimados através do ajuste da Equação 21 aos dados experimentais da cinética de secagem do camarão-da-Amazônia.

Matematicamente as Equações 20 e 21 estão na mesma forma e podem ser equacionadas. Portanto, tendo $A1=G$ e, ao substituí-lo na Equação 22, é possível quantificar o valor de μ_1 (a primeira raiz transcendental). Para uma geometria em formato cilíndrico, pode-se apresentar conforme a Equação 22 (Dincer; Hussain, 2004). Cabe mencionar que a primeira raiz da transcendental busca resolver modelos matemáticos que descrevam a cinética de secagem de materiais. À vista disso, está a importância de obter esse parâmetro, o qual relaciona-se à sua ligação com a taxa de secagem e às propriedades do material estudado (Dincer; Hussain, 2004).

$$\mu_1 = -3.477G^4 + 25.285G^3 - 68.43G^2 + 82.468G \quad (22)$$

No entanto, a partir das determinações, a quantificação da difusividade efetiva de massa (D_m), número de Biot (B_i) e o coeficiente de transferência de massa (k_m) podem ser estimados pelas equações a baixo, respectivamente (Dincer; Hussain 2004):

$$D_m = \frac{SR^2}{\mu_1^2} \quad (23)$$

$$B_i = 0.0576G^{26.7} \quad (24)$$

$$k_m = \frac{D_m B_i}{R} \quad (25)$$

Onde:

R: Raio do cilindro.

4.2.3.2 Modelo matemático de Crank

Neste estudo testou-se, também, a solução analítica da Equação 14, a qual foi proposta por Crank (1975) para a modelagem matemática da secagem. De acordo com as suposições de Crank, de que a transferência de massa ocorre apenas por difusão, com o coeficiente de difusão constante, com os efeitos de resistência externa desprezíveis e sem encolhimento. Nessa direção, tendo em vista o formato cilíndrico, em que o teor de U_I esteja distribuído na amostra uniformemente, que o gradiente seja simétrico em torno do centro da amostra e que as condições de contorno estejam expressas por meio das Equações 15, 16 e 17, logo, a solução analítica da Equação 14 pode ser expressa como (Crank, 1975):

$$\Phi = \frac{\bar{X}(t) - X_e}{X_o - X_e} = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n^2} \exp\left(-\frac{\lambda_n^2 D_m}{R^2} t\right) \quad (26)$$

Na Equação 26, λ_n é a n ésima raiz positiva de $J_0(\lambda_n) = 0$. Ademais, $J_0(x)$ é a função de Bessel de primeiro tipo de ordem zero. Assim como a Equação 19, soluções de séries infinitas da Equação 26 podem ser aproximadas pelo primeiro termo da série, ou seja, o número finito de termos ($n=1$). Ao assumir essa condição do truncamento no primeiro termo da série, obtêm-se a Equação 26 na seguinte forma:

$$\Phi = \frac{4}{\lambda_1^2} \exp\left(-\frac{\lambda_1^2 D_m}{R^2} t\right) \quad (27)$$

4.2.3.3 Modelagem matemática de Motta Lima e Massarani

Neste estudo, testou-se, também, a solução proposta por Motta Lima e Massarani (1996), com modificações. Ademais, os autores propuseram um modelo para calcular o coeficiente global de transferência de massa, a partir de um balanço de massa de água na matriz, a saber:

$$\begin{bmatrix} \text{Acúmo de} \\ \text{Massa no} \\ \text{Sistema} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Entrada de} \\ \text{Massa no} \\ \text{Sistema} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Saída de} \\ \text{Massa do} \\ \text{Sistema} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Geração de} \\ \text{Massa no} \\ \text{Sistema} \end{bmatrix}$$

De forma a simplificar o balanço de massa para o processo de Motta Lima e Massarani (1996), não se considera a entrada de massa de água na matriz sólida, isto significa que, admite-se que o ar está distante da condição de saturação, para que haja uma condensação de água seguida de uma umidificação da matriz. Além do mais, em associação com a hipótese anterior, não se considera, também, que não ocorrem reações químicas no sistema de secagem, por meio da transferência de massa, logo, não há geração de água no produto. Dessa forma, pode-se resumir o balanço de massa como:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Acúmo de} \\ \text{Massa no} \\ \text{Sistema} \end{array} \right] = - \left[\begin{array}{c} \text{Saída de} \\ \text{Massa do} \\ \text{Sistema} \end{array} \right]$$

No método de secagem o acúmulo de massa de água no sistema é resultado da variação de massa de água com o tempo. Por outro lado, pode-se calcular a saída da massa de água do sistema por meio do produto obtido entre o fluxo mássico de água que deixa o sistema e a área superficial da matriz sólida, conforme a representação na Equação 28.

$$\frac{dM_{H_2O}}{dt} = -N_{H_2O}A_{Supf} \quad (28)$$

Onde:

A: Área superficial da matriz sólida;

N: Fluxo mássico de água removido do sistema (g/s).

Conforme Motta Lima e Massarani (1996), o fluxo mássico pode ser quantificado pela Equação 29.

$$N_{H_2O} = ks(W - W_e) \quad (29)$$

Onde:

W: Teor de umidade (base seca) em qualquer momento;

W_e : Teor de umidade de equilíbrio (base seca);

ks: Coeficiente global de transferência de massa.

Substituindo as Equações 28 e 29, se obtêm a Equação 30, que classicamente representa a primeira Lei de Fick.

$$\frac{dM_{H_2O}}{dt} = -ksA_{Supf}(W - W_e) \quad (30)$$

Conforme a definição de umidade em base seca, definida pelo teor de umidade do sólido úmido, dado pela relação de massa de água pela massa do sólido seco ($M_{Sol.Seco}$), pode-ser representar matematicamente pela Equação 31.

$$M_{H_2O} = W * M_{Sol.Seco} \quad (31)$$

Ao substituir a Equação 31 no primeiro termo da Equação 30, têm-se a Equação 32:

$$\frac{d(W * M_{Sol.Seco})}{dt} = -ksA_{Supf}(W - W_e) \quad (32)$$

A Equação 32 pode ser reescrita algebricamente, uma vez que não ocorre variação na massa do sólido seco com o tempo de secagem, logo, a massa de sólido seco é constante ao longo do processo de secagem. Assim, obtêm-se:

$$\frac{dW}{dt} = -\frac{ksA_{Supf}}{M_{Sol.Seco}}(W - W_e) \quad (33)$$

A área superficial da matriz sólida, durante o processo, sofre alterações (encolhimento), o que dificulta sua medição. Dessa forma, pode assumir a variável K dada por:

$$K = \frac{ksA_{Supf}}{M_{Sol.Seco}} \quad (34)$$

Onde:

K: constante de taxa de secagem por unidade de tempo.

Substituindo a Equação 34 na Equação 33, se obtém (Equação 35):

$$\frac{dW}{dt} = -K(W - W_e) \quad (35)$$

De acordo com Motta Lima e Massarani (1996), o modelo (Equação 35) é equivalente à Lei de Newton, para o resfriamento. Os autores apontam, também, que o modelo pode ser resolvido analiticamente. Desse modo, no caso de o valor de K apresentar-se constante e o intervalo de variação de umidade da matriz sólida para a temperatura seja conhecido, pode integralizar a equação do modelo, a qual resulta (Equação 36):

$$\frac{(W - W_e)}{(W_o - W_e)} = \exp(-Kt) \quad (36)$$

Contudo, Sogi *et al.* (2003) citam que, comumente, o modelo descrito na Equação 36 não dispõem de uma simulação precisa das curvas de secagem, para diversos produtos alimentícios, o qual subestima o início da curva de secagem e, por outro lado, superestima os estágios seguintes. Porém, Simpson *et al.* (2017) reportam que essa diferença foi minimizada pelo postulado feito por Page, o qual objetiva melhorar o ajuste aos dados experimentais com uma modificação empírica para o termo de tempo, com a introdução de um expoente “n”, o qual obtém-se:

$$\frac{(W - W_e)}{(W_o - W_e)} = \exp(-Kt^n) \quad (37)$$

Cabe mencionar que no manuscrito de Page não há explicação ou justificativa para a inclusão de um expoente diferente de um ao longo do tempo. No entanto, Motta Lima e Massarani (1996), com intuito de quantificar a influência da temperatura na secagem de superfícies, propõem uma solução analítica da Equação 37, com modificações, por analogia a correlação do tipo Arrhenius dada na seguinte forma:

$$\Phi = \exp \left[-k_1 \exp \left(\frac{-E_1}{T_{Sec}} \right) t^n \right] \quad (38)$$

4.2.4 Propriedades termodinâmicas

Conforme já mencionado, o conhecimento dos fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos alimentos durante a redução do teor de água é importante no desenvolvimento e aprimoramento de equipamentos de secagem, bem como, utilizam-se modelos matemáticos que possam representar satisfatoriamente a perda de água durante o processo de secagem. Atrelado a isso, é importante destacar que o conhecimento sobre as propriedades termodinâmicas nas etapas de secagem também é uma importante fonte de informação para projetar secadores, calcular a energia requerida na etapa, estudar as propriedades da água adsorvida, avaliar a microestrutura dos alimentos e estudar os fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos alimentos.

Com a utilização do modelo de difusão é possível determinar as principais propriedades termodinâmicas que estão envolvidas no processo de secagem, tais como: a entalpia, entropia e energia livre de Gibbs. Neste contexto, a fim de avaliar a dependência da Difusividade de massa (D_m) com a temperatura, neste estudo, utilizou-se a equação de Arrhenius, representada matematicamente na forma:

$$D_m = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{T_{abs}R}\right) \quad (39)$$

Onde:

E_a : Energia de ativação;

D_o : Valor da difusividade para o teor infinito de umidade;

R : representação da constante universal de gás;

T_{abs} : Temperatura absoluta.

Ao delinear o diagrama $\ln(D_m)$ vs. $1/T_{abs}$, os coeficientes E_a e D_o podem, de forma subsequente, ser relacionados às condições de secagem do ar, mediante às técnicas de análise de regressão linear.

Para determinar as propriedades termodinâmicas entalpia (ΔH), entropia (ΔS) e energia livre de Gibbs (ΔG) associadas ao processo de transferência de massa pela secagem do camarão por RW, utilizou-se o método criado por Jideani e Mpotokwana (2009), com a aplicação das equações a seguir.

$$\Delta H = E_a - RT_{\text{abs}} \quad (40)$$

$$\Delta S = R \left(\ln D_o - \ln \frac{k_B}{h_p} - \ln T_{\text{abs}} \right) \quad (41)$$

$$\Delta G = \Delta H - \Delta S * T_{\text{abs}} \quad (42)$$

Onde:

k_B : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{J.K}^{-1}$);

h_p : constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34} \text{J.s.}$).

4.2.5 Análise estatística

As análises foram realizadas em duplicata. Foi utilizada a análise de variância (ANOVA) fator único nos resultados e o teste de Tukey a 5% de probabilidade. Ademais, os parâmetros dos modelos matemáticos de Crank, de Motta Lima e Massarani e de Dincer & Dost, além da equação de Arrhenius foram estimados por meio do *Software Origin 2023* (OriginLab Corporation, 2023, Northampton, MA, EUA). Por fim, a qualidade do ajuste obtida pelos modelos propostos para os dados experimentais da cinética de secagem (CS), foi estimada pelo coeficiente de variação (R^2) e pelo parâmetro Chi-quadrado (X^2), com o auxílio do *Software Statistica for Windows 7.0* (StatSoft Inc., Tulsa, OK, EUA).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação da umidade do camarão seco por *Refractance window*

A média do conteúdo da umidade inicial das amostras de camarão *in natura* foi de 78,03 \pm 0,11% (b. u.). Os conteúdos de umidade do produto seco submetido as diferentes temperaturas de secagem (50, 70 e 90°C) e pré-tratamentos com etanol assistido por agitação mecânica (AG) e ultrassom (US), variaram de 30,83 \pm 0,02 a 11,86 \pm 1,59% (b. u.), como mostra os dados apresentados na Tabela 3. Além disso, afim de quantificar o percentual de redução em massa, pela aplicação dos pré-tratamentos, efetuou-se um balanço de massa, em que foi considerado o processo descontínuo, sem reação e, como referência, utilizou-se a massa da amostra que não foi sujeita a pré-tratamento (SPT). O resultado dessa ação indicou que a aplicação do PTAG proporcionou uma redução de 19,77% enquanto que, com aplicação do PTUS, a redução foi de 21,84%.

Comportamentos semelhantes foram observados por Cunha *et al.* (2020) na secagem convectiva de melão pré-tratado com etanol assistido por ultrassom e por vácuo. Tal redução associa-se com as alterações estruturais da parede celular, mecanismos físicos proporcionados pelo efeito Marangoni (transferência de massa ocasionada pelo gradiente de tensão superficial entre dois líquidos de tensão superficial diferentes) e saída de ar intracelular que intensificam e potencializam a liberação de água (Rojas; Augusto; Cárcel, 2020). É possível creditar a este resultado, como decorrência da aplicação do pré-tratamento com EtOH, a desnaturação das proteínas, a redução da viscosidade da fração lipídica e a perda de componentes solúveis em etanol, o que favorece a redução da umidade inicial das amostras.

Foi possível observar, também, que esse efeito foi potencializado no pré-tratamento assistido por US, isto pode estar atribuído à alteração da camada limite entre o músculo do camarão, o meio líquido e a formação de canais microscópicos causados pela sua aplicação, devido aos fenômenos de cavitação e ao efeito esponja, o que favorece a liberação de água ligada, induzida pela associação etanol e ultrassom (Castañeda-López *et al.*, 2021). À vista disso, esse efeito é corroborado pelos valores das umidades obtidos nas diferentes temperaturas (Tabela 3), em que, verificou-se, por meio da ANOVA fator único, a existência de efeito significativo e positivo ($p < 0.05$) nos valores do teor de umidade das amostras de camarão pré-tratadas, em relação a amostra controle (SPT), mantendo a temperatura constante.

Verificou-se, também, por meio da ANOVA fator único os teores de umidades das amostras de camarão secas por RW sob diferentes temperaturas, os resultados mostram que ASPT e PTUS apresentaram diferença significativa de $p < 0,05$, entre as suas temperaturas. Esse dado pôde ser confirmado após a aplicação do teste de Tukey para verificar a diferença das médias. Por outro lado, no que se refere às amostras PTAG, após a ANOVA, não apresentaram diferenças significativas de $p > 0,05$.

Tabela 3 – Umidade final do camarão-da-Amazônia secos em RW

Temperatura °C	Amostra		
	ASPT	PTAG	PTUS
50	30,83 ± 0,02 ^a	14,99 ± 2,50 ^a	17,57 ± 0,47 ^a
70	20,57 ± 0,07 ^b	13,41 ± 0,59 ^a	16,13 ± 0,16 ^b
90	17,72 ± 0,12 ^c	12,93 ± 0,16 ^a	11,86 ± 1,59 ^c

*Médias ± Desvio padrão das análises. As médias seguidas pela mesma letra na coluna não se diferem estatisticamente por meio do teste de Tukey ($p < 0,05$). ASPT: Amostras sem pré-tratamento com etanol; PTAG: amostras que passaram pelo pré-tratamento com etanol em agitação mecânica; PTUS: amostras que passaram pelo pré-tratamento com etanol em ultrassom.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

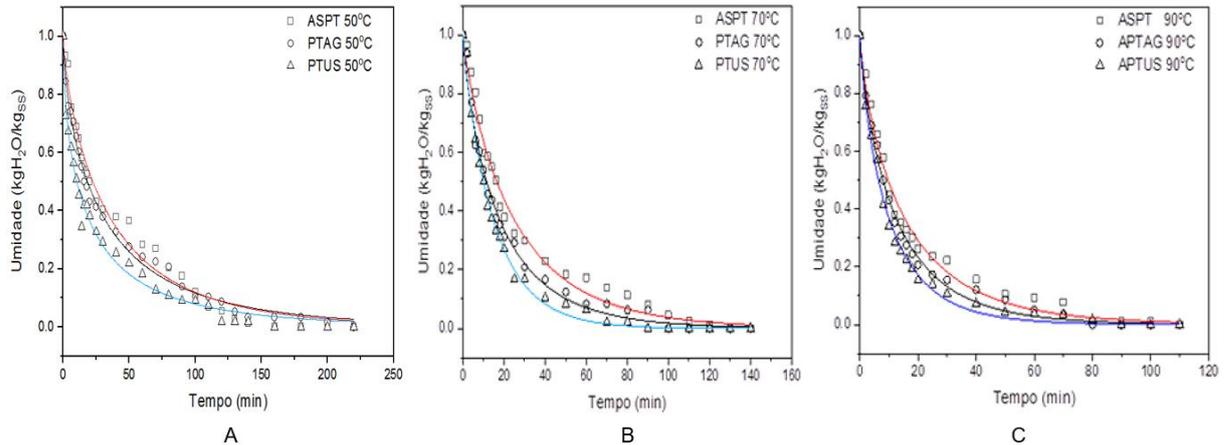
É importante destacar que no Brasil não há uma legislação voltada para os Regulamentos Técnicos de Identidade e Qualidade (RTIQ) de camarão seco, embora a Instrução Normativa 23/2019 tenha aprovado o Regulamento Técnico com os requisitos de qualidade para camarão fresco, resfriado, congelado, descongelado, parcialmente cozido e cozido (Brasil, 2019a). Nesse sentido, como exemplo de legislação voltada para pescados salgados ou secos, a Instrução Normativa SDA 15/2019 (Brasil, 2019b) pode ser utilizada como base para analisar os dados obtidos experimentalmente. Esse Instrumento Normativo exige que pescados secos por evaporação natural ou artificialmente possuam umidade máxima de 52,9%, ou seja, como observado na Tabela 3, todas as amostras de camarão secas em RW estão dentro dos padrões exigidos pelo regulamento.

5.2 Cinética de secagem

Com os dados das pesagens em intervalos regulares de tempo empregado ao sistema de secagem por RW foi possível construir as curvas experimentais de secagem (razão de umidade base seca em função do tempo de secagem) para cada tratamento. As curvas que descrevem o

comportamento da secagem do camarão com e sem processamento em diferentes temperaturas estão expressas nos gráficos da Figura 10.

Figura 10 – Cinéticas de secagem por RW das amostras de camarão a diferentes temperaturas: A) 50°C; B) 70°C; e C) 90°C



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O tempo de duração para a secagem foi: 220 min em 50°C; 140 min em 70°C; e 110 min em 90°C. Comportamento já esperado, visto que, a temperatura (T) é uma variável que influencia diretamente na velocidade de secagem, de modo que, à medida que a temperatura aumenta, há uma redução das resistências a transferência de massa, ou seja, promovem positivamente a difusão da umidade do interior da matriz sólida para o meio externo (Kudra; Mujumdar, 2009; Mujumdar, 2014; Park *et al.*, 2014; Ratti, 2009).

Os resultados gráficos das cinéticas de secagem revelaram que a mudança do conteúdo de umidade em diferentes temperaturas de secagem apresentou uma tendência similar, ou seja, um decréscimo exponencial com o tempo de secagem, tanto para as amostras SPT (Figura 10A), como também para as amostras sujeitas ao pré-tratamento nos dois sistemas empregados (AG e US) utilizando o etanol como meio líquido (Figuras 10B e 10C), com um declive acentuado nas curvas das cinéticas nos 50, 40 e 30 primeiros minutos do processo de secagem por RW, nas temperaturas de 50, 70 e 90°C, respectivamente. Após esses tempos, foi possível observar que a velocidade de remoção de umidade das amostras apresenta uma tendência de estabilidade com o tempo de secagem.

Esse comportamento é previsível e está associado ao fato de que no início do processo existe um elevado conteúdo de umidade na amostra, com a formação de um filme contínuo de água sobre o sólido, que mantém as condições de saturação da superfície. No término da secagem, grande parte do teor de umidade já foi evaporado e o conteúdo de água restante tende

a migrar do interior para a superfície da amostra, o que ocasiona a lentidão nesta etapa do processo (Kudra; Mujumdar, 2009; Mujumdar, 2014; Park *et al.*, 2014; Ratti, 2009).

Em conformidade com os dados do conteúdo de umidades (Tabela 3), previamente descritos, foi possível observar, por meio dos gráficos da Figura 10, que as curvas de secagem das amostras de camarão submetidas as diferentes temperaturas de secagem (50, 70 e 90°C) e pré-tratadas com etanol, exibiram cinéticas de perda do conteúdo de umidades superiores as amostras de camarão sem pré-tratamento. Esse fenômeno pode estar relacionado ao fato de que o etanol, ao se associar com a água livre presente na amostra, forma uma solução aquosa que apresenta pressão de vapor maior que a solução sem etanol (somente água livre), que contribui com a evaporação da água e redução do tempo de secagem (Alavi *et al.*, 2011; Braga *et al.* 2009).

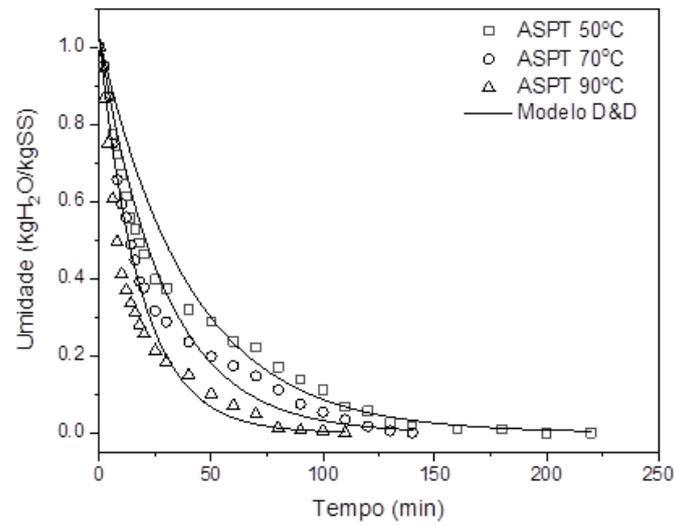
Em estudo realizado por Tatemoto *et al.* (2015), os autores associam esse comportamento com o aprimoramento da secagem, devido à aplicação do álcool, com a possibilidade do etanol ao se vaporizar precocemente de dentro da amostra para a superfície, proporcionada pela formação de canais de fluxo e poros na amostra. Esses fatores favorecem o processo de secagem durante o período de queda da taxa de secagem. Logo, em posse dessas afirmações, é possível supor que, em um processo de secagem, a presença de etanol colabora com a difusão e com a liberação do conteúdo de água para o ambiente, o que reduz o tempo de secagem e provoca um menor gasto energético na secagem das amostras de camarão.

5.3 Modelagem para predição dos parâmetros de transferência de massa

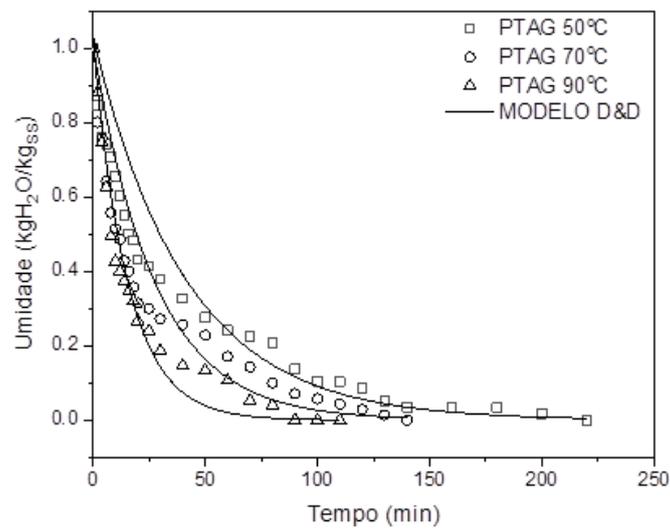
5.3.1 Modelagem matemática de Dincer & Dost

O comportamento do conteúdo de umidade adimensional com o tempo de secagem das amostras de camarão, para as três diferentes temperaturas (50, 70 e 90°C), submetidas aos dois pré-tratamentos (AG e US) com a utilização de etanol como meio líquido, assim como os valores estimados para o processo de secagem em RW após a aplicação do modelo proposto por Dincer & Dost (1996) (Equação 21), pode ser visualizado na Figura 11.

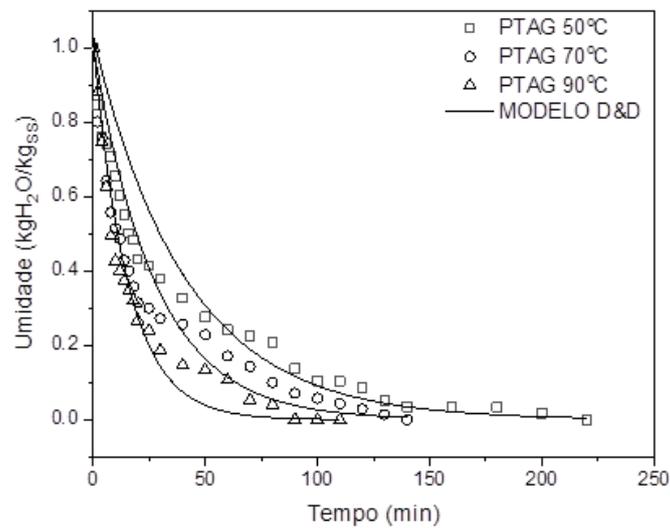
Figura 11 – Experimental e predito do conteúdo de umidade adimensional em função do tempo de secagem das amostras com o modelo de Dincer & Dost: A) ASPT; B) PTAG; e C) PTUS



A



B



C

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A qualidade do ajuste do modelo proposto por Dincer & Dost aos dados da cinética de secagem como solução analítica da equação da difusão (Equação 14) representado pela Equação 21, foi estimada por meio do coeficiente de correlação (R^2) e do parâmetro Chi-quadrado (X^2), em que empregou-se um modelo não linear. Diante disso, por meio do ajuste, foi possível quantificar os parâmetros “G” e “S”, previstos no modelo de Dincer & Dost (Equação 23), aos dados experimentais da cinética de secagem da amostra de camarão submetida a secagem por RW, com pré-tratamento e sem pré-tratamento, conforme detalhado anteriormente. Os parâmetros do modelo (G e S) e estatísticos (R^2 e X^2), são apresentados na Tabela 4.

Com base nas informações obtidas, foi possível observar que o valor “S” aumentou e o valor de “G” diminuiu com a elevação da temperatura, para ambos sistemas estudados. Comportamento semelhante a esse foi relatado na secagem convectiva de brócolis com o uso da mesma geometria (Mrkić; Ukrainczyk; Tripalo, 2007), durante a secagem convectiva de fatias de manga em diferentes estágios de maturação (Corzo; Bracho; Alvarez, 2008), na secagem de cascas de maracujá em camada delgada (Bezerra *et al.*, 2015) e na avaliação da transferência de massa e do perfil de qualidade do purê de banana (*Musa acuminata*), seca por *Refractance window* (Rajoriya; Bhavya; Hebbar, 2021).

Tabela 4 – Parâmetros do ajuste do modelo Dincer & Dost

Amostra	Temperatura (°C)	Coeficientes do Modelo		Parâmetros estatísticos	
		G	S	R^2	X^2
ASPT	50	1,042±0,16	0,025±0,002	0,9047	9,4x10 ⁻³
	70	1,030±0,11	0,035±0,003	0,9231	7,4x10 ⁻³
	90	1,019±0,08	0,070±0,003	0,9695	2,6x10 ⁻³
PTAG	50	1,030±0,13	0,024±0,002	0,8496	1,3x10 ⁻³
	70	1,009±0,03	0,036±0,004	0,8194	1,4x10 ⁻³
	90	1,021±0,12	0,065±0,003	0,9624	1,2x10 ⁻³
PTUS	50	0,989±0,04	0,027±0,003	0,8511	1,1x10 ⁻³
	70	0,973±0,06	0,041±0,002	0,9124	7,7x10 ⁻³
	90	0,914±0,11	0,072±0,004	0,9687	2,4x10 ⁻³

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Cabe novamente ressaltar que o parâmetro “S” mostra a capacidade de secagem de um objeto sólido por unidade de tempo, enquanto que “G” indica a magnitude da resistência interna

e externa de um objeto sólido à transferência de calor e/ou umidade durante o processo de secagem, sendo esse último associado a número de Biot.

Verificou-se por meio do teste estatístico ANOVA fator único a existência de efeito significativo ($p < 0,05$) da variação da temperatura sobre os parâmetros “S” e “G”. Em relação a aplicação do modelo de Dincer & Dost (1996) (Equação 23), os coeficientes de determinação ($R^2 \geq 0,8194$) e o valores de Chi-quadrado ($X^2 \leq 9,4 \times 10^{-3}$) indicam uma boa adequação do ajuste do modelo aos dados experimentais (Tabela 4). Para além disso, com o valor de “G” é possível calcular a primeira raiz da equação transcendental (μ_1) por meio da Equação 22.

Logo, a partir dessa determinação, associado ao parâmetro “S”, permitiu-se quantificar a difusividade efetiva de massa (D_m), número de Biot (B_i) e o coeficiente de transferência de massa (K_m) pelas Equações 23, 24 e 25, respectivamente. Esses valores são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros de transferência de massa pelo ajuste do modelo Dincer & Dost

Amostra	Temperatura (°C)	Parâmetros			
		μ_1	B_i	D_m	k_m
ASPT	50	0.502	0.173	4.13×10^{-8}	1.43×10^{-6}
	70	0.423	0.127	8.16×10^{-8}	2.07×10^{-6}
	90	0.347	0.110	2.43×10^{-7}	4.62×10^{-6}
PTAG	50	0.423	0.127	5.59×10^{-8}	1.42×10^{-6}
	70	0.396	0.114	9.59×10^{-8}	2.19×10^{-6}
	90	0.361	0.101	2.08×10^{-7}	4.17×10^{-6}
PTUS	50	0.260	0.069	1.66×10^{-7}	2.31×10^{-6}
	70	0.185	0.053	4.98×10^{-7}	5.29×10^{-6}
	90	0.100	0.040	3.03×10^{-6}	2.39×10^{-5}

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os valores de B_i obtidos na secagem de camarão por RW das amostras ASPT e PTAG situam-se na faixa de 0,101 – 0,173 ($0,1 < B_i < 100$), o caso mais comum para aplicação de secagem, o que indica a existência de resistências internas e de superfície/externas finitas. Cabe mencionar que a amostra PTAG foi pré-tratada utilizando o etanol como meio líquido. Por outro lado, a amostra PTUS apresentou valores de $B_i < 0,1$. Destaca-se que B_i é um dos números adimensionais mais importantes na secagem, o qual representa a magnitude da resistência à

difusão da umidade no interior do material. No caso de $B_i < 0,1$, isso indica resistência interna insignificante à difusividade da umidade dentro do objeto sólido.

Ao avaliar os valores de B_i de forma global e isotermicamente, verificou-se que $B_i/ASPT > B_i/PTAG > B_i/PTUS$. Esse fenômeno pode ser associado a geleificação da fração proteica actina, decorrente da desnaturação causada pela temperatura. Em estudo baseado na caracterização de proteínas miofibrilares de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*) para elaboração de biofilmes, mostram, por calorímetro diferencial de varredura (DSC), que esse fenômeno tem seu início na fração de actina na faixa 71-72°C (Monterrey-Quintero; Sobral, 2000). É importante destacar que a geleificação da proteína forma uma barreira interna (resistência interna), que dificulta o deslocamento da umidade até a superfície da amostra. Assim, é possível afirmar que o uso do etanol nos pré-tratamentos favoreceu na remoção da actina da musculatura do camarão. Além disto, foi possível associar, também, que a combinação etanol e ultrassom potencializou significativamente a extração da actina.

Cabe destacar o efeito da temperatura sobre o valor do número de B_i , onde se observa uma relação inversamente proporcional (Tabela 5), ou seja, o aumento de temperatura ocasionou uma diminuição no valor de B_i . Na pesquisa de Rurush *et al.* (2022), em que realizaram a secagem da polpa de mirtilo por RW sob diferentes temperaturas, os autores quantificaram que durante a secagem, o ar na superfície da amostra estava à temperatura ambiente sem convecção forçada. Isso demonstra que, à medida que a temperatura aumenta durante a secagem do RW, há a redução, principalmente, da resistência interna à transferência de água.

Os valores de B_i obtidos na secagem da amostra de camarão sem pré-tratamento apresentaram concordância aos valores obtidos por Rajoriya, Shewales e Hebbar (2019), B_i (0,1224–0,2765), durante a secagem por RW de fatias de maçã (2 mm) nas temperaturas 60°C, 70°C, 80°C e 90°C. Isso demonstra que o sistema de secagem utilizado nesse estudo apresentou adequação na reprodução de parâmetros de transferência de massa similar aos descritos na literatura especializada.

Utilizou-se os valores de “r”, “S” e “ μ_1 ” e a difusividade da umidade (D_m) foi então calculada a partir da Equação 23. Posteriormente, os valores do coeficiente de transferência de umidade (K_m) foram calculados pela Equação 25. Os valores calculados de D_m e de k_m para a secagem das amostras de camarão por RW sem pré-tratamento e com pré-tratamento variaram no intervalo $4,13 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} - 3,03 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $1,42 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1} - 2,39 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$, respectivamente (Tabela 5).

Foi possível verificar que os dados de D_m obtidos neste estudo aumentaram conforme o incremento de temperatura de 70°C para 90°C, para as diferentes amostras de camarão seco por RW. Esse fenômeno está associado a diminuição da viscosidade da água nos capilares da amostra, com o aumento da temperatura. Sendo a viscosidade uma medida da resistência do fluido ao escoamento, sob essas condições provoca-se um aumento da difusão da água no interior do músculo de camarão, o que favorece a secagem (Wang; Zhang; Mujumdar, 2014). Ademais, as amostras pré-tratadas (PTAG e PTUS), dado a possível presença de etanol na estrutura dessas amostras, colaborou com a difusão e liberação do conteúdo de água para o ambiente. Neste contexto os dados da Tabela 5 apontam que $D_m/ASPT < D_m/PTAG < D_m/PTUS$, preservando a condição isotérmica.

Os valores de D_m obtidos neste estudo (Tabela 5) são consistentes com o intervalo dado para bioprodutos ($10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), reportada por vários autores para distintos produtos biológicos, utilizado em diferentes métodos de estimativa. Nessa perspectiva, Costa *et al.* (2018), reportaram valores D_m na secagem camarão (*Macrobrachium amazonicum*) usando secador de bandeja convectivo variando entre $1,01 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ e $2,05 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, além de Al-Hilphy *et al.* (2021), que avaliaram a secagem do camarão (*Metapenaeus affinis*) em um secador infravermelho rotativo em escala piloto nas temperaturas 60, 70 e 80° C e encontraram D_m na faixa de $3,245 \times 10^{-6} - 1,023 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

Cabe ressaltar, também, que os valores de D_m obtidos neste estudo foram superiores aos obtidos por Rajoriya, Bhavya e Hebbar (2021), em que os autores encontraram D_m na faixa de $2,89 \times 10^{-9}$ a $8,84 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ na secagem de purê de banana por RW, utilizando o modelo de Dincer & Dost (1996) (Equação 23). Assim, acredita-se que esse fato esteja associado ao pré-tratamento com etanol e as características do tecido muscular da amostra objeto desse estudo.

Em relação ao coeficiente k_m calculado pela Equação 25, neste estudo (Tabela 5), variou na faixa de $1,42 \times 10^{-6}$ a $2,39 \times 10^{-5} \text{ m/s}^{-1}$ na secagem das amostras de camarão sem tratamento e com tratamento prévio com etanol assistido por AG e US. Os resultados de k_m mostram, também, a existência de uma relação diretamente proporcional com a temperatura, ou seja, o aumento da temperatura de secagem, ocasionou um aumento no valor de k_m .

Os resultados de k_m obtidos corroboram com os encontrados na literatura para diferentes produtos biológicos e condições de secagem, como relatado por Arranz *et al.* (2017), durante a secagem de cenoura em temperaturas que variam de 40 a 70°C, e, que os valores de k_m estavam na faixa de $1,20 \times 10^{-6}$ a $6,54 \times 10^{-7} \text{ m/s}^{-1}$. Para além disso, Al-Hilphy *et al.* (2021), ao avaliarem a secagem do camarão (*Metapenaeus affinis*) em um secador infravermelho rotativo em escala

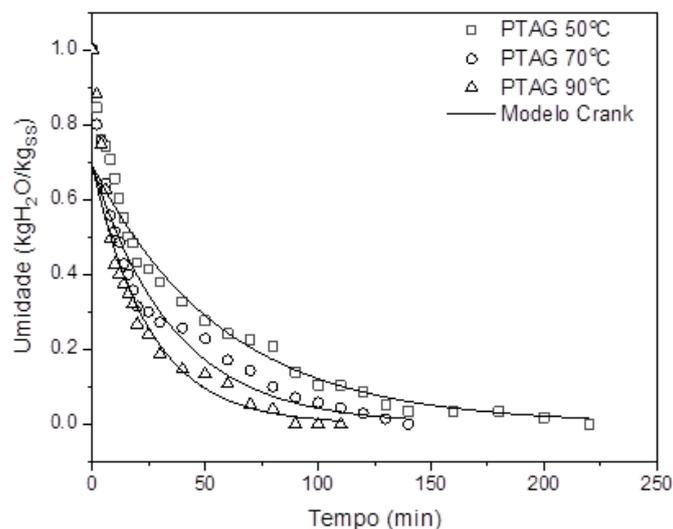
piloto, encontraram k_m na faixa de $1,108 \times 10^{-6}$ a $2,210 \times 10^{-6} \text{ m/s}^{-1}$ quando a temperatura de secagem aumentou de 60 para 80°C, respectivamente.

Observou-se, também, que $k_m/PTUS > k_m/PTAG > k_m/ASPT$. Este aumento nos valores de k_m pode ser explicado pela maior difusividade, que aumenta a taxa de movimento da umidade da camada interna para a superfície do produto seco. Posteriormente, isto aumenta o gradiente de concentração de umidade entre a superfície da matriz alimentícia e o ar circundante, o que eleva a taxa de absorção do vapor de água pelo ar que compõem a vizinhança (Prabhanjan; Ramaswamy; Raghavan, 1995; Rajoriya; Shewales; Hebbar, 2019). Além da combinação de radiação e condução (devido à circulação de água quente) durante o processo de secagem em RW, a transferência de calor e massa também ocorre na amostra alimentícia, devido à circulação de ar ao redor da amostra, que aumenta o mecanismo de convecção e resulta em um maior k_m (Leiton-Ramírez; Ayala-Aponte; Ochoa-Martinez, 2020).

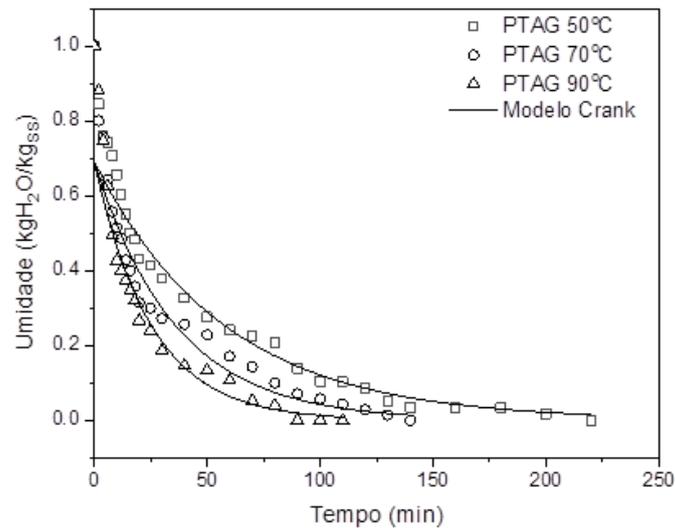
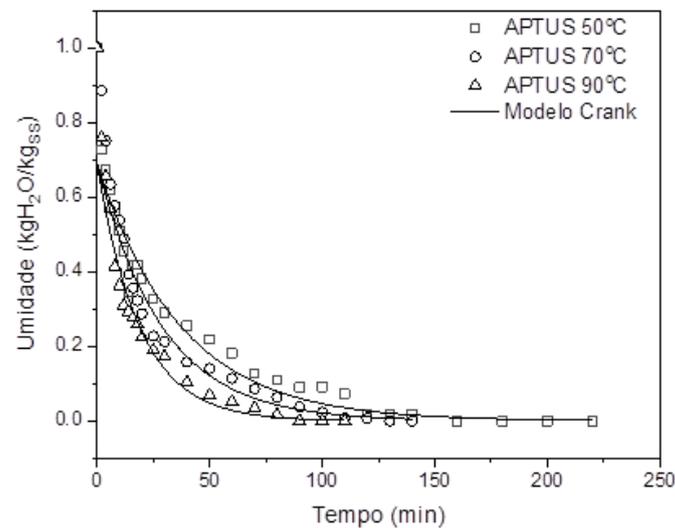
5.3.2 Modelagem matemática de Crank

O comportamento do conteúdo da umidade adimensional com o tempo de secagem das amostras de camarão por RW para três diferentes temperaturas (50, 70 e 90°C), sujeitas aos dois pré-tratamentos (AG e US) com o uso do etanol como meio líquido, tal como os valores estimados pela solução analítica da Equação da difusão (segunda lei de Fick) proposta por Crank (1975) (Equação 27) são apresentadas na Figura 12.

Figura 12 – Experimental e predito do conteúdo de umidade adimensional em função do tempo de secagem das amostras com o modelo de Crank: A) ASPT; B) PTAG; e C) PTUS



A

**B****C**

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Como é possível verificar na Figura 12, na qualidade do ajuste do modelo, para os sistemas de pré-tratamento em AG e US, ocorreu uma imprecisão na predição do valor do conteúdo de umidade adimensional pelo modelo proposto por Crank (1975), assumindo o camarão com o formato de um cilindro infinito. Essa imprecisão ocorreu nos 8 minutos iniciais do processo de secagem das amostras ASPT e PTAG. Ademais, na amostra PTUS, a imprecisão ocorreu nos 2 minutos iniciais processo de secagem de camarão por RW para as três temperaturas. Isto significa que, no início do processo de secagem das amostras de camarão por RW o transporte de umidade é controlado por fatores externos que independe da natureza do material. Além disso, é importante mencionar que, associado a este fator, existe também a limitação matemática imposta pela solução analítica da segunda lei de Fick proposta por Crank (1975).

Os valores de difusividades (D_m) obtidos por meio do modelo de Crank (Equação 27) na secagem de camarão por RW com pré-tratamento e sem pré-tratamento, assim como os parâmetros estatísticos (R^2 e X^2) são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores da difusividade obtidos por meio do modelo de Crank

Amostra	Temperatura (°C)	D_m (m ² /s)	Parâmetros estatísticos	
			R^2	X^2
ASPT	50	$7,63 \times 10^{-8}$	0,8933	$1,1 \times 10^{-2}$
	70	$1,05 \times 10^{-7}$	0,8700	$1,3 \times 10^{-2}$
	90	$1,89 \times 10^{-7}$	0,8871	$9,6 \times 10^{-3}$
PTAG	50	$7,53 \times 10^{-8}$	0,9202	$6,7 \times 10^{-3}$
	70	$1,21 \times 10^{-7}$	0,9049	$7,2 \times 10^{-3}$
	90	$1,72 \times 10^{-7}$	0,8852	$9,7 \times 10^{-3}$
PTUS	50	$1,17 \times 10^{-7}$	0,9293	$5,0 \times 10^{-3}$
	70	$1,50 \times 10^{-7}$	0,9000	$8,8 \times 10^{-3}$
	90	$2,30 \times 10^{-7}$	0,9085	$6,9 \times 10^{-3}$

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

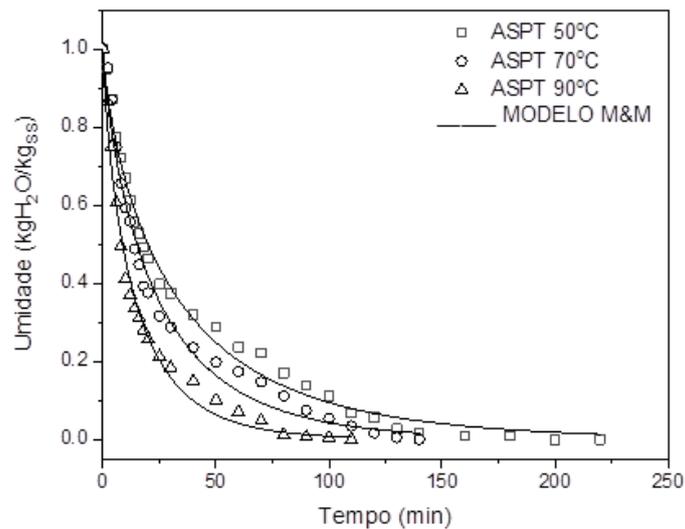
A difusividade efetiva da umidade (D_m) é um parâmetro crucial relacionado às características físicas e térmicas dos materiais, principalmente durante a secagem de alimentos. Esta representa a taxa na qual a umidade é transportada do interior da matriz sólida até a superfície externa da mesma, durante o processo de secagem. Os dados da Tabela 6 demonstram que os valores de D_m apresentaram tendência crescente com o aumento da temperatura.

Em pesquisa análoga, a qual avaliou a cinética de secagem por convecção da pele do peixe robalo asiático (*Lates calcarifer*), sob as temperaturas de 45, 55 e 65°C, utilizando a solução analítica da segunda lei de Fick proposta por Crank, das amostras pré-tratamento por ultrassom utilizando água como meio líquido, obteve-se valores de D_m variando de $8,16 \times 10^{-11}$ a $3,22 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ (Fikry *et al.*, 2023). Nessa direção, com a secagem de camarão de água doce (*Macrobrachium lamarreii*) e carpa Indiana (*Oxygaster bacaila*), Jain e Pathare (2007) reportaram valores de difusividade efetiva da umidade (D_m) de $11,11 \times 10^{-11}$ e $8,708 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ para as duas espécies, em que, também, foi utilizado a solução analítica da segunda lei de Fick proposta por Crank. Estes valores são inferiores aos obtidos neste estudo, que de forma global apresentou intervalo de $10^{-8} - 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. Acredita-se que esse fato esteja associado ao uso do etanol no pré-tratamento, como meio líquido, e as características do tecido muscular da amostra objeto desse estudo.

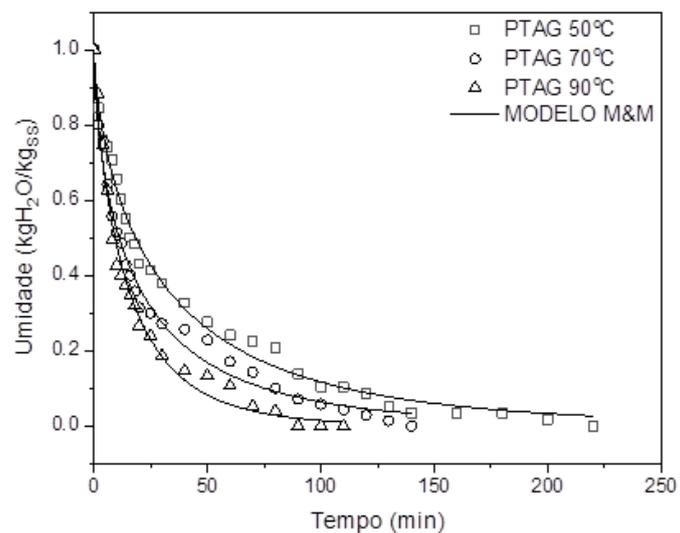
5.3.3 Modelagem matemática de Motta Lima e Massarani

Com o objetivo de quantificar a influência da temperatura nas cinéticas de secagem das amostras de camarão por RW com e sem pré-tratamento, verificou-se a possibilidade do uso do modelo de Motta Lima e Massarani, com modificações por analogia a correlação do tipo Arrhenius (Equação 38). O comportamento do conteúdo da umidade adimensional com o tempo de secagem das amostras de camarão para três diferentes temperaturas (50, 70 e 90°C) à diferentes pré-tratamentos (AG e US) e SPT, bem como os valores estimados para o processo de secagem por RW pelo modelo proposto de Motta Lima e Massarani são apresentados nas Figuras 13.

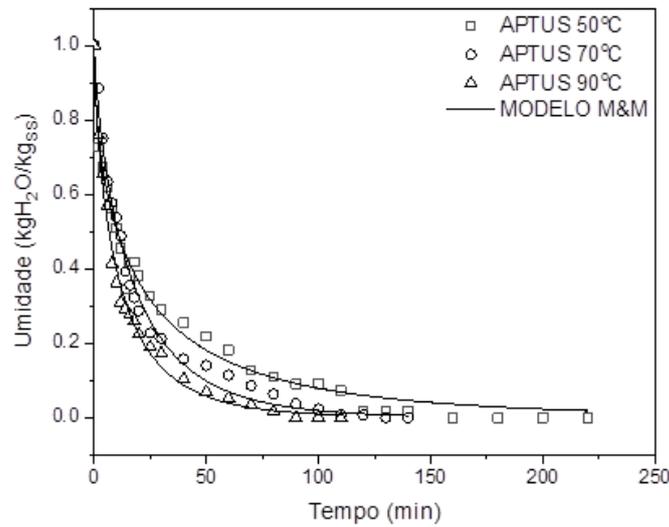
Figura 13 – Experimental e predito do conteúdo de umidade adimensional em função do tempo de secagem das amostras com o modelo de Motta Lima e Massarani: A) ASPT; B) PTAG; e C) PTUS



A



B



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Ao observar a Figura 13, nota-se que a curva característica do modelo de Motta Lima e Massarani (1996) (Equação 38) apresentou um excelente ajuste aos valores observados, para todas as temperaturas de secagem e em todos os tratamentos das amostras de camarão. Essa percepção visual do ajuste do modelo é corroborada com os parâmetros estatísticos descritos na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros do ajuste do modelo Motta Lima e Massarani

Amostra	Temperatura (°C)	Coeficientes do Modelo			Parâmetros estatísticos	
		K_1	E_1	η	R^2	X^2
ASPT	50	0,252	113,56	0,759	0,9905	$1,0 \times 10^{-3}$
	70	0,234	96,29	0,796	0,9849	$1,5 \times 10^{-3}$
	90	0,481	12,36	0,787	0,9883	$1,1 \times 10^{-3}$
PTAG	50	0,263	87,48	0,667	0,9931	$6,2 \times 10^{-4}$
	70	0,743	14,89	0,629	0,9886	$9,4 \times 10^{-4}$
	90	0,401	103,26	0,761	0,9870	$1,2 \times 10^{-3}$
PTUS	50	0,397	70,18	0,572	0,9882	$9,0 \times 10^{-4}$
	70	0,392	114,94	0,779	0,9919	$7,8 \times 10^{-4}$
	90	0,453	82,17	0,704	0,9926	$6,2 \times 10^{-4}$

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Em relação a aplicação do modelo de Motta Lima e Massarani (1996) (Equação 38), os coeficientes de determinação apresentaram excelentes valores ($R^2 \geq 0,9883$), além dos baixos valores de Chi-quadrado ($X^2 \leq 1,0 \times 10^{-3}$), o que indica uma boa adequação do ajuste do modelo aos dados experimentais. Entretanto, cabe salientar que o modelo de Motta Lima e Massarani apresenta três parâmetros (k_1 , E_1 e η), enquanto que o modelo de Dincer & Dost (Equação 23) apresenta dois parâmetros (G e S) e, por fim, o modelo Crank para cilindro infinito (Equação 27) apresenta somente um parâmetro (D_m).

Neste contexto o modelo de Motta Lima e Massarani (1996) conta com uma vantagem de apresentar os melhores resultados no ajuste aos dados experimentais, como revelam os parâmetros estatísticos R^2 e X^2 . Destaca-se, também, que o modelo de Motta Lima e Massarani é classificado como semi-empírico, que buscam harmonia entre a teoria e a facilidade de uso, ou seja, não reflete toda a complexidade do fenômeno de transferência de massa envolvido no processo de secagem. Enquanto que os modelos de Dincer & Dost e de Crank são modelos teóricos e que inclui implicitamente as resistências externas e internas ao processo de transferência de massa.

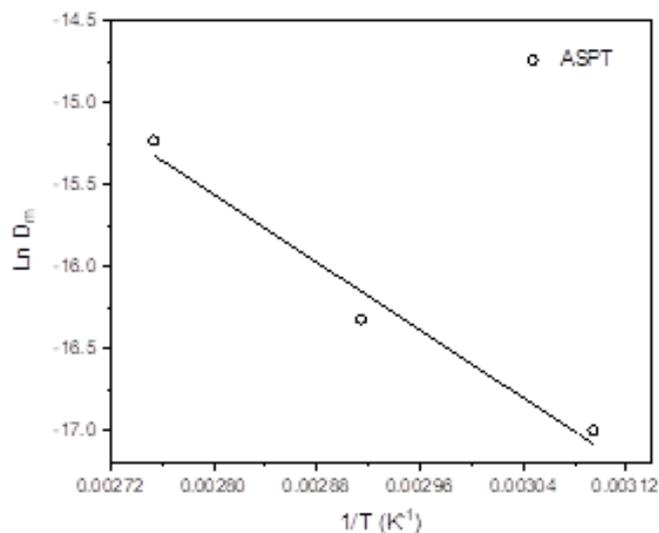
Para simular o processo de secagem das amostras de camarão por RW, sem a preocupação com o detalhamento do fenômeno de transferência de massa, o modelo Motta Lima e Massarani mostra-se uma excelente opção, apesar de sua validade estar restrita às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos. O problema está na determinação dos coeficientes de transferência de calor e massa e das propriedades físicas dos produtos. No entanto, a aplicação de modelos teóricos para prever a secagem de materiais biológicos, como é o caso do material objeto desse estudo, nos possibilita quantificar os parâmetros físicos (D_m , B_i , k_m , entre outros), inerentes ao material. Esses parâmetros são de difícil obtenção e variam consideravelmente ao longo do processo.

Como foi possível observar nos dados apresentados, o modelo de Motta Lima e Massarani (1996), com três parâmetros, apresentou, de maneira geral, o melhor ajuste para a cinética de secagem das amostras de camarão seca por RW. No entanto, para este estudo, ao considerar a escassez de parâmetro de transferência de massa e termodinâmicos, optou por utilizar os dados gerados pelo modelo de Dincer & Dost (Dincer; Hussain, 2004) (Equação 23) na determinação das propriedades termodinâmicas associadas ao processo de transferência de massa na secagem de camarão por RW. A escolha do modelo de Dincer & Dost em relação a solução analítica da segunda lei de Fick, proposta por Crank, considerou os resultados da avaliação estatística efetuada neste estudo.

5.4 Propriedades termodinâmicas

A energia de ativação (E_a) foi calculada traçando a gráfico de $\ln(D_m)$ contra $1/T_{abs}$, com o uso da Equação 29. Os valores de D_m foram obtidos pelo ajuste do modelo Dincer & Dost (Equação 23) e descritos na Tabela 5. Os resultados são apresentados nas Figura 14, 15 e 16. Uma relação linear é observada entre a difusividade da umidade (D_m) e o inverso da temperatura absoluta.

Figura 14 – Relação entre $\ln(D_m)$ versus $1/T$ na secagem de camarão por RW/SPT

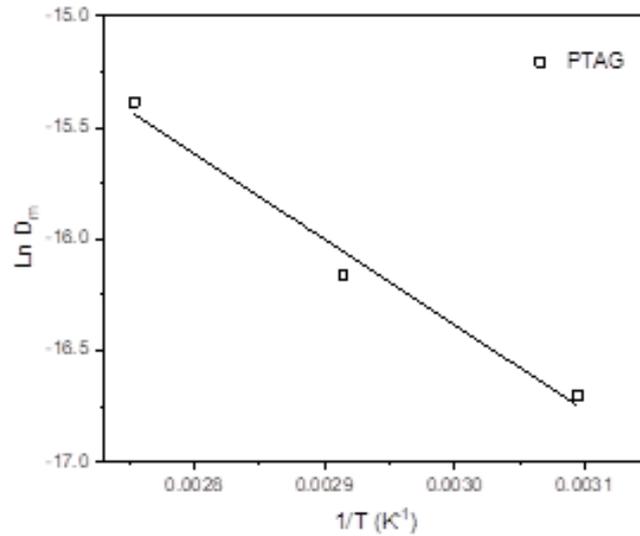


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os valores gerados pela regressão linear da Relação entre $\ln(D_m)$ versus $1/T$ obtidos e apresentada na figura anterior, permite predizer o efeito da temperatura de secagem sobre o parâmetro D_m no sistema sem tratamento prévio (SPT), com etanol, com a utilização a seguinte expressão matemática (Equação 43):

$$D_m = 2.67 \times 10^{-7} \text{Exp}\left(-\frac{5168.85}{T_{Abs}}\right) \quad (43)$$

Figura 15 – Relação entre $\ln(D_m)$ versus $1/T$ na secagem de camarão por RW com tratamento prévio em Etanol e assistido por AG

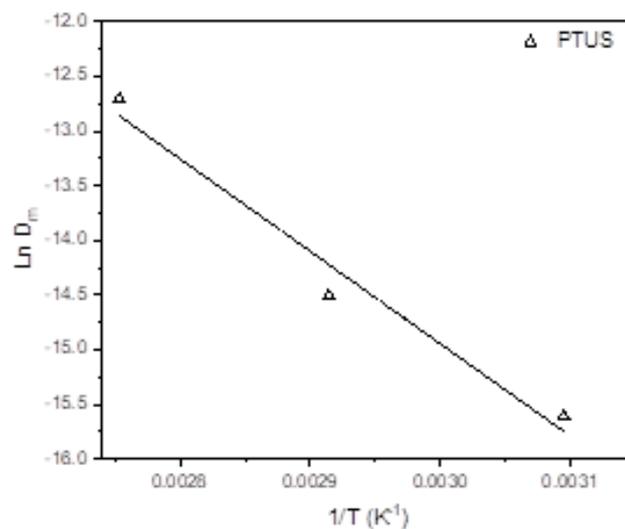


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Assim, ao replicar a mesma metodologia citada anteriormente, o efeito da temperatura sobre a D_m na secagem de camarão por RW nos sistemas com tratamento prévio com etanol assistido por agitação mecânica pôde ser matematicamente representado pela equação 44.

$$D_m = 2.16 \times 10^{-7} \text{Exp} \left(-\frac{3837,21}{T_{\text{Abs}}} \right) \quad (44)$$

Figura 16 – Relação entre $\ln(D_m)$ versus $1/T$ na secagem de camarão por RW com tratamento prévio com Etanol e assistido por US



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para o sistema efetuado com tratamento prévio com etanol, assistido por ultrassom na secagem de camarão por RW, a expressão matemática para prever o efeito da temperatura sobre a D_m é dado pela Equação 45.

$$D_m = 2.96 \times 10^{-6} \text{Exp} \left(-\frac{3648.06}{T_{\text{Abs}}} \right) \quad (45)$$

A partir da inclinação de cada reta da relação entre $\ln(D_m)$ versus $1/T$ (Figura 14, 15 e 16), foi determinado a energia de ativação na secagem das amostras de camarão por RW. Os valores estão descritos na Tabela 8, bem como, os parâmetros estatísticos resultantes da regressão linear efetuada.

Tabela 8 – Valores da energia de ativação (E_a) e os parâmetros estatístico para secagem de camarão por RW a diferentes sistemas

Amostra	Parâmetro		
	E_a (kJ/mol)	R^2	X^2
ASPT	42,97	0,9725	$4,40 \times 10^{-2}$
PTAG	31,90	0,9815	$1,61 \times 10^{-2}$
PTUS	30,33	0,9703	$1,99 \times 10^{-2}$

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Destaca-se a importância da quantificação desse parâmetro, pois a E_a é definida como sendo a energia fundamental para quebrar a barreira encontrada pelas moléculas de água, no momento em que as mesmas migram para a superfície do produto, no decorrer do processo de secagem (Corrêa *et al.*, 2005; Kashaninejad *et al.*, 2007). Neste contexto, quanto menor a energia de ativação maior será a difusividade de água no produto, sendo um indicativo de um processo de secagem facilitado.

Conforme com Xiao *et al.* (2012), a magnitude da energia de ativação, para uma operação típica de secagem pode variar de 12,7 a 110,0 kJ/mol. Neste estudo a E_a variou no intervalo 42,97–30,37 kJ/mol. Para além disso, Ísmail e Kocabay (2018), ao avaliarem a cinética de secagem de amostras de carne bovina (filés) em camadas finas secas por convecção, encontraram valor médio de E_a de 42,93 kJ/mol. Em outra pesquisa, a qual objetivou projetar um secador para operar em baixa temperatura na produção de um produto cárneo minimamente

processado, os autores encontraram um valor médio de energia de ativação igual a 44,96 kJ/mol (Aykın-Dinçer; Erbaş, 2019).

Esses valores estão próximos ao obtido para amostra ASPT (42,97 kJ/mol). Ao analisar os valores da E_a das amostras PTAG e PTUS (Tabela 8), verificou-se que os mesmos foram menores, comparativamente, a de outros produtos cárneos. Neste contexto, atribui-se essa redução à aplicação dos pré-tratamentos com etanol, o que indica que o pré-tratamento pode agir como um facilitador do processo de secagem.

Os valores da E_a (Tabela 8), permitiu calcular as propriedades termodinâmicas associadas ao processo de secagem de camarão por RW, nas diferentes temperaturas para os diferentes sistemas, e estão apresentadas nas Tabela 9.

Tabela 9 – Propriedades termodinâmicas obtidas para secagem de camarão por RW

Amostra	Condições T (°C)	Propriedades Termodinâmicas		
		ΔH (kJ.mol ⁻¹)	$\Delta S \times 10^2$ (kJ.mol ⁻¹ .K ⁻¹)	ΔG (kJ.mol ⁻¹)
ASPT	50	40,287	-37,14	160,31
	70	40,121	-37,19	167,75
	90	39,955	-37,24	175,19
PTAG	50	29,216	-37,32	149,80
	70	29,050	-37,37	157,27
	90	28,883	-37,41	164,75
PTUS	50	27,643	-35,14	141,21
	70	27,477	-35,19	148,24
	90	27,311	-35,24	155,28

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os valores de entalpia (ΔH) foram positivos para ambos os sistemas, e apontou para reações endergônicas, isto é, houve necessidade de energia na forma de calor para que o processo ocorresse. Entretanto, essa demanda energética foi maior no sistema sem aplicação de pré-tratamento (SPT) ao ser comparado aos sistemas sujeitos a aplicação de pré-tratamento (AG e US). Foi possível verificar, também, uma elevação da ΔH à medida que a temperatura de secagem aumentou, comportamento coerente ao reportado por outras pesquisas sobre secagem de outros bioprodutos (Nadi; Tzempelikos, 2018; Rashid *et al.*, 2019; Santos, 2022).

Todos os valores de entropia (ΔS) obtidos (Tabela 9), relacionados à secagem de camarão por RW foram negativos ($\Delta S < 0$), o que indica que o processo ocorreu sem aumento significativo da desordem do sistema. A entropia mede o grau de aleatoriedade ou desordem das moléculas de água em sistemas biológicos (Ajibola; Aviara; Ajetumobi, 2003; Fasina, 2006; Liébanes *et al.*, 2006; Lisboa *et al.*, 2019).

Pôde-se observar, que os valores de ΔS decresceram com incrementos de temperatura e que a magnitude da ΔS do sistema PTUS foi levemente inferior aos valores das ΔS nos sistemas ASPT e PTAG. Essa diminuição das ΔS pode ser associada ao fato de que, quando o produto está sendo desidratado, o teor de umidade diminui e o movimento das moléculas de água se torna mais restrito, pois há poucos sítios disponíveis.

Tal comportamento pode ser associado, também, a formação do complexo ativado, em que uma substância em uma condição de ativação pode adquirir entropia negativa, caso os graus de liberdade de translação ou rotação forem perdidos durante o processo. Nesse sentido, Iglesias, Chirife e Viollaz (1976) atribuíram os valores de entropia negativos à existência de adsorção química e/ou de modificações estruturais do adsorvente. Além disso, Rizvi e Benado (1983) atribuíram esse comportamento ao fato de que os produtos contem mais grupos polares, que se ligam mais fortemente à água. Assim, Zhang *et al.* (2022), ao avaliarem a cinética de secagem e propriedades termodinâmicas de lâminas de alga parda (*Laminaria japonica*), reportaram valores de ΔS na faixa de $38,40 \times 10^{-2}$ a $38,55 \times 10^{-2}$ kJ.mol⁻¹K⁻¹.

Em relação a energia livre de Gibbs (ΔG), esse parâmetro termodinâmico avalia a espontaneidade da dessorção de umidade (Corrêa *et al.*, 2010) e fornece uma melhor visão sobre as forças motrizes termodinâmicas que influenciam as reações (Nadi; Tzempelikos, 2018). Esse fenômeno ao ocorrer de forma espontânea é negativo, o que significa que não há necessidade de energia externa.

No entanto, neste estudo, os resultados (Tabela 9) mostraram que ΔG permaneceu positivo em todas as condições investigadas, o que significa que o processo não ocorreu espontaneamente. Isso corrobora aos resultados ΔH que foram positivos (Tabela 9), e sugere que a secagem das amostras de camarão por RW é um processo endergônico, ou seja, que requer energia na forma de calor para que a reação ocorra. Analogamente, Zhang *et al.* (2022) ao avaliarem a cinética de secagem e as propriedades termodinâmicas de lâminas de alga parda (*Laminaria japonica*), reportaram valores de ΔG na faixa de 128,54 a 140,11 kJ mol⁻¹.

6 CONCLUSÃO

O objetivo traçado para este estudo envolveu a realização de um pré-tratamento com etanol, seguido da secagem por *Refractance window* (RW) sob diferentes temperaturas (50, 70 e 90°C). Esse processo tinha como propósito analisar a cinética de secagem do Camarão-da-Amazônia (*Macrobrachium amazonicum*) e aplicar modelos matemáticos para avaliar o ajuste aos dados experimentais. No decorrer da pesquisa, observou-se que as amostras submetidas aos pré-tratamentos, tanto em agitação mecânica quanto em ultrassom, apresentaram uma redução no tempo necessário para a secagem, especialmente à medida que a temperatura era elevada.

De maneira mais específica, os resultados indicaram que as amostras submetidas a pré-tratamento com etanol em ultrassom e em agitação mecânica a 90°C, apresentaram os menores teores finais de umidade, atingindo valores de $12,93 \pm 0,16\%$ (PTAG) e $11,86 \pm 1,59\%$ (PTUS), respectivamente. Vale ressaltar que, para as temperaturas de 50°C e 70°C, esses dois métodos de tratamento também garantiram uma secagem uniforme.

Além do mais, após realizar o balanço de massa para quantificar a redução percentual na massa das amostras após os pré-tratamentos, identificou-se uma redução de 19,77% para as amostras pré-tratadas em AG, assim como a diminuição de 21,84% na massa das amostras que passaram pelo pré-tratamento em US. Os dados evidenciam o impacto dos pré-tratamentos na redução do teor de umidade das amostras, o qual desempenha um papel crucial na eficiência do processo de secagem e na obtenção de um produto com menor teor de umidade.

Em relação a análise da cinética de secagem, conduzida nas três amostras (SPT, PTAG e PTUS), foi possível observar que, embora os modelos de Dincer & Dost e de Crank coordenadas cilíndricas terem sido ajustados, constatou-se que o modelo de Motta Lima e Massarani foi o que apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais, evidenciado pelos valores de $R^2 \geq 0,98$ e valores reduzidos de X^2 . Logo, para simular o processo de secagem do camarão-da-Amazônia por RW, esse modelo torna-se uma excelente opção, desde que não haja a preocupação com o detalhamento do fenômeno de transferência de massa.

Ao considerar a importância dos fenômenos de transferência de massa e termodinâmicos, calculou-se as propriedades termodinâmicas a partir dos dados obtidos pelo modelo de Dincer & Dost. À vista disso, em relação a E_a houve uma variação entre intervalo 42,97 – 30,37 kJ/mol, em que os valores mais baixos de PTAG e PTUS podem estar associados ao pré-tratamento com etanol, o qual pode ter agido como um facilitador para processo de secagem.

Os valores de entalpia (ΔH) mostraram-se positivos, como as reações endergônicas, ou seja, foi necessário a energia na forma de calor para que a secagem ocorresse. Em relação aos valores de entropia (ΔS), estes apresentaram-se negativos, indicando que a secagem do camarão em RW ocorreu sem o aumento significativo da desordem do sistema. Por fim, acerca da energia livre de Gibbs (ΔG), os dados mostraram que a ΔG foi positiva em todas as condições estudadas, isto é, o processo não ocorreu de forma espontânea. O resultado da ΔG confirma que a secagem do camarão-da-Amazônia por RW é um processo endergônico.

Com base nos resultados obtidos neste estudo, foi evidente que a combinação do pré-tratamento com etanol (agitação mecânica e ultrassom) atrelado a secagem em *Refractance window* conseguiu, notavelmente, reduzir o tempo necessário para a secagem do Camarão-da-Amazônia. Dessa maneira, para pesquisas futuras, recomenda-se o aprofundamento da investigação, além de considerar diferentes concentrações da solução de etanol. Tal prática permitirá uma análise mais ampla de comportamento da amostra durante o processo de secagem, bem como oportunizará corrigir eventuais equívocos experimentais que possam impactar a eficácia da metodologia adotada.

7 REFERÊNCIAS

- ADEYEYE, S. A. O. An overview of fish drying kinetics. **Nutrition & Food Science**, Leeds, v. 49, n. 5, p. 886-902, 2019.
- AJIBOLA, O. O.; AVIARA, N. A.; AJETUMOBI, O. E. Sorption equilibrium and thermodynamic properties of cowpea (*Vigna unguiculata*). **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, v. 58, n. 4, p. 317-324, 2003.
- ALAVI, S.; OHMURA, R.; RIPMEESTER, J.A. A molecular dynamics study of ethanol–water hydrogen bonding in binary structure I clathrate hydrate with CO. **The Journal of Chemical Physics**, Nova York, 134, 054702. 2011.
- AL-HILPHY, A. R.; AL-MTURY, A. A. A.; AL-LESSA, S. A.; GAVAHIAN, M.; AL-SHATTY, S. M.; JASSIM, M. A.; MOHUSEN, Z. A. Z.; KHANEGHAH, A. M. A pilot-scale rotary infrared dryer of shrimp (*Metapenaeus affinis*): Mathematical modeling and effect on physicochemical attributes. **Journal of Food Process Engineering**, Hoboken, v. 45, n. 6, p. 13945, 2021.
- AMARAL, A. C. Z.; JABLONSKI, S. Conservation of marine and coastal biodiversity in Brazil. **Conservation Biology**, Londres, v. 19, n. 3, p. 625-631, 2005.
- ANUKIRUTHIKA, T.; MOSES, J. A.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C. Electrohydrodynamic drying of foods: Principle, applications, and prospects. **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, v. 295, p. 110449, 2021.
- AOAC. **Official methods of analysis**. Washington: Association of Official Analytical Chemists, 1990.
- ARAÚJO, C. S.; MACEDO, L. L.; VIMERCATI, W. C.; PAULA, R. R.; TEIXEIRA, L. J. Q.; SARAIVA, S. H. Princípios da secagem de alimentos. In: ROBERTO, C. D.; TEIXEIRA, L. J. Q.; CARVALHO, R. V. (org.). **Tópicos especiais em ciência e tecnologia de alimentos**. v. 1. Vitória: EDUFES, 2020.
- ARAÚJO, W. D.; GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; HARTMANN FILHO, C. P.; MARTINS, E. A. S. Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. **Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 48, n. 3, p. 448-457, 2017.
- ARRANZ, F. J.; JIMÉNEZ-ARIZA, T.; DIEZMA, B.; CORREA, E. C. Determination of diffusion and convective transfer coefficients in food drying revisited: a new methodological approach. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v. 162, p. 30-39, 2017.
- ASSEGEHEGN, E.; FUENTE, E. B.; FRANCO, J. M.; GALLEGOS, C. The importance of understanding the freezing step and its impact on freeze-drying process performance. **Journal of Pharmaceutical Sciences**, Amsterdam, v. 108, n. 4, p. 1378-1395, 2019.
- AVIZ, J. S. CINTRA, I. H. A.; SANTOS, M. A. S.; SILVA, K. C. A.; REBELLO, F. K.; MARTINS, C. M.; NOGUEIRA, A. S. A pesca artesanal do camarão-da-Amazônia em municípios a jusante da Usina Hidrelétrica de Tucuruí: características tecnológicas,

socioeconômicas e ambientais. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 9, n.7, e62973747, 2020.

AYKIN-DINÇER, E.; ERBAŞ, M. Quality characteristics of cold-dried beef slices. **Meat Science**, Amsterdã, v. 155, p. 36-42, 2019.

AZIZI, D.; JAFARI, S. M.; MIRZAEI, H.; DAHNAD, D. The Influence of Refractance Window Drying on Qualitative Properties of Kiwifruit Slices. **International Journal of Food Engineering**, Berlin, v. 13, n. 2, 2017.

BAEGHBALI, V.; NIAKOUSARI, M.; NGADI, M. O.; ESKANDARI, M. H. Combined ultrasound and infrared assisted conductive hydro-drying of apple slices. **Drying Technology**, Londres, v. 37, n. 14, p. 1793–1805, 2019.

BAEGHBALI, V.; NIAKOUSARI, M.; FARAHNAKY, A. Refractance Window drying of pomegranate juice: Quality retention and energy efficiency. **LWT – Food Science and Technology**, Amsterdam, v. 66, p. 34-40, 2016.

BERNAERT, N.; DROOGENBROECK, B. V.; PAMEL, E. V.; RUYCK, H. D. Innovative refractance window drying technology to keep nutrient value during processing. **Trends in Food Science & Technology**, Amsterdam, v. 84, p. 22-24, 2019.

BEZERRA, C. V.; SILVA, L. H. M.; CORRÊA, D. F.; RODRIGUES, A. M. A modeling study for moisture diffusivities and moisture transfer coefficients in drying of passion fruit peel. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Amsterdam, v. 85, p. 750-755, 2015.

BRAGA, A. M. P.; PEDROSO, M. P.; AUGUSTO, F.; SILVA, M. A. Volatiles identification in pineapple submitted to drying in an ethanolic atmosphere. **Drying Technology**, Londres, v. 27, n. 2, p. 248-257, 2009.

BRASIL. **Instrução Normativa nº 23, de 20 de agosto de 2019**. Regulamento Técnico que fixa a identidade e os requisitos de qualidade que devem apresentar o camarão fresco, o camarão resfriado, o camarão congelado, o camarão descongelado, o camarão parcialmente cozido e o camarão cozido, na forma desta Instrução Normativa e de seus Anexos. Brasília (DF): Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, [2019] [a].

BRASIL. **Instrução Normativa SDA nº 01, de 15 de janeiro de 2019**. Regulamento Técnico que fixa a identidade e as características de qualidade que deve apresentar o peixe salgado e o peixe seco. Brasília (DF): Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, [2019] [b].

CASTAÑEDA-LÓPEZ, G. G.; ULLOA, J. A.; ROSAS-ULLOA, P.; RAMÍREZ-RAMÍREZ, J. C.; GUTÉRREZ-LEYVA, R.; SILVA-CARRILLO, Y.; ULLOA-RANGEL, B. E. Ultrasound use as a pretreatment for shrimp (*Litopenaeus vannamei*) dehydration and its effect on physicochemical, microbiological, structural, and rehydration properties. **Journal of Food Processing and Preservation**, Oxford, v. 45, n. 4, p. 1-13, 2021.

CASTOLDI, M. ZOTARELLI, M. F.; DURIGON, A.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. Production of tomato powder by refractance window drying. **Drying Technology**, Londres, v. 33, n. 12, p. 1463-1473, 2015.

CHAGAS, A. L. K.; FERNANDES, G. S. T. Qualidade microbiológica do camarão *Macrobrachium amazonicum* comercializado. **Revista Perspectivas Online: Biológicas & Saúde**, Campos dos Goytacazes, v. 9, n. 30, p. 38-49, 2019.

CHAGAS, L. A. Análise microbiológica de camarões secos em feira livre de São Luís- MA. **Estudos Interdisciplinares em Ciências da Saúde**, João Pessoa, v. 15, p. p. 75-89, 2023.

CHENG, S.; SU, W.; YUAN, L.; TAN, M. Recent developments of drying techniques for aquatic products: With emphasis on drying process monitoring with innovative methods. **Drying Technology**, Londres, v. 39, n. 11, p. 1577-1594, 2021.

CINTRA, I. H. A.; SILVA, K. C. A.; MUNIZ, A. P. M. Ocorrência de *Macrobrachium Rosenbergii* (de man, 1879) em áreas estuarinas do Estado do Pará (crustácea, decapoda, palaemonidae). **Boletim Técnico-Científico do CEPNOR**, Belém, v. 3, n. 1, p. 219-227, 2003.

CORRÊA, P. C.; JÚNIOR, P. C. A.; RIBEIRO, D. M.; SILVA, F.S. Equilíbrio higroscópico de milho, alpiste e painço: Obtenção e modelagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 162-167, 2005.

CORZO, O.; BRACHO, N.; ALVAREZ, C. Water effective diffusion coefficient of mango slices at different maturity stages during air drying. **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, v. 87, n. 4, p. 479-484, 2008.

COSTA, D. A. S. MARTINS, J. K.; SILVA, K, C, A.; KLAUTAU, A. G. C. M.; CINTRA, I. H. A. Seletividade do matapi nas capturas de *Macrobrachium amazonicum* no baixo Rio Tocantins, Amazônia, Brasil. **Boletim do Instituto da Pesca**, São Paulo, v. 42, n. 2, p. 403-417, 2016.

COSTA, F. P. SILVA, F. N. L.; GUEDES, A. C. B.; PASSOS, P. H. S.; QUADROS, M. L. A.; MENDONÇA, R. C.; OLIVEIRA, L. C. Women in aquaculture: a case study in the Marajó archipelago, Brazil. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 9, n. 7, p. 1-22, 2020.

COSTA, J. W. P.; MATOS, S. C. N.; COSTA JUNIOR, K. S.; PAIXÃO, D. J. M. R.; CORDEIRO, C. A. M. Salga e secagem de pescado. *In*: CORDEIRO, C. A. M.; BORDIGNON, A. C. (org.). **Ciência e tecnologia do pescado: uma análise pluralista**. 1. ed., v. 4. Guarujá: Científica Digital, 2022.

COSTA, M. V.; SILVA, A. K. N.; RODRIGUES, P. R.; SILVA, L. H. M.; RODRIGUES, NA. M. C. Prediction of moisture transfer parameters for convective drying of shrimp at different pretreatments. **Food Science and Technology**, Campinas, v. 38, n. 4, p. 612-618, 2018.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2. ed. Great Britain: Clarendon Press; Oxford, 1975.

CUNHA, R. M. C.; BRANDÃO, S. C. R.; MEDEIROS, R. A. B.; SILVA JÚNIOR, E. V.; SILVA, J. H. F.; AZOUBEL, P. M. Effect of ethanol pretreatment on melon convective drying. **Food Chemistry**, Amsterdam, v. 333, p. 1-7, 2020.

DAVILA, R. F. Z. **Mathematical modeling of drying process of unripe banana slices**. 2016. 152 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

DELFIYA, D. S. A.; MURALI, K. P. S.; ALFIYA, P. V.; KUMAR, L. R. G.; SAMUEL, M. P. Design and development of hot air-assisted continuous infrared drying system for shrimps. **Journal of Aquatic Food Product Technology**, Londres, v. 31, n. 4, p. 361-373, 2022.

DINCER, I.; DOST, S. A modelling study for moisture diffusivities and moisture transfer coefficients in drying of solid objects. **International Journal of Energy Research**, Londres, v. 20, p. 531-539, 1996.

DINCER, I.; DOSTER, S. An analytical model for moisture diffusion in solid objects during drying. **Drying Technology**, Londres, v. 13, n. 1-2, 1995.

DINCER, I.; HUSSAIN, M. M. Development of a new Biot number and lag factor correlation for drying applications. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. Amsterdam, v. 47, n. 4, p. 653-658, 2004.

ERSAN, A. C.; TUGRUL, N. The drying kinetics and characteristics of shrimp dried by conventional methods. **Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly**, Belgrado, v. 27, n. 4, p. 319-328, 2021.

ERTEKIN, C.; FIRAT, M. Z. A comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, Londres, v. 57, p. 701-717, 2017.

EVANGELISTA-BARRETO, N. S. SILVA, R. A. R.; CERQUEIRA, B. N. Qualidade microbiológica e físico-química do camarão salgado, seco e defumado comercializado em Cruz das Almas, Recôncavo da Bahia. **Acta of Fisheries and Aquatic Resources**, São Cristóvão, v.4, n. 2, p. 1-7, 2016.

FARIA, R. Q.; TEIXEIRA, I. R.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R.; RESENDE, O. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 573-583, 2012.

FARIAS, A. P. V.; PIRES, Y. P.; SANTOS, L. S.; SERUFFO, M. C. R.; LOPES JUNIOR, M. L. Técnicas de conservação de alimentos por salga como prática de saberes tradicionais da Comunidade Murutinga, Abaetetuba – Pará. **Revista Brasileira de Educação do Campo**, Tocantinópolis, v. 7, p. 1-29, 2022.

FASINA, O. O. Thermodynamic properties of sweetpotato. **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, v. 75, n. 2, p. 149-155, 2006.

FELLOWS, P. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática**. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.

FIKRY, M.; BENJAKUL, S.; AL-GHAMDI, S.; TAGRIDA, M.; PRODPRAN, T. Evaluating Kinetics of Convection Drying and Microstructure Characteristics of Asian Seabass Fish Skin without and with Ultrasound Pretreatment. **Processes**, Basel, v. 12, n. 16, p. 1-22, 2023.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **List of species for fishery statistics purposes**. Roma: FAO, 2016.

FRANCO, S.; JAQUES, A.; FARDELLA, M.; VALENCIA, P.; NÚÑEZ, H.; RAMÍREZ, C.; SIMPSON, R. Dehydration of salmon (*Atlantic salmon*), beef, and apple (*Granny Smith*) using Refractance window™: Effect on diffusion behavior, texture, and color changes. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, Amsterdã, v. 52, p. 8-16, 2019.

FREIRE, J. L.; MARQUES, C. B.; SILVA, B. B. Estrutura populacional e biologia reprodutiva do camarão-da-Amazônia *Macrobrachium amazonicum* (Heller, 1862) (Decapoda: Palaemonidae) em um estuário da região Nordeste do Pará, Brasil. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, Itajaí, v. 16, n. 2, p. 65-76, 2012.

FREITAS, L. D. C. BRANDÃO, S. C. R.; SILVA, J. H. F.; ROCHA, O. R. S.; AZOUBEL, P. M. Effect of ethanol and ultrasound pretreatments on pineapple convective drying. **Food Technology & Biotechnology**, Zagrebe, v. 59, n. 2, p. 209-215, 2021.

GAMBARYAN-ROISMAN, T. Modulation of marangoni convection in liquid films. **Advances in Colloid and Interface Science**, Amsterdam, v. 222, p. 319-331, 2015.

GRANELLA, S. J.; BECHLIN, T. R.; CHRIST, D. Moisture diffusion by the fractional-time model in convective drying with ultrasound-ethanol pretreatment of banana slices. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, Amsterdam, v. 76, p. 102933, 2022.

GUINÉ, R. P. F. The Drying of Foods and Its Effect on the Physical-Chemical, Sensorial and Nutritional Properties. **International Journal of Food Engineering**, [S. l.] v. 4, n. 2, p. 93-100, 2018.

HENDERSON, S.M.; PABIS, S. Grain drying theory temperature effects on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Amsterdam, v. 6, p. 169-174, 1961.

HUANG, D.; MEN, K.; LI, D.; WEN, T.; GONG, Z.; SUNDEN, B.; WU, Z. Application of ultrasound technology in the drying of food products. **Ultrasonics Sonochemistry**, Amsterdã, v. 63, p. 104950, 2020.

IGLESIAS, H. A.; CHIRIFE, J.; VIOLLAZ, P. Thermodynamics of water vapour sorption by sugar beet root. **International Journal of Food Science & Technology**, Christchurch, v. 11, n. 1, p. 91-101, 1976.

INDIARTO, R.; ASYIFAA, A. H.; ADININGSIH, F. C. A.; AULIA, G. A.; ACHMAD, S. R. Conventional and advanced food-drying technology: a current review. **International Journal of Scientific & Technology Research**, Deli, v. 10, n. 1, p. 1-9, 2021.

ISMAIL, O.; KOCABAY, O. G. Infrared and microwave drying of rainbow trout: drying kinetics and modelling. **Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, Trabzon, v. 18, p. 259-266, 2018.

JAFARI, S. M.; AZIZI, D.; MIRZAEI, H.; DEHNAD, D. Comparing Quality Characteristics of Oven-Dried and Refractance Window-Dried Kiwifruits. **Journal of Food Processing and Preservation**, Hoboken, v. 40, n. 3, p. 362-372, 2016.

JAIN, D.; PATHARE, P. B. Study the drying kinetics of open sun drying of fish. **Journal of Food Engineering**, Amsterdã, v. 78, n. 4, p. 1315-1319, 2007.

JIDEANI, V. A.; MPOTOKWANA, S. M. Modeling of water absorption of Botswana bambara varieties using Peleg's equation. **Journal of Food Engineering**, Amsterdã, v. 92, n. 2, p. 192-188, 2009.

JUNQUEIRA, J. R. J. CORRÊA, J. L. G.; RESENDE, N. S.; BALBINOTI, T. C. V.; GATTI, I. P.; MENDONÇA, K. S. Ethanol pretreatment in taioba leaves during vacuum drying. **Science and Agrotechnology**, Lavras, v. 45, p. 1-11, 2021.

KARABDHAJE, S. V.; THAKARE, V. M.; KARDILE, N. B.; THAKE, S. M. Refractance window drying: An innovative drying technique for heat sensitive product. **International Journal of Recent Technology and Engineering**, Bhopal, v. 8, n. 4, p. 1765-1771, 2019.

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L. G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 1, p. 98-108, 2007.

KOUSHIK, C. V. N.; KAMAL, R. V. N.; TARUN, C.; TEJA, K. D.; MANNE, S. An efficient algorithm for prawn detection and length identification. **Proceedings of International Conference on Computational Intelligence and Data Engineering**, [S. l.], v. 56, p. 457-467, 2020.

KUDRA, T.; MUJUMDAR, A. S. **Advanced drying technologies**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.

LEITON-RAMÍREZ, Y. M.; AYALA-APONTE, A.; OCHOA-MARTINEZ, C. I. Physicochemical properties of guava snacks as affected by drying technology. **Processes**, Basel, v. 8, n. 1, p. 106, 2020.

LIÉBANES, M. D.; ARAGÓN, J. M.; PALANCAR, M. C., ARÉVALO, G.; JIMÉNEZ, D. Fluidized Bed Drying of 2-Phase Olive Oil Mill By-Products. **Drying Technology**, Londres, v. 24, n. 12, p. 1609-1618, 2006.

LIMA, J. F. CINTRA, I. H. A.; BASTOS, A. M.; DAMASCENO, L. F.; MONTAGNER, D.; VARELA, E. S. **Caracterização do sistema pesqueiro de produção do Camarão-da-Amazônia no Estuário Amazônico**. Macapá: Embrapa Amapá, 2016.

LIMA, J. F.; DUARTE, S. S.; DAMASCENO, L. L. F. **Relações biométricas e rendimentos de carne e resíduos de Camarão-da-Amazônia capturados na Foz do Rio Amazonas**. Macapá: Embrapa Amapá, 2018. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento).

LIN, Y.; GAO, Y.; LI, A.; WANG, L.; AI, Z.; XIAO, H.; LI, J.; LI, X. Improvement of *pacific* white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) drying characteristics and quality attributes by a combination of salting pretreatment and microwave. **Foods**, [S. l.], v. 11, 1-17, 2022.

LISBOA, H. M.; ARAUJO, H.; PAIVA, G.; ORIENTE, S.; PASQUALI, M.; DUARTE, M. E.; MATA, M. E. C. Determination of characteristic properties of mulatto beans (*Phaseolus vulgaris* L.) during convective drying. **Journal of Agriculture and Food Research**, Amsterdã, v. 1, p. 1-6, 2019.

MACIEL, C. R.; VALENTI, W. C. Biology, fisheries, and aquaculture of the Amazon River prawn *Macrobrachium amazonicum*: a review. **Nauplius**, Botucatu, v. 17, n. 2, p. 61-79, 2009.

MAI, S. C.; FRIEDRICH, G. B.; FONSECA, C.; MENONCIN, S.; TERNUS, R. Z.; DALCANTON, F. Avaliação do pré-tratamento osmótico com cloreto de sódio e diferentes tempos sobre a secagem da abóbora cabotiá. **Revista CSBEA**, Pinhalzinho, v. 1, n. 1, p. 1-9, 2015.

MALVANDI, A.; FENG, H.; KAMRUZZAMAN, M. Application of NIR spectroscopy and multivariate analysis for Non-destructive evaluation of apple moisture content during ultrasonic drying. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, Amsterdam, v. 269, p. 120733, 2022.

MARQUES, M. H. C.; SILVA, I. C.; ZACARDI, D. M.; SANTOS, M. A. S.; BRABO, M. F.; MACIEL, C. R. Perfil do consumidor de camarão-da-Amazônia no Estado do Pará: socioeconômica, frequência de consumo e preferências. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 9, n. 9, p. 1-22, 2020.

MARTINS, F. P.; BOSCH NETO, J. C.; SILVA, A. J. O.; SIQUEIRA, A. M. O. Drying: a review. **The Journal of Engineering and Exact Sciences – jCEC**, Viçosa, v. 6, n. 4, p. 1-7, 2020.

MARTINS, W. S.; OETTERER, M. Correlação entre o valor nutricional e o preço de oito espécies de pescado comercializadas no estado de São Paulo. **Boletim do Instituto de Pesca**, São Paulo, v. 36, n. 4, p. 277-282, 2010.

McMINN, W. A. M.; AL-MUHTASEB, A. H.; MAGEE, T. R. A. Enthalpy-entropy compensation in sorption phenomena of starch materials. **Journal of Food Engineering**, Londres, v. 38, n. 5, p. 505-510, 2005.

MENDONÇA, A. P.; SAMPAIO, P. T. B.; ALMEIDA, F. A. C.; FERREIRA, R. F.; NOVAIS, J. M. Determinação das curvas de secagem das sementes de andiroba em secador solar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 4, p. 382-387, 2015.

MGHAZLI, S.; OUHAMMOU, M.; HIDAR, N.; LAHNINE, L.; IDLIMAM, A.; MAHROUZ, M. Drying characteristics and kinetics solar drying of Moroccan rosemary leaves. **Renewable Energy**, Amsterdam, v. 108, p. 303- 310, 2017.

MONTERREY-QUINTERO, E. S.; SOBRAL, P. J. A. Preparo e caracterização de proteínas miofibrilares de tilápia-do-nilo para elaboração de biofilmes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 1, p. 179-189, 2000.

MORCELI, P. Futuro para o álcool brasileiro. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v. 15, n. 3, p. 19-27, 2006.

MOTTA LIMA, O. C.; MASSARANI, G. Alguns aspectos da secagem de papel. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUIMICA, 11., 1996, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: COBEQ, 1996. p. 349-354.

MOUSAKHANI-GANJEH, A.; AMIRI, A.; NASROLLAHZADEH, F.; WIKTOR, A.; NILGHAZ, A.; PRATAP-SINGH, A.; KHANEGHAH, A. M. Electro-based technologies in food drying - a comprehensive review. **LWT**, Amsterdam, v. 145, p. 1-17, 2021.

MRKIĆ, V.; UKRAINCZYK, M.; TRIPALO, B. Applicability of moisture transfer Bi–Di correlation for convective drying of broccoli. **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, v. 79, n. 2, p. 640-646.

MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.

NADI, F.; TZEMPELIKOS, D. Vacuum drying of apples (cv. Golden Delicious): drying characteristics, thermodynamic properties, and mass transfer parameters. **Heat and Mass Transfer**, [S. l.], v. 54, n. 4, p. 1853-1866, 2018.

NINDO, C. I. TANG, J. Refractance window dehydration technology: A novel contact drying method. **Drying Technology**, London, v. 25, n. 1, p. 37–48, 2007.

NUNES, M. L. Defumação. *In*: OGAWA, M.; MAIA, E. L. **Manual de pesca: ciência e tecnologia do pescado**. 1. ed. São Paulo: Editora Varela, 1999.

OBAJEMIHI, O. I.; CHENG, J. H.; SUN, D. W. Novel sequential and simultaneous infrared-accelerated drying technologies for the food industry: Principles, applications and challenges. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, Londres, v. 63, n. 11, p. 1465-1482, 2023.

OGAWA, M. Tecnologia do pescado. *In*: OGAWA, M.; MAIA, E. L. **Manual de pesca: ciência e tecnologia do pescado**. 1. ed. São Paulo: Editora Varela, 1999.

OGAWA, M.; MAIA, E. L. **Manual de pesca: ciência e tecnologia do pescado**. 1. ed. São Paulo: Editora Varela, 1999.

ORTIZ-JEREZ, M. J.; OCHOA-MARTÍNEZ, C. L. Heat Transfer Mechanisms in Conductive Hydro-Drying of Pumpkin (*Cucurbita maxima*) Pieces. **Drying Technology**, London, v. 33, n. 8, p. 965-972, 2015.

PAMUNGKANINGTYAS, S. F. H. Shrimp paste: different processing and microbial composition across Southeast Asia. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, Bristol; Filadélfia, v. 1169, p. 1-9, 2022.

- PANDISELVAM, R.; TAK, Y.; OLUM, E.; SUJAYASREE, O. J.; TEKGÜL, Y.; KOÇ, G. Ç.; KAUR, M.; NAYI, P.; KOTHAKOTA, A.; KUMAR, M. Advanced osmotic dehydration techniques combined with emerging drying methods for sustainable food production: Impact on bioactive components, texture, color, and sensory properties of food. **Journal of Texture Studies**, [S. l.], v. 53, n. 6, p. 737-762, 2021.
- PARK, K. J.; VOHNIKOVA, Z.; BROD, F. P. R. Evaluation of drying parameters and desorption of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, v. 51, n. 03, p. 193-199, 2002.
- PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T.; CORNEJO, F. E. P. FABBRO, I. M. Secagem: Fundamentos e equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 93-127, 2014.
- PASCHOAL, L. R. P. **História natural de *Macrobrachium amazonicum* (HELLER, 1862) (Decapoda: Palaemonidae) e sua importância em reservatórios neotropicais do Sudeste Brasileiro**. 2017. 322 f. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) – Instituto de Biociências de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2017.
- PAUL, A.; MARTYNENKO, A. Electrohydrodynamic drying: effects on food quality. **Drying Technology**, Londres, v. 39, n. 11, p. 1745-1761, 2021.
- PEI, Y.; LI, Z.; LING, C.; JIANG, L.; WU, X.; SONG, C.; LI, J.; SONG, F.; XU, W. An improvement of far-infrared drying for ginger slices with computer vision and fuzzy logic control. **Journal of Food Measurement and Characterization**, Berlim, v. 16, p. 3815-3831, 2022.
- PIMENTEL, F. R.; MAGALHÃES, C. Palaemonidae, Euryrhynchidae, and Sergestidae (Crustacea: Decapoda): Records of native species from the states of Amapá and Pará, Brazil, with maps of geographic distribution. **Check List**, Paris, v. 10, n. 6, p. 1300-1315, 2014.
- PRABHANJAN, D. G.; RAMASWAMY, H. S.; RAGHAVAN, G. S. V. Microwave-assisted convective air drying of thin layer carrots. **Journal of Food Engineering**, Amsterdã, v. 25, n. 2, p. 283-293, 1995.
- PROVÁRZEA. Projeto Manejo dos Recursos Naturais da Várzea. **Manejo comunitário de camarões**. Brasília (DF): Ministério do Meio Ambiente, 2005.
- PUENTE, L. VEJA-GÁLVEZ, A.; AH-HEN, K. S.; RODRÍGUEZ, A.; PASTEN, A.; POBLETE, J.; PARDO-ORELLANA, C.; MUÑOZ, M. Refractance Window drying of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) pulp: A comparison of quality characteristics with respect to other drying techniques. **LWT**, Amsterdam, v. 131, p. 1-20, 2020.
- QUARESMA, M. C.; MARTINELLI-LEMOES, J. M. Fauna de camarões do Estado do Pará, Amazônia Oriental: lista de espécies. **Biota Amazônia**, Macapá, v. 10, n. 3, p. 1-6, 2020.
- RAGHAVI, L. M.; MOSES, J. A. ANANDHARAMAKRISHNAN, C. Refractance window drying of foods: a review. **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, v. 222, p. 267-275, 2018.

RAJORIYA, D.; BHAVYA, M. L.; HEBBAR, H. U. Impact of process parameters on drying behaviour, mass transfer and quality profile of refractance window dried banana puree. **LWT**, Amsterdam, v. 145, p. 111330, 2021.

RAJORIYA, D.; SHEWALE, S. R.; HEBBAR, H. U. Refractance Window drying of apple slices: Mass transfer phenomena and quality parameters. **Food and Bioprocess Technology**, Berlim, v. 12, n. 10, p. 1646-1658, 2019.

RASHID, M. T.; MA, H.; JATOI, M. A.; WALI, A.; EL-MESERY, H. S.; ALI, Z. SARPONG, F. Effect of infrared drying with multifrequency ultrasound pretreatments on the stability of phytochemical properties, antioxidant potential, and textural quality of dried sweet potatoes. **Journal of Food Biochemistry**, v. 43, n. 4, e12809, 2019.

RATTI, C. **Advances in food dehydration**. New York: Taylor & Francis Group, 2009. 50 p.

RIZVI, S. S. H.; BENADO, A. L. Thermodynamic properties of dehydrated foods. **Recent Advances in Engineering Properties of Foods**, Nova Orleans, n. 43, p. 19-22, 1983.

ROJAS, M. L.; AUGUSTO, P. E. D.; CÁRCEL, J. A. Ethanol pre-treatment to ultrasoundassisted convective drying of apple. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, Amsterdam, v. 61, p. 102328, 2020.

RORATTO, T. B.; MONTEIRO, R. L.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. An innovative hybrid-solar-vacuum dryer to produce high-quality dried fruits and vegetables. **LWT**, Amsterdam, v. 144, p. 1-11, 2021.

RURUSH, E.; ALVARADO, M.; PALACIOS, P.; FLORES, Y.; ROJAS, M. L.; MIANO, A. C. Drying kinetics of blueberry pulp and mass transfer parameters: Effect of hot air and refractance window drying at different temperatures. **Journal of Food Engineering**, Amsterdã, v. 320, p. 110929, 2022.

SANTOS, S. J. L. **Secagem por refractance window de cará-roxo (*Dioscorea trifida*) visando a obtenção de compostos de importância tecnológica**. 2020. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.

SANTOS, S. J. L.; SILVA, L. H. M.; RODRIGUES, A. M. C. Prediction of mass transfer parameters and thermodynamic properties using the refractance Window™ technique for drying of Yam (*Dioscorea Trifida*) paste. **Food Science and Technology**, Campinas, v. 42, 1-7, 2022.

SANTOS, S. S.; RIBAS, L. C. C. Aceitabilidade e rentabilidade de filés de peixe xerelete (manezinho) – *Caranx crysos* (Mitchill, 1815) – submetidos à defumação tradicional e líquida. **Revista Brasileira de Gastronomia**, Florianópolis, v. 4, p. 1-23, 2021.

SHENDE, D.; DATTA, S. K. Optimization study for refractance window drying process of Langra variety mango. **Journal of Food Science and Technology**, Berlim, v. 57, p. 683-692, 2020.

SILVA, F. N. L.; SILVA, F. N. L.; SILVA, F. R.; MANGAS, T. P.; OLIVEIRA, L. C.; MACEDO, A. R. G.; MEDEIROS, L. R.; CORDEIRO, C. A. M. O comércio do camarão da Amazônia (*Macrobrachium amazonicum*) na cidade de Breves/PA, Brasil. **PUBVET**, Maringá, v. 11, n. 4, p. 320-326, 2017.

SILVA, M. G.; CELEGHINI, R. M. S.; SILVA, M. A. Effect of ethanol on the drying characteristics and on the coumarin yield of dried guaco leaves (*Mikania laevigata* Schultz Bip. Ex Baker). **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, São Paulo, v. 35, n. 3, p. 1095-1104, 2018.

SILVA, N. C.; FARIAS JÚNIOR, É. C.; PEREIRA, A. N. S. Impactos Socioambientais Relacionados com a Pesca do Camarão-da-Amazônia *Macrobrachium amazonicum* (Heller, 1862) na Visão de Pescadores do Rio São José no Município de Abaetetuba/PA. **BioBrasil: Revista Científica**, Brasília, v. 12, n. 2, p. 1-12, 2022.

SIMPSON, R.; RAMÍREZ, C.; NUÑEZ, H.; JAQUES, A.; ALMONACID, S. Understanding the success of Page's model and related empirical equations in fitting experimental data of diffusion phenomena in food matrices. **Trends in Food Science & Technology**, Amsterdam, v. 62, p. 194-201, 2017.

SOGI, D. S.; SHIVHARE, U. S.; GARG, S. K.; BAWA, A. S. Water sorption isotherm and drying characteristics of tomato seeds. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v. 84, n. 3, p. 297-301, 2003.

TATEMOTO, Y.; MIZUKOSHI, R.; EHARA, W.; ISHIKAWA, E. Drying characteristics of food materials injected with organic solvents in a fluidized bed of inert particles under reduced pressure. **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, v. 158, p. 80-85. 2015.

TRIPATHY, P. P.; KUMAR, S. Modeling of heat transfer and energy analysis of potato slices and cylinders during solar drying. **Applied Thermal Engineering**, Amsterdã, v. 29, p. 884-891, 2009.

VIEIRA, R. M.; GUEDES, A. C. B. Mulheres pescadoras de camarão: gênero, trabalho e subsistência em Curralinho, Marajó/PA. **Ensino & Pesquisa**, União da Vitória, v. 19, n. 2, p. 152-166, 2021.

WAGHMARE, R. Refractance window drying: A cohort review on quality characteristics. **Trends in Food Science & Technology**, [S. l.], v. 110, p. 652-662, 2021.

WANG, H.; ZHANG, M.; MUJUMDAR, A. S. Comparison of three new drying methods for drying characteristics and quality of Shiitake Mushroom (*Lentinus edodes*). **Drying Technology**, Londres, v. 32, n. 15, p. 1791-1802, 2014.

XIAO, H. W.; YAO, X. D.; LIN, H.; YANG, W. X.; MENG, J. S.; GAO, Z. J. Effect of ssb (superheated steam blanching) time and drying temperature on hot air impingement drying kinetics and quality attributes of yam slices. **Journal of Food Process Engineering**, [S. l.], v. 35, n. 3, p. 370-390, 2012.

ZHANG, B.; MA, L. K.; DENG, S.; XIE, C.; QIU, X. H. Shelf-life of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) as affected by weakly acidic electrolyzed water ice-glazing and modified atmosphere packaging. **Food Control**, Amsterdam, v. 51, p. 114-121, 2015.

ZHANG, Q.; LI, S.; ZHANG, M.; UM, G.; LI, X.; ZHANG, G.; XIONG, S. Heat pump drying of kelp (*Laminaria japonica*): drying kinetics and thermodynamic Properties. **Processes**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 514, 2022.

ZHOU, C.; WANG, Z.; WANG, X.; YAGOUB, A. E.; MA, H.; SUN, Y.; YU, X. Effects of tri-frequency ultrasound-ethanol pretreatment combined with infrared convection drying on the quality properties and drying characteristics of scallion stalk. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, s. v., s. n., p. 1-34, 2020.

ZOTARELLI, M. F.; SILVA, V. M.; DURIGON, A.; HUBINGER, M. D.; LAURINDO, J. B. Production of mango powder by spray drying and cast-tape drying. **Powder Technology**, Amsterdam, v. 305, p. 447-454, 2017.