



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

NATASHA CUNHA

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA E DE
PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS NA SECAGEM *Curcuma longa* L. USANDO
A TÉCNICA DE REFRACTANCE WINDOW

BELÉM-PA

2020

NATASHA CUNHA

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA E DE
PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS NA SECAGEM *Curcuma longa* L. USANDO
A TÉCNICA DE REFRACTANCE WINDOW**

Dissertação apresentada ao Programa de PósGraduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal do Pará, como um dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Manoel da Cruz Rodrigues

BELÉM-PA

2020

**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)**

C972d Cunha, Natasha.
DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE
TRANSFERÊNCIA DE MASSA E DE PROPRIEDADES
TERMODINÂMICAS NA SECAGEM *Curcuma longa* L.
USANDO A TÉCNICA DE REFRACTANCE WINDOW /
Natasha Cunha. — 2020.
XIII, 57 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Antonio Manoel da Cruz Rodrigues
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, , ,
Belém, 2020.

1. *Curcuma longa* L.. 2. Refractance window. 3. Cinética
de secagem. 4. Transferência de massa. 5. Propriedades
termodinâmicas. I. Título.

CDD 664.0284

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA E DE
PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS NA SECAGEM *Curcuma longa* L. USANDO
A TÉCNICA DE REFRACTANCE WINDOW**

**Por
NATASHA CUNHA**

DATA: _____

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Antonio Manoel da Cruz Rodrigues
FEA/ITEC/UFPA – Orientador

Prof^a. Dr^a. Geormenny Rocha dos Santos
PPGCTA /ITEC/UFPA – Membro interno

Prof. Dr. Nelson Rosa Ferreira
FEA/ITEC/UFPA - Membro interno

Prof^a. Dr^a. Patricia Moreira Azoubel
UFPE - Membro Externo

Prof. Dr. Pedro Danilo de Oliveira
IFPA – Membro Externo

Dedico esta Dissertação ao meu amado filho Joaquim. De todos os presentes concedidos por Deus, você foi o maior deles, nada fez tanto sentido ou foi tão importante quanto a sua existência, todos os dias agradeço pelas bênçãos e força que sua vida me proporciona.

AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as bênçãos a mim concedidas e pela possibilidade de concretizar este sonho que não é mais somente meu;

Ao meu orientador Prof^o Dr. Antonio Manoel pela orientação competente, pela dedicação e pelos ensinamentos que muito me ajudaram para a realização deste trabalho, sobretudo o apoio e compreensão em momentos difíceis. Obrigada pela confiança a mim depositada;

Ao meu amado filho Joaquim, motivo de toda alegria, amor e força nesta caminhada, sem isso nada seria possível;

A Prof^a Dra. Luiza Meller pelos ensinamentos repassados e colaboração a este estudo, bem como o apoio e compreensão em momentos difíceis. Obrigada pela atenção e paciência com que sempre me recebeu;

Aos meus pais Lúcia e Airton por serem meu espelho de luta, dedicação e honra. Agradeço ainda, por todos os momentos que acreditaram e me incentivaram durante todo meu caminho, tanto em apoio emocional quanto aos cuidados com meu pequeno Joaquim, para que eu pudesse me dedicar ao meu trabalho sabendo que ele estaria sendo muito bem cuidado e amado. Tudo o que conquistei devo a vocês;

À minha amada irmã Nathália e meu cunhado Rafael pela amizade, paciência e apoio que me oferecem quando preciso. O exemplo de dedicação e conhecimento me inspira a buscar e aprender diariamente;

Aos meus amados irmãos Adriano e Andrey por todos os momentos felizes em família;

A todos os colegas de Laboratório de Medidas Físicas (LAMEFI) pelos anos compartilhados, e as trocas de experiências e conhecimento que levarei para a vida toda. Em especial minha amiga Samiria, presentes que o LAMEFI me deu, serei eternamente grata a todo apoio e dedicação que sempre me foi dado. Meu profundo agradecimento pela amizade, conselhos, trocas de conhecimento e momentos de descontração.

Agradeço a toda minha família, amigos, colegas que acreditaram e torceram pela minha realização. A todos muito obrigada;

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de alimentos PPGCTA – UFPA. À CAPES pela concessão da bolsa de estudos;

A Universidade Federal do Pará, onde busquei minha qualificação profissional, conquistei valiosas amizades, aprendi com os melhores professores e procurei extrair as melhores lições as quais levarei para minha vida profissional.

Muito obrigada!

RESUMO

O rizoma de *Curcuma longa* L. (CL) apresenta quantidade significativa de amido, lipídeos, vitaminas, minerais e compostos bioativos importantes. A CL é uma especiaria aromática com potencial ação corante natural. Entretanto, estes rizomas são perecíveis, sendo necessário um tratamento de desidratação. A secagem por *Refractance Window* (RW) é uma técnica bastante eficaz no processo de desidratação. Até onde se sabe, nenhuma informação sobre desidratação ou predição de parâmetros de transferência de massa e propriedades termodinâmicas de CL usando essa técnica encontra-se disponível na literatura. Deste modo, este estudo teve como objetivo determinar parâmetros de transferência de massa e propriedades termodinâmicas que controlam o processo de secagem da *Curcuma longa* L. por *Refractance Window* a diferentes temperaturas (70, 80, 90° C), por meio aplicabilidade do modelo analítico desenvolvido por Dincer e Dost (1995). Observou-se que o processo de desidratação das amostras ocorreu em um curto período de tempo. O conteúdo de umidade in natura foi de 80.71 ± 1.12 % (b.u.) e do produto seco variou de 20.81 a 17.34% (b.u.). As amostras de CL submetidas a secagem com exaustão obtiveram uma pequena influência sobre a taxa de secagem quando comparada as amostras sem exaustão. Segundo modelo de Dincer & Dost difusividade da umidade variou de 5.21×10^7 m².s⁻¹ a 12.89×10^7 m².s⁻¹ sem exaustão e 7.89×10^7 m².s⁻¹ a 19.67×10^7 m².s⁻¹ com exaustão e o coeficiente de transferência de massa variou na faixa de 9.79×10^5 a 6.73×10^5 m.s⁻¹ sem exaustão e 8.86×10^5 a 0.51×10^5 m.s⁻¹ com exaustão. Todos os valores de entropia (ΔS) obtidos relacionados à secagem da CL por RW foram negativos ($\Delta S < 0$). O estudo mostrou que o sistema com exaustão teve uma pequena influência sobre a taxa de transferência de massa durante a secagem da amostra de CL. As propriedades termodinâmicas apontaram para um processo não espontâneo, com valores positivos de entalpia e energia livre de Gibbs, e valores negativos de entropia.

Palavras-chave: *Cúrcuma longa* L; *Refractance Window*; cinética de secagem; transferência de massa; propriedades termodinâmicas.

ABSTRACT

The *Curcuma Longa L.* rhizomes (CL) presents a significant amount of starchy, lipids, vitamins, minerals and important bioactive compounds. The CL is an aromatic spice with natural dye action. However, these rhizomes are perishable, requiring dehydration treatment. The drying by *Refractance Window* (RW) is a very effective technique in the dehydration process. As far as we know, no information about dehydration or parameters prediction of mass transfer and thermodynamics of CL using this technique is available in literature. Thus, this study had as objective to determinate mass transfer parameters and thermodynamics properties that control the dehydration process of the *Curcuma Longa L.* by *Refractance Window* in different temperatures. (70, 80, 90° C), through applicability of the analytical model developed by Dincer e Dost (1995). It was observed that the dehydration process of the samples occurred in a small period. The unity content *in natura* was $80.71 \pm 1.12\%$ (b.u) and of the dry product varied from 20.81 to 17.34% (b.u). The CL samples submitted to drying with exhaustion obtained a small influence on the drying fees when compared to the samples with no exhaustion. According to the model of Dincer & Dost, diffusivity of moisture varied from $5.21 \times 10^7 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ to $12.89 \times 10^7 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ without exhaustion and $7.89 \times 10^7 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ a $19.67 \times 10^7 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ with exhaustion and the mass transfer coefficient varied in the range of 9.79×10^5 to $6.73 \times 10^5 \text{ m}.\text{s}^{-1}$ without the exhaustion and 8.86×10^5 a $0.51 \times 10^5 \text{ m}.\text{s}^{-1}$ with exhaustion. All the entropy values (ΔS) obtained related to the drying of the CL by RW were negative ($\Delta S < 0$). The study showed that the exhaustion system had a small influence on the mass transfer flee during the drying of the CL sample. The thermodynamics properties pointed to a nom spontaneous process with positive values of enthalpy and free energy of Gibbs, and negative values of entropy.

Keywords: *Cúrcuma longa L;* *Refractance Window;* drying kinetics; mass transference; thermodynamic properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Rizomas de <i>Cúrcuma longa</i> L.	18
Figura 2. Esquema de equipamento industrial do Refractance Window.....	22
Figura 3. Diagrama da transferência de calor na secagem por Refractance Window	22
Figura 4. Diagrama esquemático do sistema de secagem por RW.....	29
Figura 5. Experimental e predito conteúdo de umidade adimensional em função do tempo de secagem da amostra de CL para o sistema sem exaustão.....	33
Figura 6. Experimental e predito conteúdo de umidade adimensional em função do tempo de secagem da amostra de CL para o sistema com exaustão.	34
Figura 7. Experimental e predito conteúdo de umidade adimensional em função do tempo de secagem da amostra de CL para o sistema sem exaustão a 70oC.	34
Figura 8. Experimental e predito conteúdo de umidade adimensional em função do tempo de secagem da amostra de CL para o sistema com exaustão a 70oC.....	35
Figura 9. Experimental e predito conteúdo de umidade adimensional em função do tempo de secagem da amostra de CL para os ensaios sem exaustão (SSE) e com exaustão (SCE).	35
Figura 10. Experimental e predito conteúdo de umidade adimensional em função do tempo de secagem da amostra de CL para os ensaios sem exaustão (SSE) e com exaustão (SCE).	36
Figura 11. Experimental e predito conteúdo de umidade adimensional em função do tempo de secagem da amostra de CL para os ensaios sem exaustão (SSE) e com exaustão (SCE).	36
Figura 12. Experimentais e predito conteúdos de umidade adimensional em função do tempo de secagem da amostra de CL para o sistema sem exaustão.	37
Figura 13. Experimentais e predito conteúdos de umidade adimensional em função do tempo de secagem da amostra de CL para o sistema com exaustão.....	37
Figura 14. Relação entre $\ln(Dm)$ versus $1/T$ em diferentes sistemas de secagem de CL por RW. Secagem sem exaustão (●), Secagem com exaustão (○).	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Modelos teóricos aplicados na modelagem de cinética de secagem.	25
Tabela 2. Modelos semi teóricos aplicados na modelagem de cinética de secagem.	26
Tabela 3. Parâmetros do Modelo Dincer & Dost obtidos na secagem de CL por RW sem exaustão.	38
Tabela 4. Parâmetros do Modelo Dincer & Dost obtidos na secagem de CL por RW com exaustão.	38
Tabela 5. Valores calculados dos parâmetros de transferência de massa para secagem de CL por RW sem exaustão.	39
Tabela 6. Valores calculados dos parâmetros de transferência de massa para secagem de CL por RW como exaustão.	39
Tabela 7. Valores calculados dos parâmetros de transferência de massa para secagem de CL por RW sem exaustão.	41
Tabela 8. Valores calculados dos parâmetros de transferência de massa para secagem de CL por RW com exaustão.	41
Tabela 9. Valores de D_m calculados por meio do modelo de Crank a para secagem de CL por RW sem exaustão.	42
Tabela 10. Valores de D_m calculados por meio do modelo de Crank a para secagem de CL por RW com exaustão.	42
Tabela 11. Propriedades termodinâmicas obtidas para secagem de CL por RW sem exaustão.	44
Tabela 12. Propriedades termodinâmicas obtidas para secagem de CL por RW com exaustão.	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CL	<i>Curcuma longa</i> L	
RW	<i>Refractance window</i>	
SCE	Secagem com exaustão	
SSE	Secagem sem exaustão	
B_i	Número de Biot	
D	Difusividade da umidade	(m^2/s)
D_0	Valor de difusividade para o teor infinito de umidade	
D_{eff}	Coefficiente de difusão efetivo de massa	($m^2.s^{-1}$)
D_m	Difusividade efetiva de massa	
E_a	Energia de ativação	(kJ / mol)
G	Resistência interna à transferência de umidade	
h_p	Constante de Planck	($6,626 \times 10^{-34} J.s$)
k, k_1 e k_2	Constantes de velocidade de secagem	(s^{-1}, m^{-1}, h^{-1})
k_B	Constante de Boltzmann	($1,38 \times 10^{-23} J.K^{-1}$);
k_m	Coefficiente de transferência de umidade	(m /s)
L	Espessura da placa	(m)
m	Constante	
M_R	Razão de umidade (adimensional)	
N	Constante do modelo	
n	Número finito de termos	
R	Constante universal de gás	
R^2	Coefficiente de correlação	
R_p	Raio da partícula esférica ou cilíndrica	(m)
S	Coefficiente de secagem	
t	Tempo	(s)
T_{abs}	Temperatura absoluta	(K)
t_e	Temperatura do meio que envolve o produto	
X_e	Umidade equilíbrio do sólido	($kg_{\text{água}}/kg_{\text{sólid seco}}$)
X_0	Umidade inicial do sólido	($kg_{\text{água}}/kg_{\text{sólid seco}}$)
X_t	Umidade média do sólido no instante t	($kg_{\text{água}}/kg_{\text{sólid seco}}$)
y	Distância de um ponto ao centro do sólido	
y	Coordenada espacial	

ΔG	Energia livre de Gibbs	(kJ.mol ⁻¹)
ΔH	Entalpia diferencial	(kJ.mol ⁻¹)
ΔS	Entropia diferencial	(kJ.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
ξ	Constante de resfriamento ou aquecimento	(K.s ⁻¹)
Φ	Teor de umidade adimensional	
θ	Temperatura do produto em qualquer tempo	
θ_e	Temperatura do meio	
ϕ	Diferença de teor de umidade	(kg/kg d.b)
χ^2	Chi-quadrado	
μ_1	Primeira raiz da equação transcendental	
μ_n	Raiz da função	

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1. OBJETIVO GERAL	17
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1. AÇAFRÃO DA TERRA (<i>Curcuma Longa L.</i>).....	18
3.1.1. Aspectos gerais.....	18
3.2. SECAGEM.....	19
3.3. MODELAGEM MATEMÁTICA DE SECAGEM	23
3.4. PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DA SECAGEM	27
4. MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1. OBTENÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA E PROCESSAMENTO	28
4.2. SECAGEM POR REFRACTANCE WINDOW (RW)	28
4.3. ANÁLISE DE DADOS	29
4.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
6. CONCLUSÃO	46
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	47

1. INTRODUÇÃO

A *Curcuma longa* L. (CL) é um rizoma aromático bastante apreciado mundialmente, rico em compostos bioativos sendo consumido principalmente in natura, como ingrediente alimentício. Na Região Norte do Brasil a CL., é popularmente conhecida como Açafrão da terra. A CL por ter uma gama de bioativos, com propriedades antioxidantes, anti-inflamatória, anti-câncer e cardioprotetoras tem atraído a atenção de diferentes segmentos industriais, tais como cosméticos, farmacêuticos e alimentícios visando a sua aplicação em produtos. Entretanto a CL é um material perecível e que tem prazo de validade limitado após colheita. Para estender o prazo de validade e ampliar sua comercialização durante o ano todo, torna-se necessário a aplicação de processos de conservação do rizoma.

A secagem é um dos processos mais tradicionais utilizados para a conservação de matrizes vegetais, pois o teor de água presente é reduzido e assim o crescimento microbiológico é minimizado e com isso proporcionando uma maior vida útil e estabilidade no armazenamento das matrizes vegetais. Existem vários métodos de secagem de matrizes vegetais, desde os mais antigos e tradicionais como os de secagem natural, até mais sofisticados como a liofilização. A secagem por *Refractance Window* (RW) é uma técnica de secagem emergente, de baixo custo e bastante eficaz na secagem de matrizes vegetais. Porém a secagem é um processo complexo e que envolve simultaneamente transferência de calor e massa visando a remoção da umidade.

Por isso é necessário um profundo conhecimento da cinética de secagem e dos parâmetros de transferência de massa envolvidos. A cinética de secagem pode ser descrita usando as propriedades de transporte tais como condutividade térmica, difusividade térmica, difusividade de umidade, bem como coeficientes de transferência de calor e massa de interface. Esses parâmetros são considerados importantes para o projeto, simulação e otimização do processo de secagem usando modelagem matemática. Os modelos matemáticos mostram-se muito úteis no novo projeto e/ ou melhoria dos sistemas de secagem e análise dos fenômenos de transferência de massa durante o processo de secagem. O controle ótimo de um processo de secagem é, portanto, crítico e precisa de informações completas sobre a secagem, comportamento dos materiais, sendo necessário um modelo preciso, capaz de prever as taxas de remoção de água e descrever o desempenho de secagem de cada produto sob determinadas condições. Dincer & Dost (1995) desenvolveram modelos analíticos para caracterizar a transferência de massa durante a secagem de objetos apresentado geometria regular (placa, cilindro e esfera) no caso de difusão constante. Este modelo é mais simplificado que o modelo

difusivo baseado na segunda lei de Fick e leva à determinação de parâmetros considerados importantes para o projeto, simulação e otimização do processo de secagem.

A partir do uso do modelo da difusão, podem-se determinar as principais propriedades termodinâmicas envolvidas no fenômeno de desidratação, a exemplo da entalpia, da entropia e da energia livre de Gibbs. O conhecimento das propriedades termodinâmicas na secagem é importante fonte de informação para projetar equipamentos, calcular a energia requerida no processo, estudar as propriedades da água adsorvida e avaliar a microestrutura dos alimentos, bem como para o estudo dos fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos mesmos

Dentro deste contexto, a secagem da CL, com seu aporte de biomoléculas bioativas de excelente qualidade nutricionais, é um processo interessante de se estudar, sobretudo com o intuito de compreender a fenomenologia da transferência de massa e de encontrar variantes que levem a reduzir o tempo de processo e os custos de produção. Por estas razões, este estudo pretende avaliar a aplicabilidade do modelo analítico desenvolvido por Dincer & Dost (1995) utilizando os dados experimentais da secagem por RW de amostras sólidas e no formato de placa plana de CL e determinar os parâmetros de transferência de massa e as propriedades termodinâmicas envolvidas no processo de secagem.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Determinar parâmetros de transferência de massa e propriedades termodinâmicas que controlam o processo de secagem da *Curcuma longa* L. por Refractance Window a diferentes temperaturas, por meio aplicabilidade do modelo analítico desenvolvido por Dincer & Dost (1995).

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar a velocidade de secagem por RW das lâminas de CL com e sem aplicação do sistema auxiliar de exaustão;

Modelar o comportamento da cinética de secagem da CL por RW, utilizando modelo analítico desenvolvido por Dincer & Dost (1995);

Modelar o comportamento da cinética de secagem da CL por RW, utilizando a segunda lei de Fick proposta por Crank (1975) para uma placa plana, com base nas suposições de que a transferência de massa é apenas por difusão;

Avaliar o efeito da temperatura sobre as propriedades termodinâmicas e os parâmetros de transferência de massa;

3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1. AÇAFRÃO DA TERRA (*Curcuma Longa L.*)

3.1.1. Aspectos gerais

A *Cúrcuma longa L.* (CL) é uma matriz vegetal pertencente ao gênero *Curcuma* que compõe a família *Zingiberaceae*, que consiste em centenas de espécies de plantas que possuem rizomas e raízes subterrâneas como hastes (SCARTEZZINI & SPERONI, 2000). A CL é considerada uma especiaria aromática comum no continente indiano e nos países do Oriente Médio. A CL também apresenta excelente adaptação e produtividade em regiões tropicais. No Brasil a CL é amplamente difundida e popularmente conhecida como ‘açafirão’ ou ‘falso açafirão’ ou “açafirão da terra” (KUMAR et al., 2016).

No segmento alimentício, os rizomas da CL (Figura 01) depois de secos são moídos e transformados em pó para aplicação como corante natural e na formulação de ingredientes, ou então são submetidos a processos de extração, visando a obtenção óleos essenciais, que podem ser utilizados como antioxidante natural, em função da ação de algumas biomoléculas presentes das quais se destacam: curcumina, dimetoxi curcumina, curcumona, turmeronol A e turmeronol B (ANTUNES & ARAÚJO, 2000; SANTOS et al., 2003). A ação dos compostos fenólicos também encontrados na CL, mostram resultados promissores no controle do colesterol, úlceras gástricas e disfunções hepáticas (ISLAM, 2004). Na medicina, inúmeras são as utilizações da CL em função de suas biomoléculas, dentre as quais podem-se destacar as propriedades cicatrizante, antibacteriana e anti-inflamatória, e a ação contra determinados vírus e tumores, (ARAÚJO & LEON 2001). Uma outra aplicação interessante refere-se ao uso da CL é na agricultura como repelente natural a insetos e no controle de pragas (PEÑA et al. 2006; KUHN et al. 2006).



Figura 1. Rizomas de *Cúrcuma longa L.*

Estudos sobre a composição centesimal da CL mostram os polissacarídeos, em especial o amido, como o componente majoritário nessa matriz, em torno de 25 a 50%, seguido de proteína (10 a 25%), lipídeos (6 a 12%), cinzas e fibras (8 a 11%) respectivamente, com umidade variando entre 70 a 80% para a cúrcuma in natura (ALMEIDA, 2006; BRAGA, 2005; LEONEL & CEREDA, 2002; FILHO et al., 2000). Segundo esses estudos o conteúdo desses componentes varia em função do cultivo, local de plantio, práticas agrícolas, uso de fertilizantes, maturidade dos rizomas além do processamento final usado para a sua comercialização. Sendo o amido a reserva energética das plantas, ele passa a ser consumido na atividade metabólica durante a maturação, portanto, o teor de amido possivelmente se relaciona ao grau de maturação, (BRAGA et al., 2003; LEONEL & CEREDA, 2002).

3.2. SECAGEM

É uma realidade que o rizoma de CL tem sido cada vez mais utilizado na indústria alimentícia, tanto no plano mundial quanto no nacional, para diferentes finalidades, tais como: corante, aromatizante e ingrediente no preparo de temperos, laticínios e pratos prontos (ALMEIDA et al., 2008). Entretanto, como toda matriz vegetal, que em geral, são produtos altamente perecíveis e para ampliar sua vida de prateleira, necessitam de tratamento adequado e de processamento tão logo a coleta, exceto quando o destino é a comercialização in natura (BARBOSA-CÁNOVAS et al. 2005). No caso dos rizomas da CL é importante mencionar a sua elevada umidade (70 a 80%) o que os tornam altamente perecíveis, deste modo, para evitar prejuízos com a deterioração dos rizomas além de reações enzimáticas, químicas e microbianas, que podem afetar o prazo de validade e a qualidade dos produtos alguns processamentos são aplicados para manutenção da qualidade. Associado a essas questões cabe também mencionar que ao realizar o processamento, está se agregando valor a CL, que de matéria-prima perecível, passa a ser um produto com maior vida útil e com novas opções de consumo.

O processamento mais comum aplicado para a manutenção da qualidade e ampliação da vida útil de matrizes vegetais é a operação unitária de secagem (MUJUMDAR, 1987; BARBOSA-CÁNOVAS et al. 2005). A secagem ocupa um lugar muito importante na indústria em geral, especialmente na produção de alimentos. A finalidade de secar alimentos, até níveis nos quais a quantidade de água livre seja suficientemente baixa para que não possa ser utilizada pelos microrganismos ou participar em reações bioquímicas deteriorantes, é possibilitar períodos maiores de armazenamento com requisitos mínimos de embalagem e reduzir o custo de transporte (MUJUMDAR, 1987; OKOS et al., 1992; BARBOSA-CÁNOVAS et al. 2005).

Sob ponto de vista fenomenológico essa operação visa a remoção da água, ou de qualquer outro líquido na forma de vapor, para uma fase gasosa insaturada através de um mecanismo de vaporização térmica, numa temperatura inferior à de ebulição. Isto é realizado por meio do calor produzido artificialmente em condições cuidadosamente controladas de temperatura, umidade relativa e fluxo do agente secante. O ar é o meio mais utilizado como agente secante na secagem dos alimentos. O mesmo conduz calor ao alimento, provocando evaporação da água, sendo também o veículo para o transporte do vapor úmido do alimento (VAN ARSDEL et al., 1973; PARK et al., 2007; RATTI, 2009).

Devido a isso, essa operação incorpora os fenômenos simultâneos de transporte de calor e massa. A transferência de calor ocorre durante a evaporação da água removida da amostra sólida secando, enquanto a transferência de massa acontece durante a remoção da água da superfície da amostra, por meio de um agente secante externo que geralmente é o ar (VAN ARSDEL et al., 1973; PARK et al., 2007). Dentro deste contexto, a secagem da CL, com seu aporte de biomoléculas bioativas de excelente qualidade nutricionais, é um processo interessante de se estudar, sobretudo com o intuito de compreender a fenomenologia da transferência de massa e de encontrar variantes que levem a reduzir o tempo de processo e os custos de produção. Principalmente sobre os fatores que governam a velocidade desses fenômenos de transferência, tais como propriedades termodinâmicas do vapor d'água no material e no ar de secagem, temperatura e velocidade do ar de secagem, velocidade de difusão da água no material, espessura e superfície exposta para secagem, pois são parâmetros que determinam a taxa de secagem do sistema (VAN ARSDEL et al., 1973; PARK, 1998; BARBOSA-CÁNOVAS et al. 2005; RATTI, 2009).

Ainda na maior parte do mundo, a secagem da CL é realizada expondo o material ao ar livre, usando a energia solar (secagem natural), mas este método tem sérias desvantagens: é impossível controlar as condições climáticas do ar de secagem, o emprego de grandes áreas de secagem, gastos pelo emprego de mão de obra no processo de secagem, presença de insetos e roedores e pó, e que de certa forma afetam a qualidade sanitária da CL (LAKSHMI et al., 2018; CHATTOPADHYAY et al., 2004). Frente a esta situação, o emprego da secagem artificial, por meio de secadores é o mais conveniente para melhorar a qualidade do produto, desde o ponto de vista sanitário e nutritivo, já que os parâmetros de secagem são controlados, além de obter tempos de processamento mais curtos (PRASAD & VIJAY, 2005).

Para a secagem artificial de produtos biológicos existem três técnicas típicas que podem ser empregadas a saber (RATTI, C. 2001):

- Ar ou secagem de contato, onde o calor é transferido desde o agente secante ou desde uma superfície aquecida para a superfície do produto biológico. É muito comum nesta técnica o uso de mecanismos de transferência de quantidade movimento, visando o fluxo de fluidos sobre a superfície do produto biológico para retirar a umidade;
- Secagem a vácuo, onde a principal vantagem é obter uma grande velocidade de evaporação de água, a uma pressão reduzida, usando a condução ou radiação por contato, com uma superfície aquecida, para evaporar a água, a qual é retirada com uma bomba de vácuo.
- Secagem por sublimação (liofilização), onde o produto biológico previamente congelado é submetido a pressões muito baixas, promovidas por dispositivos mecânicos (bombas de vácuo) altamente eficiente em uma câmara selada. Depois de entrar em contato com as superfícies congeladas das placas e a pressões bem reduzidas, abaixo de 0,64 kPa, a água no estado sólido (gelo formado no congelamento) é sublimado e o vapor é removido do produto biológico pela bomba de vácuo.

É importante salientamos que a secagem por liofilização é geralmente considerada ideal para preservar biomoléculas termossensíveis, contudo, é um processo com um custo energético elevado e muito lento. A secagem a vácuo também é amplamente utilizada, mas apesar de possui alta taxa de secagem e o processamento ocorrer na ausência de oxigênio, o que pode melhorar a manutenção da qualidade e do conteúdo das biomoléculas presentes no produto seco, o seu custo é também razoavelmente alto (TAN et al., 2020).

A secagem por *Refractance Window* (RW) vem sendo bastante estudada como método alternativo para a secagem de produtos biológicos termossensíveis, por manter boa retenção dos compostos naturais, preservando qualidade do produto, podendo ser comparado a liofilização e também por apresentar boa taxa de transferência de massa, proporcionando menor tempo de secagem (ABONYI et al., 2001; NINDO et al., 2003; NINDO & TANG, 2007; OCHOA-MARTÍNEZ et al., 2012).

O método secagem por RW possui semelhanças com a secagem em tambor, uma vez que material a ser seco é disposto sobre uma superfície aquecida, onde ocorre a desidratação. A superfície aquecida fornece a energia necessária para a evaporação da água contida na amostra por meio dos mecanismos de transferência de calor por condução e convecção, ou radiação infravermelha sobre a superfície superior da amostra a ser seca. (ZOTARELLI, et al., 2015).

O processo de secagem por *Refractance Window* (RW) foi patenteado por Magoon em 1986, sendo uma técnica que utiliza energia térmica a partir da água quente, em temperaturas que variam de 60 a 98°C, para secar uma fina camada de material através da condução,

convecção e radiação infravermelha (ABONYI et al., 2001; NINDO & TANG, 2007). O aparato consiste basicamente de um reservatório contendo água quente que circula por canaletas. Sobre a superfície da água quente se encontra um filme de poliéster transparente especial (*Mylar*, do fabricante *DuPont*). Sobre a superfície desse filme, uma fina camada do produto a ser seco é uniformemente aplicada (NINDO & TANG, 2007). A Figura 2 mostra um esquema do equipamento industrial de Refractance Window, o qual apresenta um sistema de exaustão, para a remoção do vapor d'água.

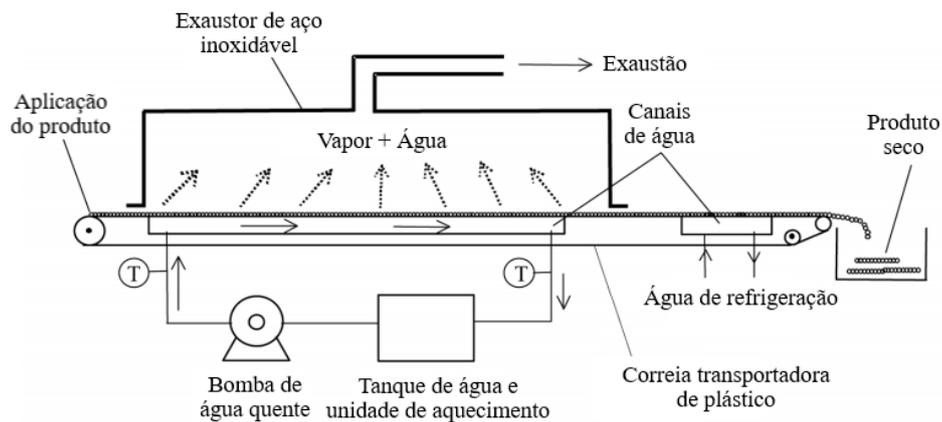


Figura 2. Esquema de equipamento industrial do Refractance Window

Fonte: NINDO & TANG (2007).

A Figura 3 mostra um esquema da maneira pela qual o calor é transferido da água quente circulante para o material a ser seco. Os três mecanismos de transferência de calor, condução (q_{cond}), convecção (q_{conv}) e radiação (q_{rad}), contribuem para a secagem (NINDO; TANG, 2007).

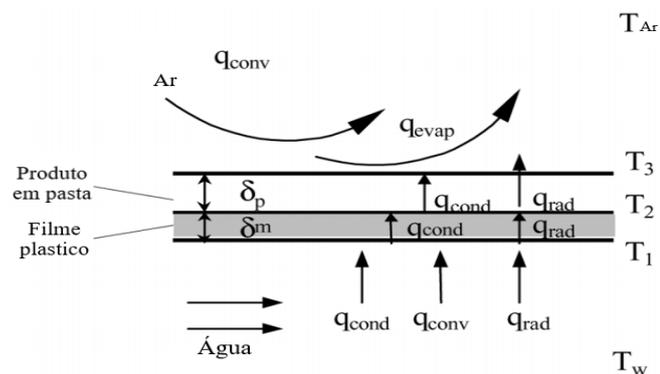


Figura 3. Diagrama da transferência de calor na secagem por Refractance Window

Fonte: NINDO & TANG (2007).

Esta técnica de secagem mantém a integridade dos alimentos e ingredientes no que diz respeito ao sabor, à cor e aos nutrientes e tem sido apontado como um processo potencialmente alternativo para a liofilização, spray drying e secagem em tambor, para a produção de pós e

flakes (NINDO et al., 2003). Além disso, o equipamento é simples e relativamente barato em comparação com outros tipos de sacadores. Para a secagem de uma quantidade semelhante de material, o custo de um equipamento de Refractance Window é cerca de um terço do custo de um liofilizador, e seu consumo de energia é inferior à metade (CASTOLDI et al. 2015; OCHOA-MARTÍNEZ et al., 2012).

A secagem por Refractance Window já foi aplicada para diversos tipos de alimentos, como: polpa de mirtilo (NINDO et al, 2004), polpa de tomate (CASTOLDI et al. 2015), polpa de açaí (PAVAN et al. 2012), fatias de manga (OCHOA-MARTÍNEZ et al., 2012), polpa de manga (CAPARINO et al., 2012; ZOTARELLI et al., 2015), purê de mamão (OCORO-ZAMORA; AYALA-APONTE, 2013), na secagem de fatias de cenouras (HERNÁNDEZ-SANTOS, et al. 2016) e mix de pupunha e tucupi (COSTA, et al. 2019). Após pesquisa na literatura constatou-se que são escassas as informações acerca da secagem de alimentos de origem vegetal por Refractance Window em sua forma sólida em camada delgada.

É importante salientamos que independentemente do método empregado na secagem de produtos biológicos o controle ótimo do processo de secagem é crítico e precisa de informações completas sobre o comportamento da matriz a ser seca frente as condições estabelecidas no processo visando proporcionar condições ótimas de taxa de remoção de água, isso por que dependendo da intensidade e dos efeitos da secagem, pode-se ter a perda ou inutilidade do produto para uma determinada função, seja ela alimentícia ou fármaco.

3.3. MODELAGEM MATEMÁTICA DE SECAGEM

Para minimizar efeitos adversos ou possíveis danos da operação de secagem é necessário ter um perfeito entendimento dos processos físicos envolvidos, e com este intuito, um vasto número de estudos tem sido conduzido para analisar o processo de secagem: uns consideram as condições externas do ar, tais como temperatura, umidade relativa e velocidade, relacionadas à taxa de secagem do produto a ser seco, enquanto outros consideram as condições internas do produto com ênfase nos mecanismos de movimento de umidade e seus efeitos sobre o mesmo. A utilização de modelos matemáticos para simular a secagem de alimentos é uma das alternativas adotadas para inimiziar os danos e custos envolvidos na operação de secagem (ERTEKIN & FIRAT, 2017; KUDRA & MUJUMDAR, 2009). Cabe também mencionar que a modelagem ou descrição matemática da evolução da cinética de secagem é uma excelente ferramenta no projeto de equipamentos.

A aplicação da modelagem matemática com intuito de predizer o processo de secagem tem sido objeto de inúmeros estudos por várias décadas (BEZERRA et al., 2015; ERTEKIN &

FIRAT, 2017). Sempre na tentativa de correlacionar dados experimentais da secagem de cada material particular a modelos matemáticos, que por sua vez podem ser divididos em teórico, semi teórico, empírico e modelos formalizados na termodinâmica dos processos irreversíveis.

A cinética de secagem de produtos biológicos em grande parte é descrita por modelos matemáticos teóricos e semi teóricos. Os modelos teóricos consideram as transferências de calor e massa na interface produto e ar de secagem e no interior do produto, sendo que, quando a resistência convectiva é desprezível comparando-se com a resistência difusiva, é possível considerar transferências somente no interior do produto (difusão). Já os modelos semi teóricos consideram somente a resistência externa à temperatura e a umidade relativa do ar (FARIA et al., 2012; RATTI, 2009). Dentre os modelos teóricos aplicados ao processo de secagem, o da difusão é o mais estudado (ARAÚJO et al., 2017; PARK et al., 2002; PARK, 1998), uma vez que este considera, como mecanismo principal, a difusão baseada na segunda Lei de Fick (Equação 1), que estabelece uma relação entre as taxas de variação temporal e espacial da concentração de água, por meio do coeficiente de difusão (Lisbôa et al., 2015; PARK et al., 2002; PARK, 1998).

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

Os modelos que empregam a teoria da difusão podem descrever de forma aceitável o perfil da distribuição de água no interior de determinado produto biológico desde que seja possível correlacionar sua forma à geometria de um sólido perfeito, além da exigência do estabelecimento de uma relação funcional entre o coeficiente de difusão, o teor de umidade e a temperatura. Crank (1975) desenvolveu várias soluções a partir da segunda Lei de Fick para condições de contorno e iniciais variadas, mas estas soluções restringem-se a materiais com geometrias simples como: placas, cilindros, cubos, esferas. Seus modelos também assumem as hipóteses: pequena redução no volume do sólido, difusividade constante ou variação linear ao longo da secagem. A solução truncada da Segunda Lei de Fick desenvolvida por Crank (1975) é expressa pela Equação 2.

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

Onde y é a distância de um ponto ao centro do sólido e a constante m assume o valor de 0 para o caso de placa plana e o valor de 1 para as formas cilíndrica e esférica. As soluções

analíticas da segunda lei de Fick para: placa infinita, cilindro infinito e esfera são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Modelos teóricos aplicados na modelagem de cinética de secagem.

Solução analítica da segunda lei de Fick (CRANK, 1975)	Geometria
$\frac{X_t - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{L^2}\right)$	(3) Placa plana
$\frac{X_t - X_e}{X_o - X_e} = 4 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2} \exp\left(- \frac{\mu_n^2 D_{\text{eff}} t}{R_p^2}\right)$	(4) Cilindro infinito
$\frac{X_t - X_e}{X_o - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(- n^2 \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{R_p^2}\right)$	(5) Esfera

De modo que: D_{eff} é coeficiente de difusão efetivo de massa ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); X_t é a umidade média do sólido no instante t , em base seca ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$); X_o e X_e são as umidades inicial e de equilíbrio do sólido, em base seca ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$) respectivamente; L é a espessura da camada (m); R_p é o raio da partícula esférica ou cilíndrica (m) e μ_n são raízes das funções.

Cabe mencionar que a partir do uso do modelo da difusão, podem-se determinar as principais propriedades termodinâmicas envolvidas no fenômeno de desidratação, a exemplo da entalpia, da entropia e da energia livre de Gibbs (ARAÚJO et al., 2017; NADI & TZEMPELIKOS, 2018; SANTOS, et al. 2020). O conhecimento das propriedades termodinâmicas na secagem é importante fonte de informação para projetar equipamentos, calcular a energia requerida no processo, estudar as propriedades da água adsorvida e avaliar a microestrutura dos alimentos, bem como para o estudo dos fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos mesmos (CORRÊA et al., 2010; SANTOS, et al. 2020).

Com relação aos modelos semi teóricos estes são baseados na lei de Newton, para o resfriamento, aplicados à transferência de massa. Quando se aplica essa lei, presume-se que as condições sejam isotérmicas e que a resistência à transferência de umidade se restrinja à superfície (RATTI, 2009; ERTEKIN & FIRAT, 2017). Os modelos semi teóricos são amplamente empregados em processo de secagem em camadas delgadas.

A secagem em camada delgada refere-se ao processo no qual o material a ser seco está inteiramente exposto ao ar que se move através dele; utiliza-se a Lei de Newton (Equação 6)

para representar a taxa de variação da temperatura de um corpo circundado por um fluido à temperatura constante (RATTI, 2009).

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

Onde ξ é a constante de resfriamento ou aquecimento ($K \cdot s^{-1}$); θ (K) é a temperatura do produto em qualquer tempo t e θ_e (K) é a temperatura do meio que envolve o produto. Esta equação é uma equação diferencial linear de primeira ordem, cuja solução pode ser obtida por separação de variáveis e posterior integração, resultando na equação exponencial mostrada a seguir:

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

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

Atualmente, são empregados muitos modelos semi teóricos para as análises de curvas de secagem, os quais derivam do resultado anterior, como por exemplos os apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Modelos semi teóricos aplicados na modelagem de cinética de secagem.

	Modelos		Referências
$M_R = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-kt^N)$	Modelo de Page	(9)	Martins et al., (2018)
$M_R = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-kt)$	Modelo de Lewis	(10)	Mghazli et al., (2018)
$M_R = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = a \cdot \exp(-kt)$	Modelo de Henderson-Pabis	(11)	Guiné et al., (2012)
$MR = \exp(n + kt)$	Modelo de Peleg	(12)	Ertekin & Firat (2017)

Onde MR é a razão de umidade (adimensional), k, k_1 e k_2 são as constantes de velocidade de secagem (s^{-1} , m^{-1} , h^{-1}), N e a são constantes do modelo.

3.4. PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DA SECAGEM

O conhecimento das propriedades termodinâmicas, em processos de secagem de produtos biológicos, é importante para projetar equipamentos de secagem, estudar as propriedades da água adsorvida, calcular a energia requerida neste processo e, ainda, avaliar a microestrutura dos alimentos e o estudo dos fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos alimentos (CORRÊA et al. 2010).

A termodinâmica é uma das abordagens utilizadas para a compreensão das propriedades da água e cálculo dos requisitos de energia associados ao calor e transferência de massa, em sistemas biológicos. Algumas propriedades termodinâmicas são utilizadas na análise do comportamento da secagem em sistemas biológicos que incluem por exemplo: entalpia, entropia e a energia livre de Gibbs (ARAÚJO et al., 2017).

A mudanças de entalpia fornecem uma medida da variação de energia, quando há interação das moléculas de água com os constituintes do produto, durante os processos de secagem. A entropia pode estar associada à ligação ou repulsão das forças no sistema e ao arranjo espacial da relação água-produto. Assim, a entropia caracteriza, ou define, o grau de ordem ou desordem existente no sistema água-produto (MCMINN et al. 2005).

A energia livre de Gibbs avalia a afinidade entre o produto e a água, podendo indicar se a saída de água do produto, durante o processo de secagem, é espontânea ou não. Quando positiva, indica a não espontaneidade do processo e, quando negativa, indica que o fenômeno ocorre espontaneamente (TELIS et al. 2000).

Existe na literatura especializada inúmeras pesquisas de secagem de matrizes vegetais (XANTHOPOULOS et al., 2009; DOYMAZ, 2013; CRUZ et al., 2015; OLANIPEKUN et al., 2015; UDOMKUN et al., 2015; BOTREL et al., 2016; REIS et al., 2017; DJEBLI, et al., 2019). Entretanto, não foram encontradas na literatura consultada referências acerca da secagem do Rizomas de *Cúrcuma longa L.* em camada delgada empregando a secagem por RW, bem como, pesquisas de modelagem matemática quanto de propriedades termodinâmicas utilizando os dados experimentais da secagem por RW.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. OBTENÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA E PROCESSAMENTO

Os rizomas de *Cúrcuma longa L* (CL) foram adquiridos no período de setembro a dezembro de 2019 na feira do Ver-o-Peso em Belém-PA e transportados no mesmo dia para o Laboratório de Medidas Físicas-UFPA para processamento. Os rizomas foram higienizados com solução de hipoclorito de sódio a 200 ppm por 10. Posteriormente foram secos a temperatura ambiente e cortados nas seguintes dimensões 2,0 x 1,0 x 0,2 cm, para posteriormente serem submetidos ao processo de secagem por Refractance Window (RW).

4.2. SECAGEM POR REFRACTANCE WINDOW (RW)

O equipamento operado em laboratório em escala de batelada foi construído usando o mesmo princípio descrito por Castoldi et al. (2015), com algumas modificações. O secador (Figura 4), consiste em um recipiente metálico (0,9 x 0,15 x 0,10 m) com circulação de água quente de um banho termostático (Quimis, Q214M2, Brasil), um controlador digital de temperatura PID (Minipa, MT 1044, Brasil) e 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. O equipamento possui um sistema de exaustão móvel utilizado para renovação do ar de secagem e remoção dos vapores de água gerados durante a secagem. Foi utilizado termômetro infravermelho (Infrared Thermometer B-MAX, China) para monitoramento da temperatura durante o processo. As temperaturas usadas durante a secagem foram 70, 80 e 90 °C. Para a secagem da amostra de CL, as lâminas delgadas na forma de placa planam foram depositadas sobre a superfície do filme de Mylar. A determinação do teor de água ao longo do processo feita por gravimetria, pesando-se as amostras em intervalo crescente de 5 min, até o tempo final de 70 minutos, utilizando uma balança semi-analítica (Shimadzu/Marte, UW-620H, Japão) com precisão de ± 0.001 g. A umidade inicial e a umidade de final do produto foram determinadas de acordo com a metodologia da AOAC No. 934,06 (AOAC, 1990) utilizando uma estufa a vácuo (Marconi, MA030, Brasil) e uma balança analítica (Shimadzu AY220, Japão) com precisão de ± 0.0001 g.

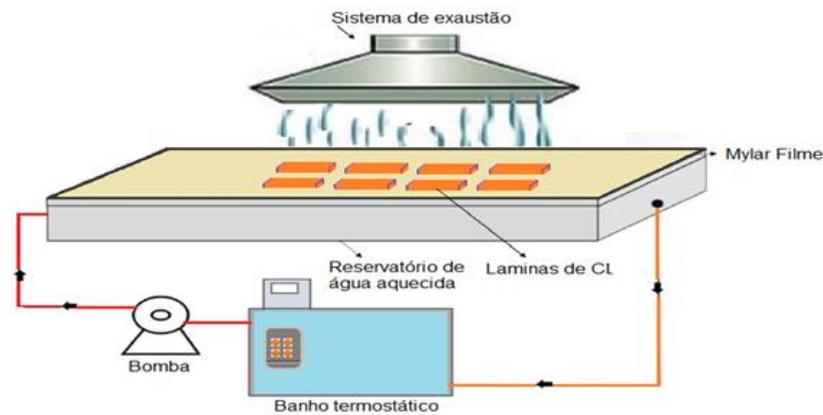


Figura 4. Diagrama esquemático do sistema de secagem por RW

4.3. ANÁLISE DE DADOS

O processo de difusão de umidade observado durante a operação de secagem é governado pelo mecanismo de difusão. Ao adotar uma série de suposições, por 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 da laje). (iv) existem resistências internas e externas finitas à transferência de umidade dentro dos sólidos (referindo-se a $0,1 < Bim < 100$). Sob essas condições, a equação da difusividade transitória da umidade em coordenadas cartesianas e na forma adimensional pode ser escrita da seguinte forma (AKPINAR & DINCER, 2005):

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = D \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \quad (13)$$

$$\phi = W - W_e \quad (14)$$

Onde ϕ é a diferença de teor de umidade (kg/kg d.b), D é difusividade da umidade (m^2/s), t é o tempo (s) e y é coordenada espacial.

A equação (13) está sujeita às seguintes condições iniciais e de contorno:

$$\phi(y, 0) = \phi_i = (W_i - W_e) = \text{Cte.} \quad (15)$$

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

$$-D \left(\frac{\partial \phi}{\partial L} (L, t) \right) = k_m [\phi(L, t) - \phi_o] \quad (17)$$

Onde $y = L$ é a espessura da placa (m) e k_m é o coeficiente de transferência de umidade, m/s

O teor de umidade adimensional (Φ) pode ser representado em termos de teor de umidade em qualquer ponto do objeto sólido como:

$$\Phi = \frac{W - W_e}{W_i - W_e} \quad (18)$$

A solução governada pela Eq. (13) com as condições de contorno produz distribuição de umidade central adimensional para o objeto (para detalhes, ver Dincer & Dost 1995, 1996):

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

A solução pode ser simplificada quando $F_o > 0,2$ forem insignificamente pequenos. Assim, a soma infinita na Eq. (19) é bem aproximado apenas pelo primeiro termo, isto é (DINCER & DOST, 1995):

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

Onde para a geometria da placa:

$$A_1 = \exp[0.2533Bi/(1.3 + Bi)] \quad (21)$$

$$B_1 = \exp(-\mu_1^2 F_o) \quad (22)$$

Durante a secagem de sólidos, a cinética do processo de remoção de umidade apresenta um comportamento com tendência exponencial decrescente. Dessa forma, Dincer & Dost (1996), propõem que os valores do conteúdo de umidade adimensional com o tempo podem ser expressos por um modelo exponencial da seguinte forma:

$$\Phi = G \exp(-St) \quad (23)$$

Onde o parâmetro G (adimensional) indica a resistência interna à transferência de umidade e o parâmetro S representa o coeficiente de secagem que mostra a capacidade de secagem de um objeto ou produto por unidade de tempo. Estes dois parâmetros são estimados por meio do ajuste da Eq. 23 aos dados experimentais da cinética de secagem.

Matematicamente ambas as Eqs. (20) e (23) estão na mesma forma e podem ser equacionadas. Portanto, tendo $A_1 = G$ e substituindo na Eq. (21) nos permite quantificar o número de Biot. Com B_i quantificado podemos então determinar o valor de μ_1 (a primeira raiz da equação transcendental), que para uma geometria no formato de placa plana é apresentada da seguinte forma Dincer & Dost (1996):

$$\mu_1 = a \tan(0.640443Bi + 0.380397) \quad (24)$$

Portanto, a partir dessas determinações a quantificação da difusividade efetiva de massa pode ser estimada pela seguinte equação:

$$D_m = \frac{SY^2}{\mu_1^2} \quad (25)$$

Os coeficientes de transferência de umidade (k_m) podem ser obtidos em termos do parâmetro G (adimensional) que indica a resistência interna à transferência de umidade usado quantificação do número Biot (Bi), sendo k_m definido como:

$$Bi = \frac{k_m \cdot L}{D_m} \quad (26)$$

Foi também testado neste estudo a solução analítica da Eq. (1) proposta por Crank (1975) para a modelagem matemática da secagem das amostras, com base nas suposições de que a transferência de massa é apenas por difusão, o coeficiente de difusão é constante, os efeitos de resistência externa desprezíveis e sem encolhimento. Assumindo o material com formato de lamina plana infinita, a secagem ocorrendo apenas por um dos lados e o conteúdo de umidade constante na superfície ($X(Y, t) = X(L, t) = X_{eq}$), a solução da Eq. (1) em termos do teor médio de umidade pode ser escrita como (CRANK, 1975):

$$\Phi = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \exp\left(- (2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_m t}{4L^2}\right) \quad (27)$$

Observa-se que a solução analítica da Eq. (1) se apresenta na forma de uma série infinita e, portanto, o número finito de termos (n). Assumindo o truncamento no primeiro termo da série temos então:

$$\Phi = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(- \frac{\pi^2 D_m t}{4L^2}\right) \quad (28)$$

Para avaliar a dependência de D_m com a temperatura neste estudo foi utilizada a equação de Arrhenius, descrita da seguinte forma:

$$D_m = D_o \exp\left(- \frac{E_a}{T_{abs}R}\right) \quad (29)$$

Onde E_a é a energia de ativação (kJ / mol), D_0 é o valor de difusividade para o teor infinito de umidade, R representa a constante universal de gás e T_{abs} é a temperatura absoluta (K). Ao traçar o diagrama $\ln(D_m)$ vs. $1/T_{abs}$, os coeficientes E_a e D_0 podem ser subsequentemente relacionados às condições de secagem do ar por meio de técnicas de análise de regressão não linear.

A determinação das propriedades termodinâmicas do processo de transferência de massa na secagem de CL por RW foi realizada pelo método desenvolvido por Jideani e Mpotokwana (2009) aplicando as seguintes equações:

$$\Delta H = E_a - RT_{abs} \quad (30)$$

$$\Delta S = \left(\ln D_0 - \ln \frac{k_B}{h_p} - \ln T_{abs} \right) \quad (31)$$

$$\Delta G = \Delta H - \Delta S \cdot T_{abs} \quad (32)$$

Onde ΔH é a entalpia diferencial, $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$; ΔS é a entropia diferencial, $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; ΔG é a energia livre de Gibbs, $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$; k_B é a constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$; e h_p é constante de Planck, $6,626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$.

4.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

As análises foram realizadas em triplicado ($n = 3$). Testes de significância dos resultados foram realizados usando uma análise de variância (ANOVA) fator único. Os parâmetros dos modelos analíticos proposto por Dincer & Dost (Eq. 23), por Crank (Eq 28) e a equação de Arrhenius (Eq. (29)) foram estimados utilizando o software Statistica for Windows 7.0 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, EUA). A qualidade de ajuste dos modelos propostos para os dados da cinética de secagem foi estimada por meio do coeficiente de correlação (R^2) e do parâmetro Qui-quadrado (χ^2).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A média do conteúdo de umidade inicial das amostras dos rizomas de *Cúrcuma longa* L (CL) in natura foi de 80.71 ± 1.12 % (b.u.). O conteúdo de umidade do produto seco do rizoma CL submetido as diferentes temperaturas de secagem (70, 80 e 90°C), variou de 20.81 a 17.34% (b.u.). O comportamento do conteúdo umidade adimensional com o tempo de secagem da amostra de CL para três diferentes temperaturas, bem como os valores estimados para o processo de secagem por RW pelo modelo proposto por Dincer & Dost (Eq. (23)) são mostradas nas Figuras 5 e 6. Pode ser visto que a mudança do conteúdo de umidade em diferentes temperaturas de secagem mostrou uma tendência similar, um decréscimo exponencial com o tempo de secagem, tanto para o sistema sem exaustão (Fig. 5), como também para o sistema com exaustão (Fig. 6), sendo bastante acentuado nos 10 minutos iniciais da secagem e reduzindo lentamente com o tempo de secagem. Isto significa que, no final da secagem, a influência da temperatura na cinética de secagem é menor do que no início e o transporte de umidade é controlado por fatores internos, ou seja, a natureza do material.

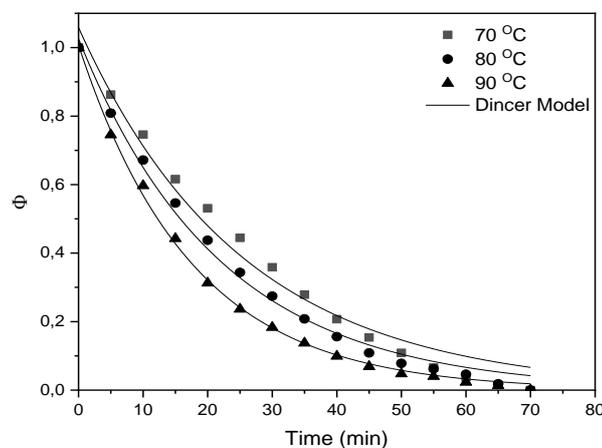


Figura 5. Experimental e predito conteúdo de umidade adimensional em função do tempo de secagem da amostra de CL para o sistema sem exaustão.

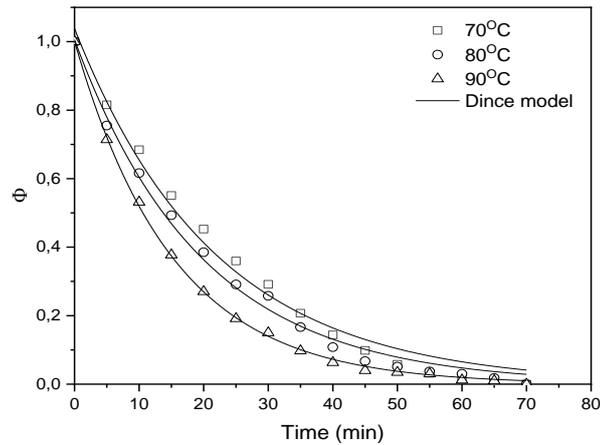


Figura 6. Experimental e predito conteúdo de umidade adimensional em função do tempo de secagem da amostra de CL para o sistema com exaustão.

Nas Figuras 7 e 8, se observa o comportamento das replicatas para a amostra de CL secas por RW (a 70°C) sem exaustão e com exaustão respectivamente. Constatou-se que o comportamento foi análogo para outras temperaturas (80 e 90°C) e que diferença média entre os valores da umidade adimensional (com valor de 0,002) é inferior ao erro da medida do adimensional de umidade (com valor de 0,003), o que comprova a reprodutibilidade dos experimentos de secagem no protótipo montado para esse estudo.

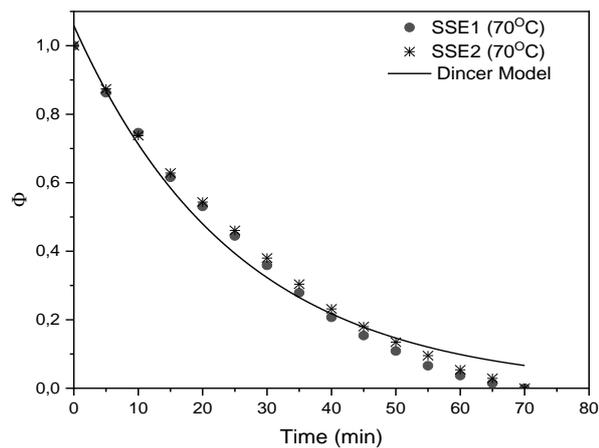


Figura 7. Experimental e predito conteúdo de umidade adimensional em função do tempo de secagem da amostra de CL para o sistema sem exaustão a 70°C.

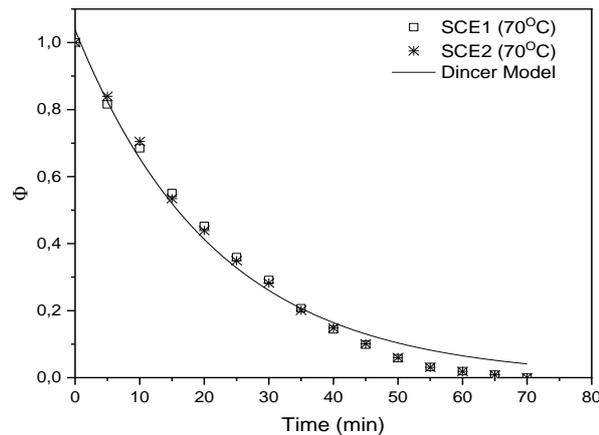


Figura 8. Experimental e predito conteúdo de umidade adimensional em função do tempo de secagem da amostra de CL para o sistema com exaustão a 70°C.

As Figuras 9,10 e 11 mostram as cinéticas de secagem das amostras de CL submetidas a secagem por RW sem exaustão e com exaustão. Constatou-se que a cinética das amostras de CL secas sem exaustão apresenta-se posicionada ligeiramente acima da curva das amostras de CL secas com exaustão, deixando claro que o sistema com exaustão teve uma pequena influência sobre a taxa de secagem da amostra de CL. Este resultado pode ser associado ao favorecimento causado pela exaustão forçada do ar sobre os mecanismos externos de transferência de massa principalmente nos 40 minutos iniciais do processo de secagem por RW. Comportamento similar foi observado por: Motta Lima et al. (2002) na secagem de laminas de papel artesanal; Resende et al. (2014) no processo de secagem convectiva de grão de sorgo, com velocidades do ar variando na faixa 0.5 a 1.0 m.s⁻¹.

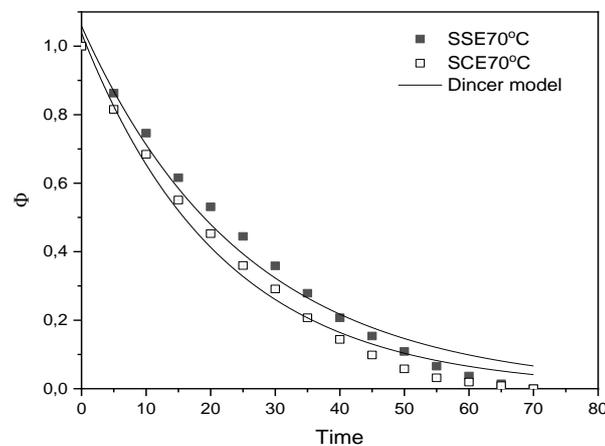


Figura 9. Experimental e predito conteúdo de umidade adimensional em função do tempo de secagem da amostra de CL para os ensaios sem exaustão (SSE) e com exaustão (SCE).

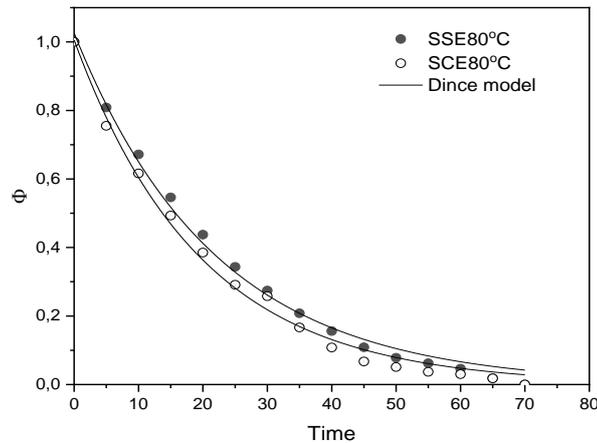


Figura 10. Experimental e predito conteúdo de umidade adimensional em função do tempo de secagem da amostra de CL para os ensaios sem exaustão (SSE) e com exaustão (SCE).

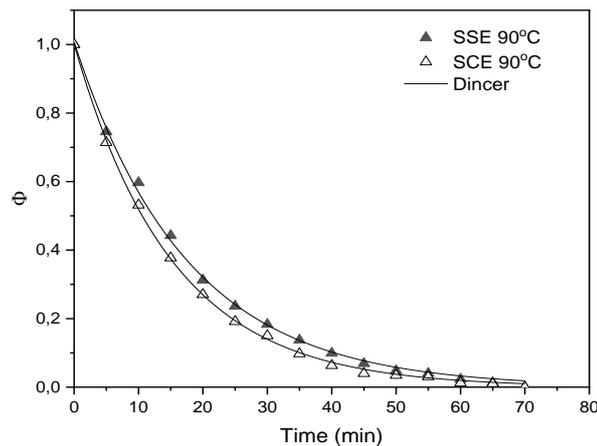


Figura 11. Experimental e predito conteúdo de umidade adimensional em função do tempo de secagem da amostra de CL para os ensaios sem exaustão (SSE) e com exaustão (SCE).

A qualidade do ajuste do modelo proposto por Crank (1975) como solução analítica da equação da difusão (Eq. 13) representado pela Eq. 28, é mostrada nas Figuras 12 e 13. Como podemos verificar para ambos os sistemas (com exaustão e sem exaustão) um descolamento acentuado do modelo proposto por Crank (1975) para placa plana (Eq. 28) nos 10 minutos iniciais do processo de secagem da CL por RW para as três temperaturas. Isto significa que, no início do processo de secagem da CL por RW o transporte de umidade é controlado por fatores externo que independe da natureza do material. Cabe também mencionar que associado a esse fator existe também a limitação matemática imposta pelo modelo.

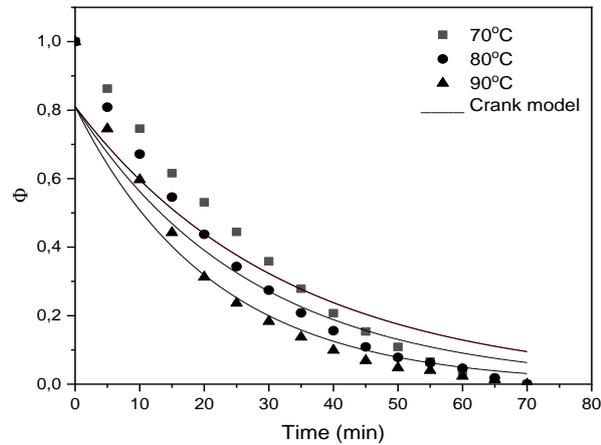


Figura 12. Experimentais e predito conteúdos de umidade adimensional em função do tempo de secagem da amostra de CL para o sistema sem exaustão.

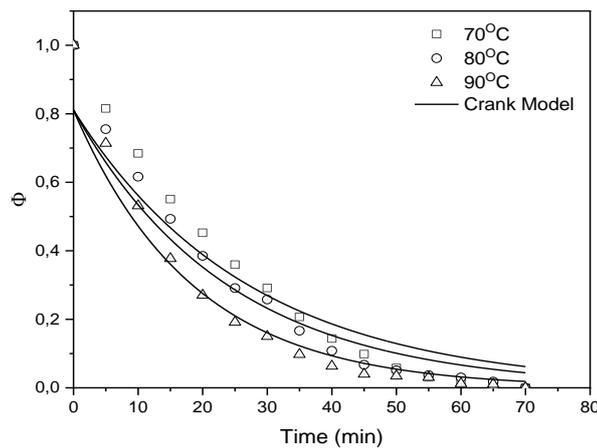


Figura 13. Experimentais e predito conteúdos de umidade adimensional em função do tempo de secagem da amostra de CL para o sistema com exaustão.

Os parâmetros G e S , estimados pelo ajuste não-linear do modelo de Dincer & Dost (Eq. 23), aos dados experimentais da cinética de secagem da CL submetida a secagem por RW sem exaustão e com exaustão, conforme detalhado anteriormente, e os parâmetros estatísticos: coeficiente de determinação (R^2) e Chi-quadrado (χ^2) são apresentados nas Tabelas 3 e 4. Pode-se notar que para o valor de S aumentou e o valor de G diminuiu com o aumento da temperatura tanto para ambos sistemas estudados. Comportamentos semelhantes foram também observado por Mrkić et al. (2007) na secagem convectiva de brócolis usando a mesma geometria; por Corzo et al. (2008) durante a secagem convectiva de fatias de manga em diferentes estágios de maturação e por Bezerra et al. (2015) na secagem de cascas de maracujá em camada delgada.

Verificou-se por meio da ANOVA fator único, a existência de feito significativo e positivo ($p < 0.05$), da temperatura somente sobre o parâmetro S. Em relação a aplicação do modelo de Dincer & Dost (Eq. 23), os altos coeficientes de determinação ($R^2 > 0.9799$) e os baixos valores de Chi-quadrado ($\chi^2 < 1.44 \times 10^{-3}$) indicam a adequação do ajuste do modelo aos dados experimentais (Tabelas 3 e 4).

Tabela 3. Parâmetros do Modelo Dincer & Dost obtidos na secagem de CL por RW sem exaustão.

Condições T(°C)	Coeficientes do Modelo		Parâmetros Estatístico	
	G	S (s ⁻¹)	R ²	χ^2
70	1.058 ± 0.036	0.040 ± 0.002	0.9799	2.30x10 ⁻³
80	1.026 ± 0.019	0.046± 0.001	0.9936	6.31x10 ⁻⁴
90	1.019 ± 0.010	0.057± 0.001	0.9983	1.57x10 ⁻⁴

Tabela 4. Parâmetros do Modelo Dincer & Dost obtidos na secagem de CL por RW com exaustão.

Condições T(°C)	Coeficientes do Modelo		Parâmetros Estatístico	
	G	S (s ⁻¹)	R ²	χ^2
70	1.038 ± 0.029	0.046 ± 0.002	0.9877	1.44x10 ⁻³
80	1.006 ± 0.020	0.051± 0.002	0.9939	6.18x10 ⁻⁴
90	1.001 ± 0.007	0.066± 0.006	0.9994	5.87x10 ⁻⁴

Usando o valor de G é possível calcular o número de Biot por meio da Eq. (21). Quanto ao número de Biot (Bi), que representa a relação entre a resistência interna e a resistência externa à transferência de massa (se, $0.1 < Bi_m < 100$) (BEZERRA, et al. 2015), pôde se verificar (Tabela 5) que na secagem do rizoma de CL por RW sem exaustão, os valores obtidos de Bi variaram entre 0.104 a 0.372, que indica a presença de resistência interna e externa à transferência de umidade no processo de secagem da CL por RW. Comportamento semelhante também foi observado por Shewale et al. (2019) na secagem convectiva de fatias de maçã, onde os valores de Bi variaram na faixa 0.128 a 0.594. Porém a mesma tendência não foi observada na secagem do rizoma de CL por RW com exaustão (Tabela 6), nas temperaturas 80 e 90 °C. Neste caso os valores de Bi obtidos foram $< 0,1$ o que indica que a resistência interna é menor que a maior resistência da superfície através da camada limite (resistência externa) à transferência de umidade. Verificou-se também, por meio da ANOVA fator único, a existência

de feito significativo e positivo ($p < 0.05$), da temperatura sobre B_i , como era esperado o aumento da temperatura favoreceu a diminuição da resistência interna e provocando uma secagem mais rápida da amostra de CL por RW. Isto demonstra do ponto de vista tecnológico uma vantagem do método de secagem por RW na qualidade final do produto, pois permite boa retenção dos compostos bioativos termossensíveis.

Tabela 5. Valores calculados dos parâmetros de transferência de massa para secagem de CL por RW sem exaustão.

Condições T(°C)	Parâmetros	
	B_{iot}	μ_1
70	0.372 ± 0.024	0.554 ± 0.011
80	0.147 ± 0.010	0.443 ± 0.052
90	0.104 ± 0.040	0.421 ± 0.025

Tabela 6. Valores calculados dos parâmetros de transferência de massa para secagem de CL por RW como exaustão.

Condições T(°C)	Parâmetros	
	B_{iot}	μ_1
70	0.224 ± 0.012	0.483 ± 0.013
80	0.031 ± 0.004	0.381 ± 0.010
90	0.011 ± 0.001	0.366 ± 0.025

Usando os valores de L , S e μ_1 a difusividade da umidade (D_m) foi então calculada a partir da Eq. (25). Posteriormente, os valores do coeficiente de transferência de umidade (k_m) foram calculados pela Eq. (26). Os valores calculados de difusividades (D_m) e coeficiente de transferência de umidade (k_m) para a secagem do rizoma de CL por RW sem exaustão e com exaustão são apresentados nas Tabelas 7 e 8 respectivamente. De acordo com os dados, o valor de D_m foi aumentado conforme o incremento de temperatura de 70 para 90 ° C para as amostras do rizoma de CL 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 da placa de CL, favorecendo a secagem (WANG et al., 2014). Além disso, outro fator que pode explicar o aumento do coeficiente de difusão efetivo é que, com a elevação

da temperatura, aumenta-se o nível de vibração molecular das moléculas de água, o que também contribui para uma difusão mais rápida.

A magnitude de D_m (Tabelas 7 e 8) é semelhante às aquelas relatadas por vários autores para diferentes produtos biológicos usando diferentes métodos de estimativa, como relatado por: Falade et al. (2007) encontraram valores de difusividade na faixa de $0,829 \times 10^{-6}$ - $1,12 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para secagem convectiva de Inhame (*Dioscorea alata*) entre 50 e 80 ° C e a velocidade do ar constante (1,5 m. s⁻¹); Mrkic et al. (2007) encontraram difusividades na faixa de $3,58 \times 10^{-6}$ - $1,07 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para fatias de brócolis secas a 60 e 80 ° C com uma velocidade de ar constante de 2,0 m / s, realizado em secador convectivo; Furtado et al. (2010) relataram valores de D_m de $1,99 \times 10^{-7}$ a $4,56 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ durante a secagem da polpa de seriguela usando o método da esteira de espuma a 70 - 80 ° C; Guiné et al. (2011) encontraram valores de difusividade na faixa de $4,08 \times 10^{-8}$ a $2,35 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para secagem convectiva de abóbora na faixa de temperatura de 30 ° C - 70 ° C; Afolabi, et al. (2014) encontraram difusividades na faixa de $5,27 \times 10^{-8}$ - $2,07 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ na secagem de fatias de coco na faixa de temperatura de 50 - 70 ° C para secagem por microondas. Srikanth et al. (2019) avaliando os efeitos das temperaturas na secagem convectiva com ar quente (40 a 70 ° C) em cubos de inhame (*Amorphophallus paeoniifolius*), encontraram D_m na faixa de $6,69 \times 10^{-8}$ - $3,41 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$; Bezerra et al. (2015) encontraram D_m na faixa de $1,05 \times 10^{-8}$ - $6,32 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ na secagem de cascas de maracujá na faixa de temperatura de 50 - 70 ° C. Por meio da ANOVA fator único constatou-se um efeito positivo significativo ($p < 0,05$) da temperatura sobre a difusividade da umidade.

O coeficiente k_m calculado pela Eq (26) variou de $6,73 \times 10^{-5}$ a $9,79 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ na secagem sem exaustão e de $0,51 \times 10^{-5}$ a $8,86 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ na secagem com exaustão. Os resultados de k_m encontrados neste estudo corroboram os achados da literatura para diferentes produtos biológicos e condições de secagem, como relatado por: McMinn et al. (2003) estudaram placas de batata submetidas a: secagem convectiva, secagem por microondas e secagem combinada por micro-ondas e convectiva, na faixa de temperatura de 50 - 70 ° C, encontrando k_m na faixa de $0,5 \times 10^{-2}$ a $0,328 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$. Mrkic et al. (2007) encontraram k_m na faixa de $1,921 \times 10^{-4}$ - $8,725 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ para fatias de brócolis secas na faixa de temperatura de 60 - 80 ° C. Mondaca et al. (2013) encontraram valores de k_m variando de $3,10 \times 10^{-7}$ a $6,05 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ na secagem de rodela de mamão em temperaturas entre 40 e 80 ° C. Bezerra et al. (2015) encontraram k_m na faixa de $4,53 \times 10^{-7}$ a $6,062 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ para secagem de casca de maracujá na faixa de temperatura de 40 a 60 ° C. Arranz et al. (2017) durante a secagem da cenoura em temperaturas que variam de 40 a 70 ° C, e valores de k_m na faixa de $1,20 \times 10^{-6}$ a $6,54 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$. A influência da temperatura no coeficiente de transferência de umidade foi positiva e

significativa ($p < 0,05$) para a temperatura variando entre 70 e 90 °C. Existem poucos estudos sobre a determinação de k_m do rizoma de CL na literatura, apesar da sua importância para a avaliação de processos de transferência de massa e/ou processos simultâneos de transferência de calor e massa, como é o caso de secagem.

Tabela 7. Valores calculados dos parâmetros de transferência de massa para secagem de CL por RW sem exaustão.

Condições T(°C)	Parâmetros	
	$D_m \times 10^7 \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$	$k_m \times 10^5 \text{ (m s}^{-1}\text{)}$
70	5.21 ± 0.019	9.79 ± 0.030
80	9.38 ± 0.022	6.88 ± 0.034
90	12.89 ± 0.139	6.73 ± 0.023

Tabela 8. Valores calculados dos parâmetros de transferência de massa para secagem de CL por RW com exaustão.

Condições T(°C)	Parâmetros	
	$D_m \times 10^7 \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$	$k_m \times 10^5 \text{ (m s}^{-1}\text{)}$
70	7.89 ± 0.013	8.86 ± 0.025
80	14.06 ± 0.020	2.21 ± 0.041
90	19.67 ± 0.049	0.51 ± 0.011

Os valores de difusividades (D_m) obtidos por meio do modelo de Crank (Eq. 28) na secagem do rizoma de CL por RW nos sistemas sem exaustão e com exaustão, bem como os parâmetros estatísticos: coeficiente de determinação (R^2) e Chi-quadrado (χ^2) são apresentados nas Tabelas 9 e 10 respectivamente. Em relação a aplicação do modelo de Crank, os altos coeficientes de determinação ($R^2 > 0.8973$) e os baixos valores de Chi-quadrado ($\chi^2 < 1.09 \times 10^{-2}$) indicam a adequação do ajuste do modelo aos dados experimentais (Tabelas 9 e 10). No entanto quando comparamos aos parâmetros estatísticos, obtidos pelo ajuste do modelo de Dincer & Dost aos dados experimentais verificamos que o modelo Dincer & Dost consegue prever o comportamento da secagem do rizoma de CL por RW nos sistemas sem exaustão e com exaustão com uma precisão em relação ao modelo de Crank. Porém cabe mencionar que a magnitude de D_m obtido pelo modelo de Crank (Tabelas 9 e 10) encontram-se dentro da faixa geral de $10^{-11} - 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para produtos biológicos (MASKAN et al. 2002; AGHBASHLO et al. 2008). Cabe também mencionar que os valores de D_m obtidos pelo modelo de Crank foram

menores que os quantificados pelo modelo de Dincer & Dost para ambos sistemas testados (Tabelas 7 e 8). ANOVA fator único revelou existir um efeito significativo ($p < 0,05$) na comparação das difusividades da umidade quantificadas pelos dois modelos matemáticos utilizados neste estudo. Associamos este comportamento ao fato do modelo de Crank considera somente a resistência interna à transferência de umidade no processo de secagem.

Tabela 9. Valores de D_m calculados por meio do modelo de Crank a para secagem de CL por RW sem exaustão.

Condições		Parâmetros	
T(°C)	$D_m \times 10^8 \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$	R^2	χ^2
70	4.97 ± 0.003	0.8973	1.09×10^{-2}
80	5.92 ± 0.003	0.9330	6.55×10^{-3}
90	7.57 ± 0.004	0.9518	4.44×10^{-3}

Tabela 10. Valores de D_m calculados por meio do modelo de Crank a para secagem de CL por RW com exaustão.

Condições		Parâmetros	
T(°C)	$D_m \times 10^8 \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$	R^2	χ^2
70	5.95 ± 0.008	0.9221	8.06×10^{-3}
80	6.76 ± 0.003	0.9456	5.14×10^{-3}
90	8.75 ± 0.004	0.9577	3.80×10^{-3}

Neste contexto e com base nos resultados obtidos anteriormente optou-se por utilizar os dados gerados pelo modelo de Dincer & Dost na determinação das propriedades termodinâmicas do processo de transferência de massa na secagem CL por RW

A energia de ativação (E_a) foi calculada usando a Eq. (29), e os resultados são apresentados na Fig. 14. Uma relação linear é observada entre a difusividade da umidade (D_m) e o inverso da temperatura absoluta. Assim, o efeito da temperatura sobre a D_m na secagem do rizoma de CL por RW nos sistemas sem exaustão e com exaustão pode ser representado respectivamente pelas seguintes equações:

$$D_m = 7.86 \exp\left(-\frac{5658.63}{T_{abs}}\right) \quad (33)$$

$$D_m = 13.54 \exp\left(-\frac{5704.48}{T_{abs}}\right) \quad (34)$$

A partir da inclinação de cada reta (Figura 14), foi determinado as energias de ativação na secagem do rizoma de CL por RW nos sistemas sem exaustão (47.05 kJ / mol) e com exaustão (47.43 kJ / mol). De acordo 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. Falade et al. (2007) relataram a energia de ativação na faixa de 41.75 –72.47 kJ / mol na secagem convectiva de fatias dos rizomas *Dioscorea alata* e *Dioscorea rotundata*.

O valor calculado da Ea para sistema com exaustão foi levemente superior ao valor calculado para Ea do sistema sem exaustão. Esse fenômeno pode estar associado a um leve aumento na velocidade do ar na camada limite formada na interface livre da amostra de CL em função da aplicação da exaustão no sistema de secagem. Resultado semelhante foi relatado por Chayjan et al. (2013) sobre o aumento na energia de ativação proporcionado pelo aumento da velocidade do ar. Similar comportamento foi relatado por Aghbashlo et al. (2008) sobre menor energia de ativação para frutas em baixa velocidade do ar.

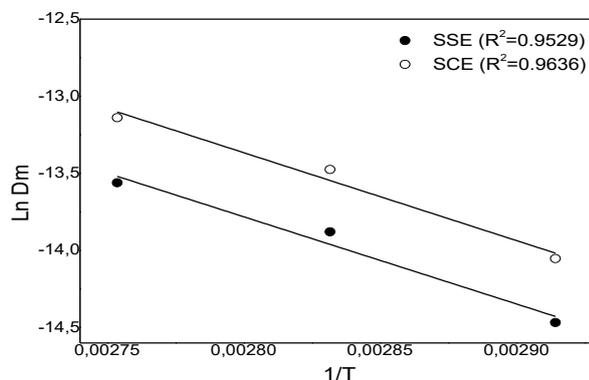


Figura 14. Relação entre $\ln(D_m)$ versus $1/T$ em diferentes sistemas de secagem de CL por RW. Secagem sem exaustão (●), Secagem com exaustão (○).

As propriedades termodinâmicas obtidas na secagem de CL por RW, nas diferentes temperaturas para o sistema sem exaustão e no sistema com exaustão, estão apresentados nas Tabelas 11 e 12 respectivamente. Os valores de entalpia (ΔH) foram positivos para ambos os sistemas, apontando para reações endergônicas, isto é, houve necessidade de energia na forma de calor para que o processo ocorresse. Entretanto essa demanda energética diminuiu de 44.193 para 44.026 kJ.mol⁻¹ no sistema sem exaustão e de 44.574 para 44.408 kJ.mol⁻¹, à medida que a temperatura de secagem aumentou, comportamento coerente ao reportado por outros

trabalhos na secagem de outros produtos agrícolas (SANTOS et al., 2020; RASHID et al. 2019; NADI & TZEMPELIKOS, 2018).

Tabela 11. Propriedades termodinâmicas obtidas para secagem de CL por RW sem exaustão.

Condições T(°C)	Parâmetros		
	ΔH (kJ.mol ⁻¹)	$\Delta S \times 10^2$ (kJ.mol ⁻¹ .K ⁻¹)	ΔG (kJ.mol ⁻¹)
70	44,193	-22.893	122.750
80	44,109	-22.917	125,041
90	44,026	-22.940	127,333

Todos os valores de entropia (ΔS) obtidos (Tabelas 11 e 12), relacionados à secagem da CL por RW foram negativos ($\Delta S < 0$), indicando 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 (LISBOA et al., 2019; FASINA, 2006; LIÉBANES et al., 2006; AJIBOLA et al., 2003; FASINA et al., 1997). Observa-se que os valores de ΔS decresceram com incrementos de temperatura e que a magnitude da ΔS do sistema sem exaustão foi levemente inferior aos valores da ΔS com exaustão (Tabelas 11 e 12). Essa diminuição de 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. Esse comportamento também pode ser associado 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. Iglesias et al. (1976) atribuíram os valores de entropia negativos à existência de adsorção química e / ou modificações estruturais do adsorvente. Rizvi & Benado (1983) atribuíram esse comportamento ao fato dos produtos conterem mais grupos polares, que se ligam mais fortemente à água. Valores negativos de entropia foram relatados na literatura para diferentes produtos tais como: bagaço de yacon *Smallanthus sonchifolius* (LAGO & NOREÑA, 2015) feijão (AJIBOLA, et al. 2003); batata-doce (FASINA, 2006) e microalga *Spirulina platensis* (OLIVEIRA et al. 2009).

Tabela 12. Propriedades termodinâmicas obtidas para secagem de CL por RW com exaustão.

Condições T(°C)	Parâmetros		
	ΔH (kJ.mol ⁻¹)	$\Delta S \times 10^2$ (kJ.mol ⁻¹ .K ⁻¹)	ΔG (kJ.mol ⁻¹)
70	44.574	-22.441	121.579
80	44.491	-22.464	123.824
90	44.408	-22.488	126.072

Observa-se que ao contrário de ΔH e ΔS energia livre de Gibbs (ΔG) aumentou com incrementos de temperatura, com valores passando de 122.750 a 127,333 kJ mol⁻¹, para o sistema sem exaustão e 121.579 a 126,072 kJ mol⁻¹ para o sistema com exaustão, na faixa de temperatura investigada. Os valores positivos da ΔG indicam que a secagem da CL por RW é um processo não espontâneo, ou seja, requer uma energia adicional do ambiente ao redor do produto para que ocorra a redução do teor de água. Nesse caso, a água aquecida é fonte da energia externa. Comportamento similar foi relatado anteriormente por Santos et al. (2020) no processo de secagem de fatias de goiaba; Lisboa et al. (2019) na secagem de feijão mulato (*Phaseolus vulgaris* L.); Souza et al. (2019) estudando o processo de desidratação do mesocarpo de pequi. Verifica-se também que ΔG para o sistema sem exaustão foi levemente superior ao valor de ΔG com exaustão. Nós associamos esse comportamento as correntes de fluxo do ar de exaustão que favoreceram a retirada de energia das amostras de CL secas por RW.

6. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo indicam que a secagem por RW é uma ferramenta poderosa no processo de secagem de tubérculos, como o rizoma *Cúrcuma longa* L. Verificou-se que o sistema com exaustão teve uma pequena influência sobre a taxa de transferência de massa durante a secagem da amostra de *Cúrcuma longa* L. O estudo mostrou também modelo desenvolvido por Dincer & Dost pode ser usado na predição da secagem da *Cúrcuma longa* L. usando RW, com boa precisão e confiança para calcular os parâmetros de transferência de massa D_m e K_m , dentro de faixas de outros produtos agrícolas e com altos coeficientes de determinação ($R^2 > 0.9799$) e os baixos valores de Chi-quadrado ($\chi^2 < 1.44 \times 10^{-3}$). A relação entre D_m e a temperatura pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que permitiu calcular a energia de ativação de 47.05 kJ / mol no sistema sem exaustão e de 47.43 kJ / mol no sistema com exaustão para a secagem da *Cúrcuma longa* L por RW. Constatou-se também as propriedades termodinâmicas na secagem da *Cúrcuma longa* L por RW, apontaram para um processo não espontâneo, com valores positivos de ΔH e ΔG , e valores negativos de ΔS . Os valores de ΔH e ΔS reduziram com a elevação da temperatura de secagem, enquanto que os valores de ΔG foram ampliados na faixa de temperatura avaliada (70 a 90 °C). Essas informações são úteis e podem ser aplicadas na simulação e otimização de processo da secagem da *Cúrcuma longa* L como fonte para obtenção de compostos bioativos importantes, corantes, vitaminas, minerais e amido presente no rizoma.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

ABONYI, B. I.; FENG, H.; TANG, J.; EDWARDS, C. G.; CHEW, B. P.; MATTINSON, D. S.; FELLMAN, J. K. Quality retention in strawberry and carrot purees dried with Refractance Window™ system. **Journal of Food Science**, v. 67, n. 3, p. 1051-1056, 2002.

AFOLABI, T.; TUNDE-AKINTUNDE, T.; OLANIPEKUN, B. F. Effect of drying conditions on energy utilization during cocoyam drying. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**. v. 16, p. 135-144, 2014.

AGHBASHLO, M.; KIANMEHR, M. H.; SAMIMI-AKHIJAHANI, H. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae). **Energy Convers Manag**, v. 49, p. 2865-2871, 2008.

AJIBOLA, O. O.; AVIARA, N. A.; AJETUMOBI, O. E. Sorption equilibrium and thermodynamic properties of cowpea (*Vigna unguiculata*). **Journal of Food Engineering**, v.58, p. 317-324, 2003.

AKPINAR, E. K.; DINCER, I. Moisture transfer models for slabs drying. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 32, p. 80-93, 2005.

ALMEIDA, L. P. Caracterização de pigmentos da *Curcuma longa* L., avaliação da atividade antimicrobiana, morfogênese *in vitro* na produção de curcuminóides e óleos essenciais. **Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Faculdade Faculdade de Farmácia, Belo Horizonte - MG**. 120 p., 2006.

ALMEIDA, L. P.; NAGHETINI, C. D. C.; NUNAN, E. D. A.; JUNQUEIRA, R. G.; GLÓRIA, M. B. A. Atividade antimicrobiana *in vitro* do rizoma em pó, dos pigmentos curcuminóides e dos óleos essenciais da *Curcuma longa* L. **Ciência e Agrotecnologia**. v. 32, p. 875-881, 2008.

ANTUNES, L. M. G. & ARAÚJO, M. C. P. Mutagenicidade e antimutagenicidade dos principais corantes para alimentos. **Revista de Nutrição**, v. 13, n. 2, p. 81-88, 2000.

AOAC. **Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists**. Association of official analytical chemists, Vol. 2, 15^a ed. 1990.

ARAUJO, C. A. C. LEON, L. L. Biological activities of *Curcuma longa* L. **Memórias do Instituto Oswaldo Cruz**, v. 96, n. 5, p. 723-728, 2001.

ARAUJO, 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. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 3, p. 448-457, 2017.

ARRANZ, F. J.; JIMENEZ-ARIZA, T.; DIEZMA B.; CORREA, E. C. Determination of diffusion and convective transfer coefficients in food drying revisited: A new methodological approach. **Biosystems Engineering**, v. 162, p. 30-39, 2017.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; ORTEGA-RIVAS, E.; JULIANO, P.; YAN, H. **Food powders: physical properties, processing, and functionality**. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, p. 271-304. 2005.

BEZERRA, C. V.; DA 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**, v. 85, p. 750-755, 2015.

BOTREL, D. A.; RODRIGUES, I. C. B.; SOUZA, H. J. B.; BARROS FERNANDES, R. V. Application of inulin in thin-layer drying process of araticum pulp. **LWT-Food Science and Technology**, v. 69, p. 32-39, 2016.

Braga, M. E. M. Obtenção de compostos bioativos de *Curcuma longa* L. e *Lippie alba* M. por tecnologia supercrítica: rendimento global, cinética de extração, composição química e aproveitamento do resíduo amiláceo. **Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, SP**. 232 p., 2005.

BRAGA, M. E.; LEAL, P. F.; CARVALHO, J. E.; MEIRELES, M. A. A. Comparison of yield, composition, and antioxidant activity of turmeric (*Curcuma longa* L.) extracts obtained using various techniques. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 51, n. 22, p. 6604-6611, 2003.

CAPARINO, O. A.; TANG, J.; NINDO, C. I.; SABLANI, S. S.; POWERS, J. R.; FELLMAN, J. K. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder. **Journal of food engineering**, v. 111, n. 1, p. 135-148, 2012.

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

CHATTOPADHYAY, I.; BISWAS, K.; BANDYOPADHYAY, U.; BANERJEE, R. K. Turmeric and curcumin: Biological actions and medicinal applications. **Current Science-Bangalore-**, v. 87, p. 44-53, 2004.

CHAYJAN, R. A.; SALARI, K.; ABEDI, Q.; SABZIPARVAR, A. A. Modeling moisture diffusivity, activation energy and specific energy consumption of squash seeds in a semi fluidized and fluidized bed drying. **Journal of Food Science and Technology**. v. 50, p. 667–677, 2013.

CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BOTELHO, F. M.; GONELI, A. L. D.; CARVALHO, F. M. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, v. 57, n. 5, p. 595-601, 2010.

CORZO, O.; BRACHO, N.; ALVAREZ, C.; RIVAS, V.; ROJAS, Y. Determining the moisture transfer parameters during the air-drying of mango slices using Biot–Dincer Numbers Correlation. **Journal of food process engineering**, v. 31, n. 6, p. 853-573, 2008.

COSTA, R. D. S.; RODRIGUES, A. M. C.; LAURINDO, J. B.; SILVA, L. H. M. Development of dehydrated products from peach palm–tucupi blends with edible film characteristics using refractive window. **Journal of Food Science Technology**. v. 56, p.560–570, 2019.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1975. 414 p.

CRUZ, A. C.; GUINÉ, R. P. F. GONÇALVES, J. C. Drying Kinetics and Product Quality for Convective Drying of Apples (cvs. Golden Delicious and Granny Smith). **International Journal of Fruit Science**. v. 15, p. 54–78, 2015.

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

DINCER, I.; DOST, S. An analytical model for moisture diffusion in solid objects during drying. **Drying Technology**, v. 13, n. 1-2, p. 425-435, 1995.

- DJEBLI, A.; HANINI, S.; BADAoui, O.; BOUMAHDi, M. A new approach to the thermodynamics study of drying tomatoes in mixed solar dryer. **Solar Energy**. v. 193, p. 164-174, 2019.
- DOYMAZ, I. Experimental study on drying of pear slices in a convective dryer. **International Journal of Food Science and Technology**. v. 48, p. 1909–1915, 2013.
- ERTEKIN, C.; FIRAT, M. Z. A. Comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. v. 57, p. 701-717, 2017.
- FALADE, K. O.; OLURIN, T. O.; IKE, E. A.; AWORH, O. C. Effect of pretreatment and temperature on air-drying of *Dioscorea alata* and *Dioscorea rotundata* slices. **Journal of Food Engineering**, v. 80, p. 1002-1010, 2007.
- FARIA, R. Q. D.; TEIXEIRA, I. R.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P.; RESENDE, O. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 573-583, 2012.
- FASINA, O. O. Thermodynamic properties of sweetpotato. **Journal of Food Engineering**, v. 75, n. 2, p. 149-155, 2006.
- FASINA, O.; SOKHANSANJ, S.; TYLER, R.. Thermodynamics of moisture sorption in alfalfa pellets. **Drying Technology**, v. 15, n. 5, p. 1553-1570, 1997.
- FILHO, A. B. C.; SOUZA, R. J. DE; BRAZ, L. T.; TAVARES, M. Cúrcuma: planta medicinal, condimentar e de outros usos potenciais. **Ciência Rural**. v. 30, p. 171-175, 2000.
- FURTADO, G. F.; SILVA, F. S.; PORTO A. G.; SANTOS, P. Drying of ceriguela pulp through the foam-mat drying method. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.12, p.9-14, 2010.
- GUINÉ, R. P. F.; HENRRQUES, F.; BARROCA, M. J. Mass transfer coefficients for the drying of pumpkin (*Cucurbita moschata*) and dried product quality. **Food and Bioprocess Technology**, v. 5, n. 1, p. 176-183, 2012.
- GUINÉ, R. P. F., PINHO, S.; BARROCA, M. J. Study of the convective drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*). **Food and Bioproducts Processing**, v. 89, p. 422-428, 2011.

HERNÁNDEZ-SANTOS, B.; MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, C. E.; TORRUCO-UCO, J. G.; RODRÍGUEZ-MIRANDA, J.; RUIZ-LÓPEZ, I. I.; VAJANDO-ANAYA, E. S.; CARMONA-GARCÍA, R.; HERMAN-LARA, E. Evaluation of physical and chemical properties of carrots dried by Refractance Window drying. **Drying Technology**, v. 34, n. 12, p. 1414-1422, 2016.

IGLESIAS, H. A.; CHIRIFE, J.; VIOLLAZ, P. Thermodynamics of water vapour sorption by sugar beet root. **Journal of Food Technology**, v. 11, p. 91–101, 1976.

ISLAM, M. A. Genetic diversity of the genus curcuma in bangladesh and further biotechnological approaches for in vitro regeneration and long-term conservation of *C. longa* germplasm. **Thesis (Doctor) - University of Hannover, Department of Biology**. 137 p., 2004.

JIDEANI, V. A.; MPOTOKWANA, S. M. Modeling of water absorption of botswana bambara varieties using Peleg's equation. **Journal of Food Engineering**, v.92, p.182-188, 2009.

KUDRA, T.; MUJUMDAR, A. S. **Advanced drying technologies**. CRC press, 2009.

KUHN, O. J.; PORTZ, R. L.; STANGARLIN, J. R.; DEL ÁGUILA, R. M.; SCHWAN-ESTRADA, K. R. F.; FRANZENER, G. Effect of aqueous extract from turmeric (*Curcuma longa*) on *Xanthomonas axonopodis* pv. *manihotis*. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 27, n. 1, p. 13-20, 2006.

KUMAR, A.; SINGH, M.; SINGH, P. P.; SINGH, S. K.; SINGH, P. K.; PANDEY, K. D. Isolation of plant growth promoting rhizobacteria and their impact on growth and curcumin content in *Curcuma longa* L. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 8, p. 1-7, 2016.

LAGO, C. C.; NOREÑA, C. P. Z. Thermodynamic analysis of sorption isotherms of dehydrated yacon (*Smallanthus sonchifolius*) bagasse. **Food bioscience**, v. 12, p. 26-33, 2015.

LAKSHMI, D. V. N.; MUTHUKUMAR, P.; LAYEK, A.; NAYAK, P. K. Drying kinetics and quality analysis of black turmeric (*Curcuma caesia*) drying in a mixed mode forced convection solar dryer integrated with thermal energy storage. **Renewable Energy**, v. 120, p. 23-34, 2018.

LEONEL, M.; CEREDA, M. P. Caracterização físico-química de algumas tuberosas amiláceas. **Food Science and Technology**, v. 22, p. 65-69, 2002.

Liébanes, M.D.; Aragón, J.M.; Palancar, M.C.; Areválo, G.; Jiménez, D. (2006). Equilibrium moisture isotherms of two-phase solid olive oil by-products: adsorption process

thermodynamics. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 282–283, 298–306.

LIEBANES, M. D.; ARAGON, J. M.; PALANCAR, M. C.; AREVALO, G.; JIMENEZ, D. Equilibrium moisture isotherms of two-phase solid olive oil by-products: Adsorption process thermodynamics. ***Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects***, v. 282, p. 298-306, 2006.

LISBOA, H. M.; ARAUJO, H.; PAIVA, G.; ORIENTE, S.; PASQUALI, MATHEUS; DUARTE, M. E.; CAVALCANTI, M. E. R. M. Determination of characteristic properties of mulatto beans (*Phaseolus vulgaris* L.) during convective drying. ***Journal of Agriculture and Food Research***, v. 1, p. 100003, 2019.

MARTINS, E. A. S.; GONELI, A. L. D.; GONCALVES, A. A.; HARTMANN FILHO, C. P.; SIQUEIRA, V. C.; OBA, G. C. Drying kinetics of blackberry leaves. ***Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental***, v. 22, p. 570-576, 2018.

MASKAN, A.; KAYA, S.; MASKAN, M. Hot air and sun drying of grape leather (pestil). ***Journal of Food Engineering***. v. 54, p. 81–88, 2002.

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***, v. 38, p. 505-510, 2005.

MCMINN, W. A. M.; KHRAISHEH, M. A. M.; MAGEE, T. R. A. Modelling the mass transfer during convective, microwave and combined microwave-convective drying of solid slabs and cylinders. ***Food Research International***. v.36 p. 977–983, 2003.

MGHAZLI, S.; OUHAMMOU, M.; HIDAR, N.; LAHNINE, L.; IDLIMAM, A.; MAHROUZ, M. Drying characteristics and kinetics solar drying of Moroccan rosemary leaves. ***Renewable Energy***, v. 108, p. 303-310. 2018

MONDACA R. A. L.; ZAMBRA, C. E.; GÁLVEZA, A. V.; MORAGA, N. O. Coupled 3D heat and mass transfer model for numerical analysis of drying processing papaya slices. ***Journal of Food Engineering***. v. 116, p. 109–117, 2013.

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

MRKIC, V.; UKRAINCZYK, M.; TRIPALO, B. Applicability of moisture transfer Bi–Di correlation for convective drying of broccoli. **Journal of Food Engineering**, v. 79, p. 640-646, 2007.

MUJUMDAR, A. S. **Advances in drying**. Vol. 4. CRC Press, 1987.

NADI, F.; TZEMPELIKOS, D. Vacuum drying of apples (cv. Golden Delicious): drying characteristics, thermodynamic properties, and mass transfer parameters. **Heat and Mass Transfer**, v. 54, n. 7, p. 1853-1866, 2018.

NINDO, C. I.; TANG, J.; POWERS, J. R.; BOLLAND, K. Energy consumption during Refractance Window evaporation of selected berry juices. **International Journal of Energy Research**, p. 1089-1100, 2004.

NINDO, C. I.; FENG, H.; SHEN, G. Q.; KANG, D. H. Energy utilization and microbial reduction in a new film drying system. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 27, p. 117-136, 2003.

NINDO, C. I.; TANG, J. Refractance window dehydration technology: a novel contact drying method. **Drying Technology**, v. 25, p. 37-48, 2007.

OCHOA-MARTÍNEZ, C. I.; QUINTERO, A. A.; AYALA, M. J.; ORTIZ-JEREZ, M. Drying characteristics of mango slices using the Refractance Window™ technique. **Journal of Food engineering**, v. 109, p. 69-75, 2012.

OCORO-ZAMORA, M. U.; AYALA-APONTE, A. A. Influence of thickness on the drying of papaya puree (*Carica papaya* L.) through Refractance Window™ technology. **Dyna**, v. 80, p. 147-154, 2013.

OKOS, M. R.; NARSIMHAN, G.; SINGH, R. K.; WEITNAUER, A. C. **Food Dehydration. Handbook of Food Engineering**. v. 1, p. 1-10, 1992.

OLANIPEKUN, B. F.; TUNDE-AKINTUNDE, T. Y.; OYELADE, O. J.; ADEBISI, M. G. ADENAYA, T. A. Mathematical Modeling of Thin-Layer Pineapple Drying. **Journal of Food Processing and Preservation**. v. 39 p. 1431–1441. 2015.

OLIVEIRA, E. G.; ROSA, G. S.; MORAES, M. A.; PINTO, L. A. A. Moisture Sorption Characteristics of Microalgae *Spirulina platensis*. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**. v. 26, p. 189 – 197, 2009.

Park, K. et al. Drying of pear d'Anjou with and without osmotic dehydration. **Journal of Food Engineering**. v. 56, p. 97–103, 2002.

PARK, K. J.; BIN, A.; BROD, F. P. R. Drying of pear d'Anjou with and without osmotic dehydration. **Journal of Food Engineering**, v. 56, n. 1, p. 97-103, 2003.

PARK, K. J. Diffusional model with and without shrinkage during salted fish muscle drying. **Drying Technology**, v. 16, p. 889-905, 1998.

PARK, K. J.; OLIVEIRA, R. A.; BROD, F. P. R. Drying operational parameters influence on chicory roots drying and inulin extraction. **Food and Bioproducts Processing**, v. 85, p. 184-192, 2007.

PAVAN, M. A.; SCHMIDT, S. J.; FENG, H. Water sorption behavior and thermal analysis of freeze-dried, Refractance Window-dried and hot-air dried açai (*Euterpe oleracea* Martius) juice. **LWT-FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY**, v. 48, p. 75-81, 2012.

BALBI-PEÑA, M. I.; ECKER, A.; STANGARLIN, J. R.; FRANZENER, G.; LOPES, M. C.; SCHWAN-ESTRADA, K. R. Controle de *Alternaria solani* em tomateiro por extratos de *Curcuma longa* e curcumina - II. Avaliação in vivo. **Fitopatologia Brasileira**. v. 31, p. 401 – 404, 2006.

PRASAD, J.; VIJAY, V. K. Experimental studies on drying of *Zingiber officinale*, *Curcuma longa* L. and *Tinospora cordifolia* in solar-biomass hybrid drier. **Renewable Energy**, v. 30, p. 2097-2109, 2005.

RASHID, M. T.; MA, H.; JATOI, M. A.; SAFDAR, B.; EL-MESERY, H. S.; SARPONG, F.; WALI, A. Multi-frequency ultrasound and sequential infrared drying on drying kinetics,

thermodynamic properties, and quality assessment of sweet potatoes. **Journal of Food Process Engineering**, v. 42, p. 13127, 2019.

RATTI, C. (Ed.). **Advances in food dehydration**. 467 p, 2009.

RATTI, C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. **Journal of food engineering**, v. 49, p. 311-319, 2001.

REIS, F. R.; IVAHASHI, M. M.; GUÉNIAT ROSA, A. H. Effect of vacuum drying temperature on drying kinetics, effective moisture diffusivity and quality of peeled litchi (*Litchi chinensis* Sonn.). **Journal of Food Process Engineering**, v. 40, n. 2, p. e12419, 2017.

RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; CHAVES, T. H.; BESSA, J. F. V. Kinetics and thermodynamic properties of the drying process of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) grains. **AFRICAN JOURNAL OF AGRICULTURAL RESEARCH**. v. 09, p. 2453-2462, 2014.

Rizvi, S. S. H.; Benado, A. L. (1983). Thermodynamic analysis of drying foods. *Food Technology*, 2, 471–502.

RIZVI, S. S. H.; BENADO, A. L. Thermodynamic analysis of drying foods. **Drying Technology**, v. 2, n. 4, p. 471-502, 1983.

SANTOS, M.; MELO, M.; JACOME, D.; FERREIRA, K.; HABERMEHL, G. Avaliação das lesões locais de cães envenenados experimentalmente com *bothrops alternatus* após diferentes tratamentos. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**. v. 55, p. 639–644, 2003.

SANTOS, N. C.; ALMEIDA, R. L. J., SILVA, G. M.; MONTEIRO, S. S.; ANDRÉ, A. M. M. C. N. Effect of ultrasound pre-treatment on the kinetics and thermodynamic properties of guava slices drying process. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**. v. 66, p. 102507, 2020.

SCARTEZZINI, P.; SPERONI, E. Review on some plants of Indian traditional medicine with antioxidant activity. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 71, n. 1-2, p. 23-43, 2000.

SHEWALE, S. R.; RAJORIYA, D. H.; HEBBAR, U. Low humidity air drying of apple slices: Effect of EMR pretreatment on mass transfer parameters, energy efficiency and quality. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**. v. 55, p. 1-10, 2019.

SOUZA, J. L.; OLIVEIRA, D. E.; PLÁCIDO, G. R.; EGEEA, M. B.; CALIARI, M.; SILVA, M. A. Thermodynamic and nutritional properties and drying kinetics of pequi (*Caryocar brasiliense* Cambess) mesocarp. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 9, p. 655-661, 2019.

SRIKANTH, K.S.; SHARANAGAT, V. S.; KUMAR, Y.; BHADRA, R.; SINGH, L.; NEMA, P. K.; KUMAR, V. Convective drying and quality attributes of elephant foot yam (*Amorphophallus paeoniifolius*). **LWT - Food Science and Technology**. v. 99, p. 8–16, 2019.

TAN, S.; WANG, Z.; XIANG, Y.; DENG, T.; ZHAO, X.; SHI, S.; ZHENG, Q.; GAO, X.; LI, W. The effects of drying methods on chemical profiles and antioxidant activities of two cultivars of *Psidium guajava* fruits. **LWT Food Science and Technology**. v. 118, p. 108723, 2020.

TELIS, V. R. N., GABAS, A. L.; MENEGALLI, F. C.; TELIS-ROMERO J. Water sorption thermodynamic properties applied to persimmon skin and pulp. **Thermochimica Acta**, v. 343, p. 49–56, 2000.

UDOMKUN, P.; ARGYROPOULOS, D.; NAGLE, M.; MAHAYOTHEE, B.; JANJAI, S.; MÜLLER, J. Single layer drying kinetics of papaya amidst vertical and horizontal air flow. **LWT - Food Science and Technology**. v. 64, p. 67-73, 2015.

VAN ARSDEL, W. B. COPLEY, M. J. MORGAN JR, A. I. **Food Dehydration**, Vol. 1: Drying Methods and Phenomena Hardcover, 2nd ed., p. 22–57, 1973.

WANG, C.; LIU, S.; WU, J.; LI, Z. Effects of temperature-dependent viscosity on fluid flow and heat transfer in a helical rectangular duct with a finite pitch. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 31, p. 787-797, 2014.

XANTHOPOULOS, G., YANNIOTIS, S., LAMBRINOS, G. Water diffusivity and dryingkinetics of air drying of figs. **Drying Technology**. v. 27, p. 502–512, 2009

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** v. 35, p. 370-390, 2012.

ZOTARELLI, M. F.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. Effect of process variables on the drying rate of mango pulp by Refractance Window. **Food Research International**, v. 69, p. 410-417, 2015.