UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA (PEQ-UFS)

AGEU ÍCARO DA SILVA BATISTA

APLICAÇÃO DE UM SECADOR CONVECTIVO ASSISTIDO POR AQUECIMENTO INFRAVERMELHO PARA A SECAGEM DE SEMENTES DE MARACUJÁ-AMARELO

(*Passiflora edulis* Sims f. *flavicarpa* Deg.**)**

São Cristóvão (SE)
2021

AGEU ÍCARO DA SILVA BATISTA

APLICAÇÃO DE UM SECADOR CONVECTIVO ASSISTIDO POR AQUECIMENTO INFRAVERMELHO PARA A SECAGEM DE SEMENTES DE MARACUJÁ-AMARELO

(*Passiflora edulis* Sims f. *flavicarpa* Deg.**)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Marcelo do Prado

São Cristóvão (SE)

2021

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

Batista, Ageu Ícaro da Silva
L586a Aplicação de um secador convectivo assistido por aquecimento infravermelho para a secagem de sementes de maracujá-amarelo / Ageu Ícaro da Silva Batista ; orientador Manoel Marcelo Prado. - São Cristóvão, 2021.
82 f. :il.

Dissertação (mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, 2021.

1. Secagem. 2. Radiação infravermelha. 3. Massa - Transferência. 4. Energia - Consumo. I. Prado, Manoel Marcelo, orient. II. Título.

CDU 66.047

AGEU ÍCARO DA SILVA BATISTA

APLICAÇÃO DE UM SECADOR CONVECTIVO ASSISTIDO POR AQUECIMENTO INFRAVERMELHO PARA A SECAGEM DE SEMENTES DE MARACUJÁ-AMARELO

(*Passiflora edulis* Sims f. *flavicarpa* Deg.**)**

Dissertação de Mestrado aprovada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Un00iversidade Federal de Sergipe em 26 de fevereiro de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Manoel Marcelo do Prado – Orientador
(PEQ/UFS)

Profª. Drª. Luanda Gimeno Marques
(DEQ/UFS)

Prof. Dr. Rodolfo Junqueira Brandão
(DEQ/UFAL)

Prof. Dr. Antônio Santo Silva
(PEQ/UFS)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, minha esposa, meus filhos, meus familiares, amigos e àqueles que contribuíram de certa maneira para que este fosse realizado.

AGRADECIMENTOS

Ao Grande Engenheiro da vida e de tudo, Deus, dono de toda sabedoria, toda honra e glória a Ti.

À minha mãe, Maria de Fátima, e ao meu pai, Antônio Batista, obrigado pelo amor e carinho, e por me ensinar as coisas da vida.

À minha esposa, Ingrid Tatiane, que esteve ao meu lado, dando apoio e lutando para que eu continuasse nesse desafio.

Ao Professor Doutor Manoel Marcelo Prado, por me acolher no seu grupo de pesquisa e por suas constantes orientações e ensinamentos.

Aos integrantes do grupo de pesquisa do Laboratório de Fenômenos de Transporte, em especial ao técnico Marcos, agradeço pelo auxílio e compartilhamento de informações.

Aos professores do PEQ-UFS, pelos ensinamentos.

Aos amigos e colegas, Adriano Max, Felipe Abreu, Gerson, José Valdo e Juliane, pelos momentos de descontração, pelas críticas e sugestões.

À Pomar do Brasil Indústria e Comércio de Alimentos Ltda e em especial à Camila, que faz parte dessa empresa, pela doação das sementes de maracujá.

A todos, que me ajudaram de certa forma, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho, muito obrigado!

RESUMO

Sementes de maracujá, resíduos das indústrias de processamento do fruto para a produção de suco e polpa congelada, constituem uma valiosa matéria-prima para reaproveitamento, seja para a propagação da espécie, seja como f\0onte não convencional de óleo, carboidratos, proteínas e minerais. Diante dos elevados volumes gerados de resíduos de sementes, agregar valor a estes subprodutos é de interesse econômico, científico e tecnológico. A secagem é um dos métodos de conservação mais comuns para processar e preservar sementes. Entretanto, o método convencional da secagem convectiva apresenta como grande desvantagem o alto consumo de energia. Assim, visando otimizar as condições térmicas e reduzir o gasto energético do processo, neste trabalho foi desenvolvido um secador híbrido baseado na convecção forçada de ar aquecido e no aquecimento infravermelho (IV), com monitoramento e aquisição online dos dados de temperatura do ar, temperatura da fonte, evolução da temperatura da superfície das sementes e da perda de massa da amostra. Os experimentos foram conduzidos com temperaturas da fonte IV de 50, 65 e 80°C, temperaturas do ar de 30, 40 e 50°C, e velocidades do ar de 1, 2 e 3 m/s. Para descrever a cinética de secagem o modelo difusivo foi ajustado aos dados experimentais. Os efeitos das variáveis do processo sobre a difusividade efetiva de umidade nas sementes de maracujá e sobre o consumo de energia do processo foram examinados. Na secagem combinada as temperaturas da fonte e do ar influenciaram significativamente a taxa de secagem e reduziram o tempo do processo em comparação com a secagem convectiva. A máxima difusividade mássica ($1{,}06 \times 10^{-10}$ m^2/s) foi observada em T_{IV} = 80°C, T_{ar} = 50°C e v_{ar} = 2 m/s, enquanto o consumo de energia mínimo em T_{IV} = 80°C, T_{ar} = 30°C e v_{ar} = 1 m/s. A incorporação do aquecimento IV à convecção forçada de ar quente intensificou a transferência de massa e reduziu o consumo de energia do processo, assegurando ainda a preservação da qualidade fisiológica do produto, sendo recomendada como condição ótima a combinação da maior temperatura da fonte com a menor temperatura do ar de secagem.

PALAVRAS-CHAVE: secagem combinada, radiação infravermelho, aquecimento convectivo, transferência de massa, consumo de energia

ABSTRACT

Passion fruits seeds, residues from processing industries to produce juice and frozen pulp are a valuable feedstock to be re-used as for specie propagation or as non-conventional source of oil, carbohydrates, proteins and minerals. Because of the great amounts of seeds in these residues, add value to this co-product is of economical, scientific and technological interest. Drying is one of the more traditional conservation methods for processing and preserving seeds. However, the convective drying technique has as main problem the high energy consumption. Thus, in order to optimize the thermal conditions and reduce the energy cost of the process, in this work a hybrid dryer based on the simultaneous hot air convection and infrared (IR) heating was developed, with on line monitoring and acquisition of air temperature, IR source temperature, seed temperature and loss of moisture from the sample. Experiments were performed with IR source temperatures of 50, 65 and 80°C, air temperatures of 30, 40 and 50°C, and air velocities of 1, 2 and 3 m/s. To describe the drying kinetics the diffusion model was fitted to the experimental data. The effects of process variables on the effective moisture diffusivity in passion fruit seeds and specific energy consumption (SEC) were examined. In combined drying the air and IR source temperatures affected significantly draying rates and decreased the process time in comparison to the convective drying. The maximum effective diffusivity (1,06 x 10^{-10} m^2/s) was observed t T_{IV} = 80°C, T_{ar} = 50ºC and v_{ar} = 2 m/s, while the mínimum SEC has occurred at T_{IV} = 80°C, T_{ar} = 30ºC and v_{ar} = 1 m/s. The incorporation of IR heating to the hot air convection intensified mass transfer and decreased the specific energy consumption of the process, ensuring preservation of physiological quality of the product, being suggested as optimal condition the combination of the highest IR source temperature with the lowest air temperature.

PALAVRAS-CHAVE: combined drying, infrared radiation, convective heating, mass transfer, energy consumption.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Equações semiempíricas utilizadas para descrever a secagem em camada fina. 34

Tabela 2-Dimensões, esfericidade, área superficial e volume das sementes com umidade de (0,354 ± 0,022). Kg 43

Tabela 3-Coeficiente de difusão efetiva para a secagem híbrida. 50

Tabela 4-Coeficiente de difusão efetiva para a secagem convectiva convencional. 58

Tabela 5-Dados do consumo energético da secagem convectiva convencional das sementes de maracujá em diferentes condições operacionais.....61

Tabela 6-Coeficiente de difusão para a secagem com radiação IV 63

Tabela 7-Dados do consumo energético da secagem com radiação IV das sementes de maracujá em diferentes condições operacionais. 64

Tabela 8-Viabilidade das sementes submetidas à secagem híbrida. 71

Tabela 9- Viabilidade das sementes submetidas à secagem convectiva convencional. 72

Tabela 10-Viabilidade das sementes submetidas à secagem com radiação IV. 72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Desenho das partes da semente do maracujá (A). Imagem das partes da semente do maracujá (B). 19

Figura 2-Diagrama do processo de secagem. 26

Figura 3-Característica espectral da radiação de corpo negro a diferentes temperaturas. 28

Figura 4-Representação conceitual da combinação de radiação infravermelho e ar quente. ... 31

Figura 5-Curvas típicas de secagem. 32

Figura 6- Desenho esquemático do secador experimental. 36

Figura 7-Fluxograma experimental. 37

Figura 8-Imersão das sementes em água. 38

Figura 9-Peneiras: (a) série de peneiras; (b) Sementes retidas nas peneiras. 38

Figura 10-Medição: comprimento (a), largura (b) e espessura (c). 39

Figura 11-Monocamada de sementes dispostas na bandeja. 40

Figura 12-Características de secagem de sementes de maracujá submetidas à secagem combinada em diferentes temperaturas da fonte IV, para temperatura do ar de 30°C e velocidade de 1 m/s. 45

Figura 13-Características de secagem de sementes de maracujá submetidas à secagem combinada em diferentes temperaturas do ar, para temperatura da fonte IV de 50°C e velocidade do ar de 3 m/s. 47

Figura 14-Características de secagem de sementes de maracujá submetidas à secagem combinada em diferentes velocidades do ar, para temperatura da fonte IV de 65°C e temperatura do ar de 30°C. 48

Figura 15-Diagrama de Pareto com os efeitos sobre a difusividade efetiva. 51

Figura 16-Superfície de resposta para a difusividade efetiva em função da temperatura do ar e da temperatura da fonte IV na velocidade do ar a 3 m/s. 52

Figura 17-Diagrama de Pareto com os efeitos dos fatores estudados sobre CEE. 54

Figura 18- Superfície de resposta para o consumo de energia específica. 55

Figura 19-Características de secagem de sementes de maracujá submetidas à secagem convectiva em diferentes temperaturas do ar, a uma velocidade do ar de 2 m/s (a) Umidade em função do tempo, (b) Evolução temporal da temperatura superficial, (c) Taxa de secagem em função da umidade. 56

Figura 20-Características de secagem de sementes de maracujá submetidas à secagem convectiva em diferentes velocidades do ar, a uma temperatura do ar de 40^{o}C. (a) Umidade em função do tempo, (b) Evolução temporal da temperatura superficial, (c) Taxa de secagem em função da umidade. 57

Figura 21-Diagrama de Pareto com os efeitos sobre a difusividade efetiva na secagem convectiva. 60

Figura 22-Superfície de resposta para a difusividade efetiva em função da temperatura e velocidade do ar na secagem convectiva. 60

Figura 23-Diagrama de Pareto com os efeitos dos fatores estudados sobre CEE na secagem convectiva. 61

Figura 24-Características de secagem de sementes de maracujá submetidas à secagem IV em diferentes temperaturas da fonte. (a) Umidade em função do tempo, (b) Evolução temporal da temperatura superficial, (c) Taxa de secagem em função da umidade. 62

Figura 25-Difusividade de umidade efetiva em função da temperatura da fonte IV. 64

Figura 26-Evolução da temperatura superficial das sementes de maracujá submetidas a diferentes métodos de secagem. 65

Figura 27-Curvas de umidade em função do tempo para a secagem convectiva convencional, secagem com radiação IV e para a secagem híbrida. 65

Figura 28-Curvas de taxa de secagem de sementes de maracujá sob condições de secagem convectiva convencional, secagem com radiação IV e secagem híbrida. 65

Figura 29-Difusividades mássicas efetivas em sementes de maracujá submetidas à secagem convectiva e à secagem combinada, em diferentes temperaturas do ar e da fonte IV. (a) v_{ar} = 1 m/s; (b) v_{ar} = 3 m/s. 67

Figura 30-Tempo requerido para atingir o teor de umidade alvo das sementes de maracujá quando submetidas à secagem convectiva e à secagem combinada, em diferentes temperaturas do ar e da fonte IV. (a) v_{ar} = 1 m/s; (b) v_{ar} = 3 m/s. 68

Figura 31-Consumo específico de energia dos processos de secagem convectiva e secagem combinada, em diferentes temperaturas do ar e da fonte IV. (a) v_{ar} = 1 m/s; (b) v_{ar} = 3 m/s... 69

Figura 32-Sementes de maracujá após teste com tetrazólio. (a) Semente não viável. (b) Semente viável. 71

NOMENCLATURA

a	Parâmetro da equação de Henderson e Pabis	[-]
A_S	Área superficial da semente	$[L^2]$
A_T	Área da seção transversal de escoamento do ar	$[L^2]$
c	Velocidade da luz	$[LT^{-1}]$
CEE	Consumo específico de energia	$[EM^{-1}]$
Cp_{ar}	Calor específico do ar	$[EM^{-1}\theta^{-1}]$
dp	Diâmetro da esfera equivalente	[L]
D_{ef}	Difusividade de umidade efetiva	$[L^2T^{-1}]$
E	Emissividade total de um corpo	$[ET^{-1}L^{-2}]$
E_b	Poder Emissivo de um corpo negro	$[ET^{-1}L^{-2}]$
E_λ	Poder emissivo espectral de um corpo negro	$[ET^{-1}L^{-2}\lambda^{-1}]$
h	Constante de Plank	[ET]
K	Constante de secagem	$[T^{-1}]$
K_P	Constante de secagem da equação de Page	$[T^{-p}]$
l	Comprimento da semente	[L]
m_w	Massa de água evaporada	[M]
n	Número de termos da série de Fourier	[-]
p	Parâmetro da equação de Page	[-]
P_{cooler}	Potência elétrica requerida pelo *cooler*	$[ET^{-1}]$
P_{IV}	Potência elétrica requerida pela fonte IV	$[ET^{-1}]$
P_{resist}	Potência elétrica requerida para aquecimento do ar	$[ET^{-1}]$
t	Tempo	[T]
t_s	Tempo de secagem	[T]
T_{ar}	Temperatura do ar	[θ]
T_{IV}	Temperatura da fonte de radiação infravermelho	[θ]
T_K	Temperatura absoluta, em Kelvin	[θ]
T_S	Temperatura da superfície da semente	[θ]
v_{ar}	Velocidade superficial do ar	$[LT^{-1}]$
V_p	Volume da partícula	$[L^3]$

w	largura da semente	[L]
X	Teor de umidade em um dado tempo	$[M_{água}M_{sól.seco}^{-1}]$
X_{eq}	Teor de umidade de equilíbrio	$[M_{água}M_{sól.seco}^{-1}]$
X_0	Teor de umidade inicial	$[M_{água}M_{sól.seco}^{-1}]$
XR	Adimensional de umidade	[-]
z	Direção espacial na qual ocorre o transporte de umidade	[L]

Símbolos Gregos

α	absortividade	[-]
β	Refletividade	[-]
ΔT	Variação de temperatura do ar no aquecedor	[θ]
δ	Espessura da semente	[L]
δ^*	Semiespessura	[L]
ε	Emissividade de um corpo	[-]
ϕ	Esfericidade da partícula	[-]
κ	Constante de Boltzmann	$[E\theta^{-1}]$
λ	Comprimento de onda	[L]
$\lambda_{máx}$	Comprimento de onda no qual a emissão é máxima	[L]
ρ_{ar}	Massa específica do ar	$[ML^{-3}]$
σ	Constante de Stephan-Boltzmann	$[E\ T^{-1}L^{-2}\theta^{-4}]$
τ	transmissividade	[-]

Abreviações

b.s.	Base seca	[-]
b.u.	Base úmida	[-]
IV	Infravermelho	[θ]

SUMÁRIO

RESUMO 7

ABSTRACT 8

LISTA DE TABELAS 9

LISTA DE FIGURAS 10

NOMENCLATURA 12

1. INTRODUÇÃO 17

2. REVISÃO DA LITERATURA 19

2.1 SEMENTE DO MARACUJÁ-AMARELO 19

2.1.1 Descrição da semente 19

2.1.2 Propagação 20

2.1.3 Armazenamento 20

2.1.4 Aproveitamento 22

2.2 QUALIDADE FISIOLÓGICA 23

2.2.1 Germinação 23

2.2.2 Vigor da semente 24

2.2.3 Teste de tetrazólio 24

2.3 SECAGEM 25

2.3.1 Breve histórico da secagem e definição 25

2.3.2 Secagem convectiva 26

2.3.3 Secagem via radiação infravermelha 27

2.3.4 Secagem híbrida 30

2.4 CINÉTICA DE SECAGEM 31

2.5 CONSUMO ENERGÉTICO DO PROCESSO DE SECAGEM 34

3. MATERIAIS E MÉTODOS 36

3.1 MATERIAIS 36
3.2 EQUIPAMENTO 36
3.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL 37
3.3.1 Preparação do material 38
3.3.2 Análise granulométrica das sementes 38
3.3.3 Medição das dimensões da semente 39
3.3.4 Experimentos de secagem 39
3.3.5 Descrição da cinética de secagem 40
3.3.6 Avaliação energética do processo 41
3.3.7 Avaliação da viabilidade fisiológica das sementes 42
3.3.8 Análise estatística 42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 43
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS SEMENTES DE MARACUJÁ 43
4.2 SECAGEM HÍBRIDA 44
4.2.1. Cinética de secagem 44
4.2.2. Difusividade mássica efetiva 49
4.2.3. Consumo específico de energia 52
4.3 SECAGEM CONVECTIVA 56
4.3.1. Cinética de secagem 56
4.3.2. Difusividade mássica efetiva 58
4.3.3. Consumo específico de energia 60
4.4 SECAGEM INFRAVERMELHO 62
4.4.1. Cinética de secagem 62
4.4.2. Difusividade mássica efetiva 63
4.4.3. Consumo específico de energia 64
4.5 ANÁLISE COMPARATIVA DA SECAGEM HÍBRIDA, DA SECAGEM CONVECTIVA E DA SECAGEM INFRAVERMELHO 64

4.5.1. Cinética dos processos.....65
4.5.2. Difusividade efetiva 67
4.5.3. Tempo e consumo de energia dos processos.....68
4.6 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DAS SEMENTES.....70
5. CONCLUSÕES.....73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....75

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor e consumidor de maracujá amarelo processado do mundo, sendo responsável por cerca de 50% da produção mundial total. A produção de suco concentrado tem o impacto econômico mais importante para o mercado do maracujá amarelo, à medida que a demanda mundial vem continuamente crescendo (ARAÚJO *et al.*, 2020). No estado de Sergipe, além da indústria de suco concentrado, ganha destaque também as pequenas indústrias para a produção da polpa congelada do maracujá. Tanto a produção do suco como a produção da polpa geram uma grande quantidade de sementes residuais, que representam de 4 a 12% da massa total da fruta.

O crescimento da indústria de processamento do maracujá amarelo tem resultado num aumento do volume gerado de resíduos, o que tem despertado o interesse por um adequado reaproveitamento, seja para contribuir para a preservação ambiental, seja para oferecer uma extensa variedade de subprodutos, que podem ser utilizados na agroindústria, nas indústrias de alimentos e farmacêutica. Trabalhos encontrados na literatura (ARAÚJO *et al.*, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2016) reportam o potencial das sementes para atuar como uma fonte não convencional de óleo, fibras e minerais.

À medida que as sementes beneficiadas podem se tornar produtos de alto valor agregado nos ramos agrícola, alimentício, e cosmético, as pesquisas devem ser intensificadas para obter informações que deem suporte a um planejamento estratégico do processamento e armazenamento destes resíduos. Dentre as etapas de beneficiamento destas sementes, a secagem constitui uma de fundamental importância para a redução do seu alto teor de umidade, para níveis considerados adequados para o seu armazenamento seguro ou novo processamento. A eficiência de outras operações de processamento, como moagem e extração do óleo das sementes, depende da qualidade do produto seco. Entretanto, a influência do processo de secagem tem sido largamente ignorada nos sistemas de aproveitamento de resíduos. Neste sentido, a realização de estudos que viabilizem o desenvolvimento de secadores e o conhecimento de condições óptimas de operação é essencial para a preservação das qualidades física, química e fisiológica, condição esta indispensável para a sua valorização como subproduto da indústria de alimentos.

A secagem, no entanto, é uma etapa muito intensiva em energia. A necessidade de agregar valor aos produtos num custo competitivo requer investigações sobre técnicas eficientes de secagem. Para materiais agrícolas como as sementes de maracujá, a secagem convectiva é

ainda hoje a mais empregada e reportada na literatura (VÁQUIRO *et al*., 2016; CARLESSO *et al.*, 2008). Entretanto, esta técnica apresenta baixa eficiência energética e tempos de processo relativamente longos, devido à baixa condutividade dos materiais e à impermeabilização da sua superfície (“case hardening”).

A otimização das condições térmicas, através da combinação de vários modos de transferência de calor para a secagem de diversos tipos de materiais, tem constituído um campo ativo de pesquisa e desenvolvimento, diante da necessidade de reduzir custos energéticos do processo e da crescente preocupação em assegurar a qualidade do produto e reduzir o impacto ambiental.

Dentro desse contexto, uma técnica alternativa e que tem se mostrado bastante promissora envolve a aplicação contínua ou intermitente da radiação infravermelho acoplada com o aquecimento convectivo. A secagem híbrida tem sido reportada por muitos autores como uma técnica capaz de produzir produtos de alta qualidade com menor consumo de energia e menor tempo que a secagem convectiva convencional. Isto em razão dela combinar o aquecimento IV altamente eficiente e rápido e a excelente capacidade desumidificante da secagem convectiva.

Uma grande variedade de produtos tem sido desidratada utilizando este método de secagem, tais como: sementes de melancia (OLIVEIRA *et al.*, 2020), pólen apícola (BRANDÃO *et al*., 2015), batata-doce (ONWUDE *et al*., 2019), goiaba chilena (PUENTE-DÍAZ *et al*., 2013), lulas secas desfiadas (WANG *et al*., 2014) e argila (HAMMOUDA *et al*., 2014). Apesar do grande número de trabalhos sobre a secagem combinando a radiação IV e a convecção forçada de ar aquecido, informações sobre sua aplicação para secar sementes de maracujá não são reportadas na literatura ainda.

Logo, os objetivos do presente trabalho foram: i) adequar a unidade de secagem IV existente no LFTSP/UFS, tendo em vista incorporar um sistema de convecção de ar aquecido, devidamente instrumentado, que possibilite o monitoramento de importantes variáveis do processo, como a temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, bem como temperatura da fonte, que permita a realização de estudos sobre a secagem híbrida; ii) investigar as características de secagem de sementes de maracujá amarelo ao combinar o aquecimento IV e o aquecimento convectivo, avaliando como a cinética de secagem, o consumo de energia do processo e a qualidade do produto são afetados pela temperatura da fonte IV, pela temperatura e velocidade do ar; iii) comparar o desempenho do secador híbrido com o secador convectivo convencional.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 SEMENTE DO MARACUJÁ-AMARELO

2.1.1 Descrição da semente

A família Passifloraceae apresenta 12 gêneros e em torno de 600 espécies com distribuição tropical nas Américas e na África e tem como umas das principais espécies o maracujazeiro-amarelo (*Passiflora edulis* Sims. *f. flavicarpa* Deg) (COSTA *et al*., 2011). Em virtude do vasto número de espécies do gênero *Passiflora*, o Brasil torna-se um dos principais centros de diversidade genética desse gênero (ZANINI *et al.*, 2016).

Segundo Lima e Cunha (2004) as sementes da família Passifloraceae são compridas, de formato oval, com tegumento rígido e consistente, podendo ter estrias ou pequenas cavidades. A Figura 1 (A) mostra um desenho da semente do maracujá, apresentando a sua composição, como o ápice, onde fica localizado o corno apical, margem, corpo seminal e base. A Figura 1 (B) exibe a parte interna da semente, indicando a radícula e zona micropilar.

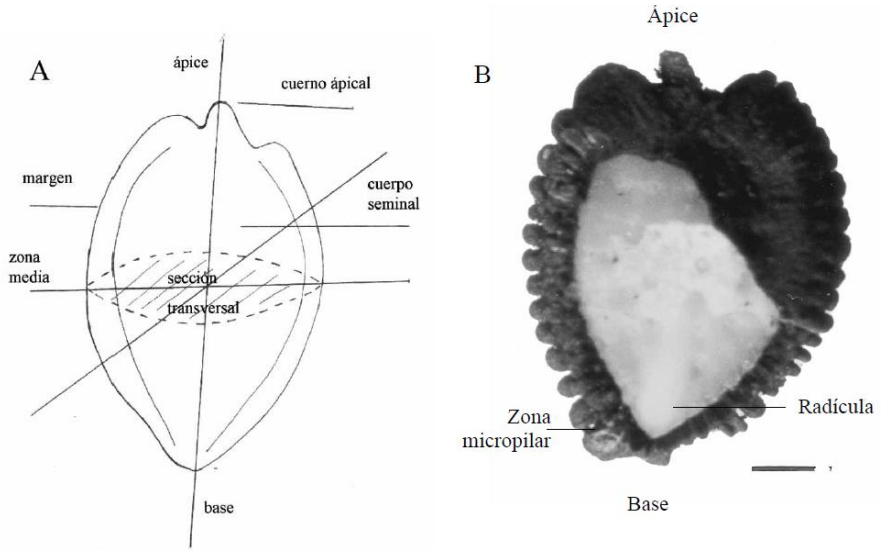


Figura 1-Desenho das partes da semente do maracujá (A). Imagem das partes da semente do maracujá (B).

Fonte: Peréz-Cortéz *et al*. (2002).

As sementes do maracujá cru são ricas em fibra alimentar insolúvel (64,1 g/100 g) e lipídio bruto (24,5 g/100 g) com pequenas quantidades de proteínas e carboidratos (CHAU e HUANG, 2004).

Essas sementes, que contêm muita fibra e óleo, geralmente são descartadas após serem trituradas. Nos últimos anos, alguns estudos têm procurado estudar a fibra alimentar e óleos de subprodutos de semente de abóbora (LYU *et al*., 2021), bagaço de maçã e laranja (O'SHEA *et al*., 2015; HUC-MATHIS *et al.*, 2019), sementes de goiaba (KAPOOR *et al*., 2020), sementes de romã, tomate e uvas (DURANTE *et al*., 2017), polpa e casca de manga (RAMÍREZ-MAGANDA *et al*., 2015; PATIÑO-RODRÍGUEZ *et al*., 2020) e casca e caules de abacaxi (CAMPOS *et al*., 2020) para explorar suas potenciais aplicações e atividades fisiológicas.

A porcentagem de óleo contido nas sementes de maracujá é de cerca de 25,7% do peso do farelo seco obtido, que contém alto teor de ácidos graxos insaturados, indicando que o produto tem bom potencial para alimentação humana e animal, além de poder ser utilizado na indústria de cosméticos (FERRARI *et al*., 2004).

O ácido linoléico (ômega 6) é um dos principais ácidos graxos encontrados na composição do óleo de semente de maracujá (representando 55 a 66%), seguido por ácido oléico (18 a 20%) e ácido palmítico (10 a 14%), esses ácidos graxos são triacilgliceróis, um componente das gorduras e óleos comestíveis, respondem por 95% dos lipídios da dieta humana (TOGASHI *et al*., 2007).

2.1.2 Propagação

O maracujá (*Passiflora edulis* Sims f. flavicarpa Deg.) é uma planta frutífera geralmente propagada por sementes, por isso, além de poder manejar o germoplasma de forma mais adequada, é importante entender sua capacidade de preservação. Os maracujazeiros derivados de sementes são mais vigorosos e precoces do que as plantas enxertadas.

No cultivo do maracujá no Brasil e em outros países, a reprodução se faz basicamente por via sexuada (via sementes), mas também pode ser por via assexuada, por enxertia, estarquia, alporquia. A reprodução sexual se refere ao processo no qual os gametas masculinos e femininos se fundem após a polinização para formar uma única célula chamada zigoto dentro do ovário. Devido à troca de informações genéticas durante o processo de fertilização, uma semente é produzida a partir do desenvolvimento da célula, e a semente germinará uma nova planta com características completamente diferentes da mãe (FERREIRA, 2000).

2.1.3 Armazenamento

Após a colheita das sementes, a principal preocupação é manter a qualidade das sementes para minimizar a velocidade do processo de deterioração. O potencial de

armazenamento das sementes depende de condições favoráveis e varia de espécie para espécie (DELOUCHE e BASKIN, 1973).

Segundo Akamine *et al.* (1954) se um atraso maior no plantio for necessário, a fruta pode ser mantida acerca de 55°F (12,8°C). Os pesquisadores em um experimento demonstraram que os frutos podem ser mantidos nesta temperatura por pelo menos 2 meses sem efeito prejudicial na germinação das sementes. Pode ser possível reter os frutos por períodos mais longos, desde que não apodreçam, mas em temperaturas abaixo de 55°F (12,8°C) tendem a atrasar o surgimento das sementes. Congelar a fruta mata as sementes.

Andric *et al*. (2000) para avaliar a preservação das qualidades fisiológicas das sementes de maracujá-doce, quando armazenadas na geladeira e no freezer, realizaram experimentos com dois fatores de preservação (geladeira e freezer) e três tratamentos: (A) – sementes sem estratificação; (B) – sementes estratificadas, lavadas e armazenadas sem secagem; e (C) – sementes estratificadas (fermentadas por 7 dias), lavadas e secas à sombra. No armazenamento em freezer, as sementes do tratamento (C) somente germinaram nas quatro primeiras semeaduras. Nas outras épocas de semeadura do tratamento (C) e em todas as épocas de semeadura dos tratamentos (A) e (B), nenhuma delas apresentou germinação. Para as sementes armazenadas em geladeira, no tratamento (B), foi observada uma taxa média de germinação em torno de 60% durante todo o experimento. O tratamento (A) manteve a taxa de germinação de 60% até os 120 dias e caiu para 20% até o término do experimento. No tratamento (C), as sementes começaram a germinar após 90 dias e mantiveram uma porcentagem média de menos de 50% ao final do experimento. Os autores concluíram que o melhor método de tratamento é armazenar as sementes estratificadas, lavadas e sem secagem, na geladeira.

Catunda *et al*. (2003) realizaram testes de condições de armazenamento de sementes de maracujá em refrigerador, onde a temperatura foi regulada para 4ºC e 60% UR, câmara regulada à temperatura de 18ºC e 24% UR e armazenamento em ambiente de laboratório. O período de armazenamento teve duração de dez meses. Eles concluíram que o ambiente de refrigerador (4ºC e 60%UR), foi o mais apropriado para a preservação da viabilidade das sementes de maracujá amarelo por um período de 10 meses de armazenamento, independentemente do tipo de embalagem utilizada.

Silva *et al*. apud Zaratin (2002), estudaram sementes de *Passiflora ligularis*, que é um maracujá doce, as sementes foram retiradas de frutos maduros e foram fermentadas por 24 horas e secas à sombra durante 7 dias. O período entre a retirada das sementes até a semeadura foram: (A) – 819 dias; (B) – 100 dias; e (C) – 13 dias. A porcentagem de germinação durante o tratamento foram: 88% (A), 26% (B) e 7% (C). A conclusão deles é que não ocorre perda na

germinação em sementes armazenadas por mais de dois anos, e que ao remover as sementes do fruto e semeá-las apresenta baixa taxa de germinação, o que pode indicar o armazenamento é necessário para amadurecer as sementes.

2.1.4 Aproveitamento

Diante de novos desafios, os fabricantes têm que rever suas estratégias de produção e negócios, e orientar suas empresas para alcançar a diversificação e uma maior avaliação da produção. A ciência e a tecnologia tornaram-se suas aliadas no reaproveitamento de subprodutos e na redução da poluição. Nada impede que empresas e indústrias incluam em seus planos de gestão e apoiem pesquisas destinadas a encontrar soluções de proteção ao ambiente.

A secagem é um dos métodos de conservação que pode proporcionar vantagens importantes no reaproveitamento ou tratamento de subprodutos ao reduzir a ação de micro-organismos, ao facilitar o transporte, além de aumentar a concentração de nutrientes e ser possível o processamento em qualquer época do ano. O teor de umidade final e a energia necessária para a secagem são muito importantes para a modelagem e modificação da escala do equipamento em nível industrial.

O consumo de frutas tropicais aumenta a cada dia, então mais resíduos são gerados. Dentre esses resíduos, as sementes de maracujá se destacam, pois o Brasil é o principal produtor e consumidor mundial dessa fruta. A produção brasileira de maracujá em 2018 foi de 602.651 toneladas, tendo o estado da Bahia o primeiro lugar na produção. Este estado produziu neste mesmo ano 160.902 toneladas, já o estado de Sergipe ocupa o décimo quarto lugar com uma produção de 8.606 toneladas. O desempenho da cultura do maracujá no Brasil no ano de 2018 foi 42.731 ha de área colhida (IBGE, 2018).

As indústrias de suco ou polpa de maracujá aproveitam somente a polpa, que representa cerca de 30% do peso do fruto e o restante casca e sementes, correspondendo 70% do peso total, quando não utilizadas na alimentação de animais são jogadas no lixo, sem nenhum tratamento (OLIVEIRA *et al*, 2002).

De acordo com Chau & Huang (2004) com relação à composição centesimal, as sementes apresentam 8,25% de proteína; 24,5% de lipídios; 1,34% de cinzas; 64,8% de fibras; e 1,11% de carboidratos. Esses autores afirmam que as sementes são ricas em lipídios e fibras, sendo que as fibras insolúveis mais importantes são compostas principalmente por celulose, pectina e hemicelulose.

Devido aos elevados teores de fibras das sementes de maracujá, estas podem ser utilizadas como ração animal (ZANETTI *et al.*, 2016; FACHINELLO *et al.*, 2016). Em razão de sua característica lignocelulósica, podem também ser utilizadas como carvão ativado (IOANNIDOU e ZABANIOTOU, 2007). Além disso, em virtude da presença de lipídios, tem potencial para ser empregado na indústria de cosméticos e alimentícia (FERRARI *et al*., 2004).

2.2 QUALIDADE FISIOLÓGICA

2.2.1 Germinação

A germinação é definida como o surgimento e desenvolvimento das estruturas essenciais de um embrião, mostrando sua capacidade de produzir mudas em condições ambientais favoráveis (MARCOS FILHO, 2015).

A morfologia da semente desempenha um papel importante no crescimento de mudas uniformes. O padrão morfológico das sementes depende de três elementos principais: tegumento, endosperma (cotilédone) e embrião Cada elemento tem uma função única durante o processo de germinação; por exemplo, o tegumento pode proteger as partes internas e conter produtos químicos sensíveis à luz, que provocam dormência sob iluminação adequada e disponibilidade de água, e os cotilédones fornecem alimentos essenciais ao embrião durante o processo de germinação (MENG *et al.,* 2016).

Algumas sementes apresentam dificuldades para germinar, devido a fatores como a dormência fisiológica e a dureza do tegumento. Rosbakh *et al*. (2019) afirmaram que a germinação de sementes de juncos é frequentemente difícil, devido à dormência fisiológica e ao tegumento duro da semente, eles propuseram que a escarificação química por hipoclorito de sódio ('alvejante') e a estratificação a frio podem quebrar com sucesso este tipo de dormência e melhorar as taxas de germinação das sementes.

Tem sido reportado na literatura que várias espécies do gênero Passifloraceae têm germinação lenta, incompleta e irregular na natureza. Santos *et al*. (2016) afirmam que a disseminação seminífera de *Passiflora cincinnata* torna-se inviável uma vez que esta espécie apresenta baixa taxa de germinação, cuja causa é decorrente da dormência de suas sementes.

2.2.2 Vigor da semente

O vigor da semente é uma característica fisiológica complexa: quando a semente amadurece, ela atingirá o potencial fisiológico máximo e diminuirá inevitavelmente com o aumento do tempo de armazenamento (ZHANG *et al*., 2020).

O vigor da semente é um importante indicador da qualidade da semente e a primeira garantia para a manutenção das populações de plantas e produtividade estável (HAO *et al*., 2020).

Segundo Finch-Savage & Bassel (2016) o fator chave do desempenho da cultura de sementes são as características complexas do vigor das sementes, assim o rendimento da colheita e a eficiência da utilização de recursos dependem do estabelecimento bem-sucedido das plantas de campo, e o vigor da semente determina sua capacidade de germinar e crescer mudas de maneira rápida, uniforme e robusta em diferentes condições ambientais.

Existem vários métodos para avaliar o vigor da semente, incluindo aqueles que avaliam direta ou indiretamente o estado metabólico da semente ou determinam a tolerância da semente a estresse específico (MARCOS FILHO, 2015). Dentre esses métodos têm sido propostos e aplicados para avaliação do vigor de sementes, métodos convencionais, tais como: teste padrão de germinação, teste de condutividade elétrica, teste de crescimento de mudas, teste de envelhecimento acelerado, teste de frio e tetrazólio. Atualmente, tem-se o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias emergentes na análise de viabilidade de sementes, especialmente espectroscopia no infravermelho próximo, imagem hiper espectral e multiespectral, espectroscopia Raman, imagem térmica infravermelha e métodos de imagem de raio-X suave (XIA *et al*., 2019).

2.2.3 Teste de tetrazólio

O teste de tetrazólio propicia avaliar a viabilidade da semente, que responde o quão saudável e vigorosa é a semente. Portanto, com base neste teste, é possível obter quanto a planta irá produzir de acordo com os diversos tipos de pragas e condições climáticas (PEREIRA *et al*., 2019).

Os sais de tetrazólio sulfonados são reagentes úteis devido à solubilidade em água de produtos de formazan coloridos, que podem marcar localizações em sistemas biológicos (STOCKERT *et al*., 2018).

O teste mede indiretamente o processo respiratório que ocorre nas mitocôndrias das células que fazem parte do tecido da semente. A reação de redução da solução de sal de

tetrazólio sob a ação da desidrogenase produz o trifenilformazan de cor vermelho carmim, e por meio da interpretação do padrão de cor, são identificados os índices de viabilidade, de vigor e dos principais problemas que podem afetar a qualidade das sementes (FRANÇA-NETO & KRZYZANOWSKI, 2019).

2.3 SECAGEM

2.3.1 Breve histórico da secagem e definição

O método de secagem de sólidos continua sendo um dos mais utilizados em diferentes processos industriais, podendo ser citado como exemplo a sua aplicação nas indústrias agrícolas, cerâmicas, químicas, alimentícias, farmacêuticas, de papel e celulose, mineral e de polímeros. Mesmo estando há muito tempo na indústria, essa técnica ainda continua sendo complexa devido a deficiência em determinar através dos métodos matemáticos os fenômenos envolvidos de transferência de calor, massa e quantidade de movimento (MUJUMDAR, 2006).

A secagem de papel em folhas em uma sala com circulação de ar foi uma das técnicas pioneiras. Esta, durante a Revolução Industrial na França, foi relatada como uma das principais técnicas de secagem. Dez anos após a primeira descoberta, outro método foi desenvolvido em Londres, também para a secagem de papel em cilindros aquecidos (KEEY, 1972).

Após os primeiros métodos de secagem se consolidarem no mercado, novos métodos foram surgindo, isso ocorreu devido à necessidade de processos mais eficientes e com maior velocidade operacional. Apesar da evolução nessa área, somente no final do século XIX iniciou o desenvolvimento dos secadores a partir da radiação térmica e a vácuo.

A secagem, de modo geral, é a operação por meio da qual a água ou qualquer outro líquido é removido de um material no estado sólido. E a quantidade de água presente no sólido é denominado de umidade.

A tecnologia de secagem de alimentos é uma das mais antigas e tem como finalidade eliminar um líquido volátil contido num corpo não volátil, através de evaporação. O seu aperfeiçoamento nos últimos anos possibilitou a obtenção de novos produtos com maior qualidade em menor tempo de processamento (KOTOVICZ *et al.*, 2014).

A secagem de alimentos é utilizada desde os primórdios da história da civilização humana, onde os povos utilizavam essa técnica para preservar os alimentos por mais tempo. No Egito Antigo utilizavam os raios solares como método para secar as frutas, como por exemplo

a uva, essa fruta não passava por nenhum tratamento antes de ficar exposta no sol. O conhecimento naquela época era totalmente empírico.

Durante a secagem é necessário um fornecimento de calor para evaporar a umidade do material e também deve haver um sorvedor de umidade para remover o vapor água, formado a partir da superfície do material a ser seco (PARK *et al*., 2014). A Figura 2 ilustra o processo de secagem.

O estudo do processo de secagem fornece informações relativas à transferência de calor e massa entre o material e o agente de secagem, normalmente o ar atmosférico, aquecido ou não. Essas informações são fundamentais para a elaboração de projeto, operação e simulação de secadores (CORRÊA *et al*., 2003).

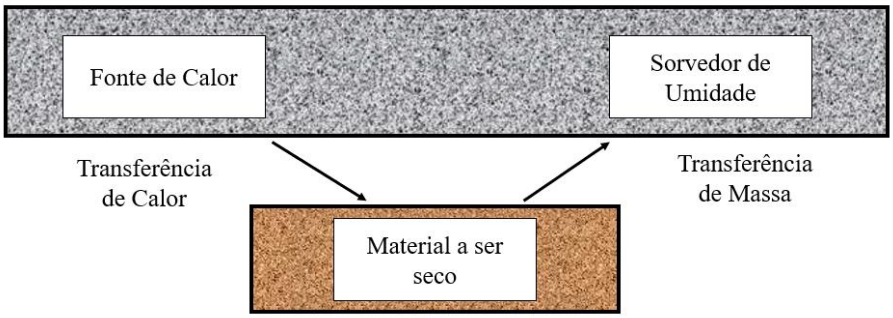


Figura 2-Diagrama do processo de secagem.

Fonte: Park *et al*. (2014)

2.3.2 Secagem convectiva

A secagem convectiva é um método amplamente utilizado na conservação de produtos agrícolas pós-colheita e na produção de alimentos desidratados. No entanto, o alto consumo de energia na secagem convectiva torna o custo do processo elevado. Além disso, o escurecimento não enzimático, o alto encolhimento, a baixa capacidade de reidratação e a perda de nutrientes são desvantagens comuns da secagem convectiva (LOPES, 2016).

A secagem convectiva, por sua vez, diminui consideravelmente o teor de água no produto, o que minimiza o crescimento de microrganismos e reações de deterioração química, preservando-o durante a estocagem (MAYOR e SERENO, 2004), além de contribuir para a redução de custos de embalagem, transporte e armazenamento.

Kotovicz *et al*. (2014) estudaram a desidratação osmótica de batata yacon e verificaram que o aumento da concentração da solução osmótica e o aumento da temperatura favoreceram a perda de umidade, porém, aumentaram também a incorporação de sólidos. No processo

de secagem convectiva, o aumento da temperatura do ar da estufa reduziu o tempo de secagem e favoreceu a diminuição da atividade de água.

Borin *et al.* (2008) avaliaram o efeito do pré-tratamento osmótico com sacarose e cloreto de sódio sobre a secagem convectiva de abóbora. Após os experimentos, as amostras tratadas apresentaram taxas de secagem maiores que amostras sem tratamento, mostrando que os pré-tratamentos melhoraram a eficiência do processo.

2.3.3 Secagem via radiação infravermelha

O material emite uma taxa de emissão de energia, de acordo com a sua temperatura, que é chamada de radiação térmica ou transmissão de calor por radiação.

A energia liberada em consequência das oscilações ou transições de elétrons, átomos ou moléculas mantidas pela energia interna do material está relacionada com a radiação térmica (PIRES *et al.*, 2015). Quando absorvida, ela é convertida em calor (RATTI e MUJUMDAR, 2015).

Um corpo pode absorver, refletir ou transmitir a radiação incidente sobre ele, seguindo o balanço da equação:

$$\alpha + \beta + \tau = 1 \tag{1}$$

A classificação dos materiais pode ser feita tomando como base as suas características de transmissividade, dependendo do estado físico do material sob o qual a radiação incide. O material é chamado de opaco, quando esse não permite a transmissão de radiação através dele ($\tau = 0$). O corpo negro é o material que absorve toda a energia que incide sobre ele ($\alpha = 1$). Já o corpo branco é o material que reflete a energia incidente sobre o mesmo ($\beta = 1$) (RATTI e MUJUMDAR, 2015).

Energia eletromagnética é emitida da superfície no momento em que um corpo negro é aquecido a uma temperatura T. Depende da temperatura e das características da superfície do corpo a quantidade de radiação emitida por unidade de área.

A razão entre a emissividade total em relação à do corpo negro para a mesma temperatura é a definição da emissividade de um corpo, ε, (RATTI e MUJUMDAR, 2015).

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \tag{2}$$

A lei de Plank fornece o fluxo de energia irradiado por um corpo negro numa dada temperatura, na faixa de comprimento de onda λ (SAKAI e MAO, 2006).

$$E_\lambda = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{d\lambda}{exp\left(\frac{ch}{\kappa\lambda T_K}\right) - 1} \quad (3)$$

onde E_λ é o poder emissivo espectral ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$), λ é o comprimento de onda, h = 6,6256 x 10^{-34} J s e k = 1,3805 x 10^{-23} J/K são as constantes universais de Planck e Boltzmann, respectivamente, c = 2,998 x 10^8 m/s é a velocidade da luz no vácuo, T_K é a temperatura absoluta do corpo negro (K).

A Figura 3 mostra o aumento da energia irradiada com o aumento da temperatura do corpo negro. Pode-se observar ainda que o pico das curvas de emissão de radiação é deslocado para menores comprimentos com a elevação da temperatura.

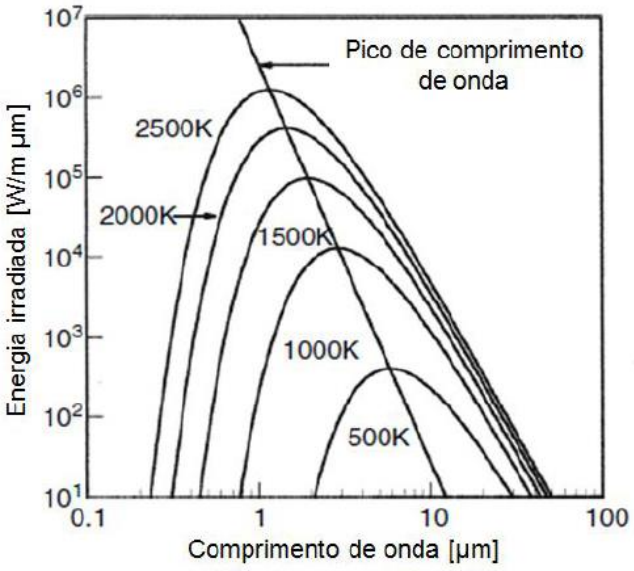


Figura 3-Característica espectral da radiação de corpo negro a diferentes temperaturas.

Fonte: Sakai e Mao (2006).

Diferenciando a Equação (3) com respeito a λ e igualando a zero, obtém-se a lei do deslocamento de Wien, que relaciona o comprimento de onda no qual o poder emissivo espectral é máximo (λ_{max}) e a temperatura absoluta (T_K) (SAKAI e MAO, 2006):

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T_K} \quad (4)$$

A integração da Equação (3) dá como resultado a emissividade total da energia irradiada pelo corpo negro, expressa pela Lei de Stefan-Boltzmann (RATTI e MUJUMDAR, 2015):

$$E_b = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda = \sigma {T_K}^4 \quad (5)$$

Krishnamurthy *et al*. (2008) aponta como desvantagens do aquecimento infravermelho em comparação com outras técnicas de processamento térmico: o baixo poder de penetração; a causa de fraturas pela exposição prolongada de materiais biológicos e não sensibilidade às propriedades reflexivas dos revestimentos.

Conforme descrito por Barbosa Neto *et al*. (2014), a radiação infravermelha aparece como uma alternativa potencial para aumentar a eficiência do processo de secagem e dentre as principais vantagens da secagem IV estão:

- o equipamento é simples e acessível;
- a fácil combinação do aquecimento IV a outros métodos de aquecimento (convectivo, condutivo e micro-ondas);
- a facilidade de direcionar a fonte de calor para a superfície do material sem aquecimento do ar, através da transferência da energia eletromagnética na região do infravermelho;
- o alcance de altas taxas de transferência de calor;
- o desprovimento de uma alta velocidade do ar, o que minimiza o contato do material submetido à secagem com o oxigênio;
- a elevada qualidade dos produtos finais e
- o menor tempo de processamento e a considerável economia de energia

Ghanem *et al.* (2020) investigaram comparativamente o efeito de diferentes métodos de secagem: micro-ondas (100–600 W), convectiva (40–60 °C) e infravermelho (40–60 °C) sobre a cinética de secagem e atributos qualidade (cor, teor de fenóis totais e flavonóides,

capacidade de retenção de água e óleo) das cascas do limão (*Citrus limon*. v. lunari) e concluíram que a melhor cor foi obtida com secagem infravermelho a 40 °C.

Ghavidelan e Chayjan (2017) estudaram em escala laboratorial um secador de leito fluidizado assistido por aquecimento infravermelho para secar grãos de avelã, realizando experimentos de secagem sob as seguintes condições operacionais: temperaturas do ar de 45, 65 e 85 °C, velocidades do ar de 1,30, 3,09 e 4,87 m/s e potências de radiação IV de 500, 1000 e 1500 W. Os autores concluíram que as temperaturas mais baixas do ar e as menores potências de radiação IV contribuíram para preservar a qualidade do produto.

Dongbang e Nuantong (2018) investigaram a cinética de secagem do arroz glutinoso usando a técnica de radiação IV. O arroz glutinoso foi seco em três potências de radiação IV, 300, 400 e 500 W, e em três espessuras de camada, 5, 10 e 15 mm, a partir de um teor inicial de umidade de 81% (wb) até um teor final de umidade de 25% (wb). Ao aumentar a potência da fonte IV de 300 para 500 W houve uma redução de 46,4% no tempo de secagem, com as temperaturas da superfície do arroz glutinoso atingindo 45 e 51°C, respectivamente. A 300 W, o arroz glutinoso seco apresentou uma coloração mais clara, enquanto a secagem com maior potência, 500 W, produziu o produto mais escuro. A camada de arroz com espessura de 5 mm, considerada aceitável para o mercado, teve o menor tempo de secagem. As curvas de razão de umidade mostraram que a difusão de umidade interna controla o processo de secagem do arroz glutinoso.

2.3.4 Secagem híbrida

A técnica de secagem combinada foi buscada para acelerar a transferência de calor e massa, levando a um menor tempo de processamento e menor consumo de energia em comparação com o método de secagem com convecção de ar quente. Esta técnica envolve a aplicação contínua de radiação IV juntamente com ar quente forçado durante todo o processo de secagem. A aplicação de radiação IV combinada ao aquecimento de ar quente é considerada mais eficiente em relação à radiação ou ao aquecimento de ar quente sozinho, devido ao efeito sinérgico (HEBBAR, VISHWANTHAN e RAMESH, 2004). No entanto, a aplicação contínua de energia IV também pode resultar em superaquecimento do produto e taxa de secagem não uniforme.

O método de secagem combinando a radiação infravermelha e ar quente tem sido amplamente aplicado para secagem de vários alimentos, como fatias de cebola (KUMAR,

HEBBAR, e RAMESH, 2006), anéis de abacaxi (PONKHAM *et al.*, 2012) e cenouras (HEBBAR, VISHWANTHAN e RAMESH, 2004).

A Figura 4 apresenta a representação conceitual do mecanismo de secagem combinada de radiação infravermelha com convecção de ar quente. Quando o material é exposto à radiação infravermelha, ela colide com a superfície do material e penetra nele. O aumento da vibração molecular devido à absorção da radiação gera calor tanto na superfície do material quanto nas camadas internas simultaneamente (SAKAI e MAO, 2006). O rápido aquecimento do material aumenta a taxa de movimento da umidade em direção à superfície. O fluxo convectivo de ar remove a umidade da superfície, além de baixar sua temperatura, o que previne um superaque-cimento.

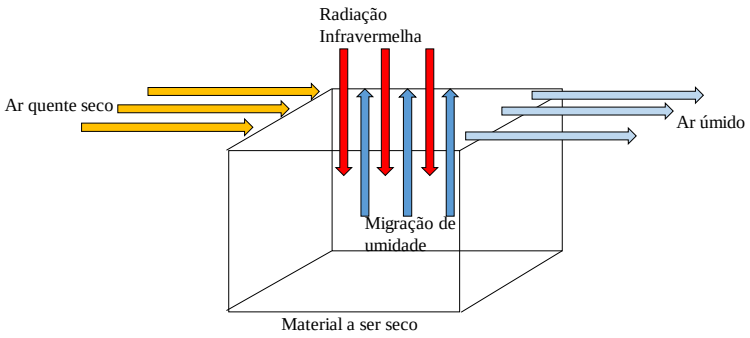


Figura 4-Representação conceitual da combinação de radiação infravermelho e ar quente.

2.4 CINÉTICA DE SECAGEM

O estudo da cinética de secagem consiste na determinação e análise das curvas de teor de umidade do produto, de sua temperatura e da taxa de secagem, ao longo do tempo do processo. Na Figura 5 são ilustradas as curvas cinéticas de um processo de secagem empregando ar quente com propriedades constantes.

O processo de secagem possui três períodos, conforme mostrado na Figura 5. No início do processo a temperatura do produto e a pressão de vapor d'água aumentam. Neste momento, como a umidade relativa do ar na camada limite é inferior a 100%, a taxa de secagem aumenta continuamente, o que normalmente é chamado de período de taxa crescente (MUJUMDAR, 2006; LIMA *et al.*, 2016).

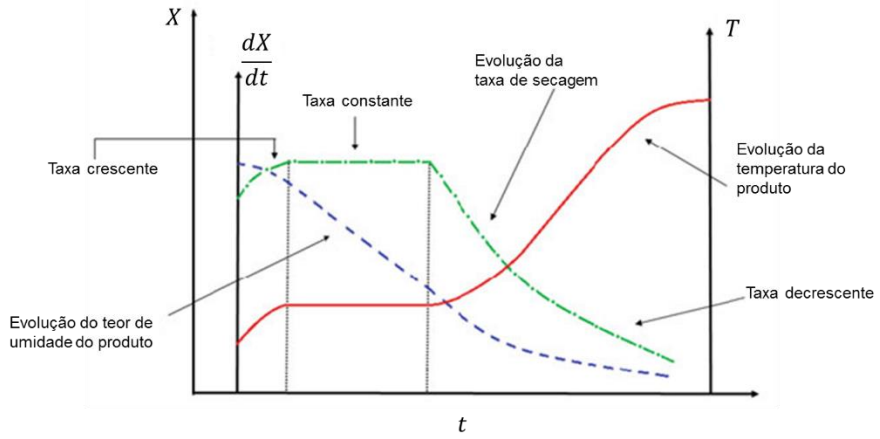


Figura 5-Curvas típicas de secagem.

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

O aumento na taxa de secagem continua ocorrendo até o ponto no tempo em que a transferência de calor e a massa se igualam, dando início ao período de taxa constante. Neste período, o produto está completamente úmido e a água flui na fase líquida com gradiente hidráulico, neste caso a temperatura do produto é igual à temperatura do bulbo úmido (LIMA *et al*., 2016). Alguns alimentos não apresentam um período de taxa de secagem constante (RIZVI, 2005).

Enquanto houver umidade na superfície a ser removida durante o processo de evaporação, a taxa de secagem permanece constante. O ponto final do período de taxa constante é chamado de ponto de umidade crítica, em que a umidade deixa de se comportar como umidade livre (RATTI, 2009; LIMA *et al.*, 2016).

Conforme a secagem progride e passa do ponto crítico de umidade, o teor de umidade continua diminuindo e a água na fase líquida forma pontes líquidas no interior do sólido poroso. A partir deste ponto, começa o período de redução da taxa de secagem. Durante este período, a migração de umidade do interior para a superfície do produto é reduzida, e a transferência de calor não é igual à transferência de massa (RATTI, 2009).

A temperatura do produto ultrapassa a temperatura de bulbo úmido até a temperatura do ar de secagem ou a temperatura de bulbo seco. Por fim, a secagem ocorre dentro do produto até atingir o teor de umidade de equilíbrio, ou seja, quando a quantidade de água evaporada for igual à quantidade de água condensada na superfície do sólido (BROOKER *et al*., 1992)

O período de taxa de secagem decrescente é praticamente o único período observado para a secagem de produtos agrícolas e alimentos, ou para a maioria deles, o período predominante. A complexidade dos fenômenos envolvidos no processo de secagem levou

pesquisadores a propor muitas teorias e várias equações empíricas para prever a taxa de secagem.

Considerando que o fluxo de água no interior do sólido é produzido pelo gradiente de concentração, a teoria da difusão líquida (LUIKOV, 1968; CRANK, 1992) usa a segunda lei de Fick como modelo matemático para a descrição da transferência de massa na secagem:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(D_{ef}\frac{\partial X}{\partial z}\right) \tag{6}$$

Em conjunção com as seguintes condições inicial e de contorno:

$$t = 0 \qquad X = X_0 \tag{7}$$

$$z = 0 \qquad \frac{\partial X}{\partial z} = 0 \tag{8}$$

$$z = \delta^* = \frac{\delta}{2} \qquad X = X_{eq} \tag{9}$$

em que: X simboliza o teor de umidade médio em base seca num dado tempo t; X_0 é o teor de umidade inicial; X_{eq} teor de umidade de equilíbrio do produto; D_{ef} é a difusividade mássica efetiva; z é a coordenada cartesiana da posição e δ^* é a semiespessura da placa.

As Equações (6)-(9) compõem a modelagem do problema de transferência de massa unidirecional numa placa plana infinita, regime transiente, considerando a umidade inicial do sólido uniforme e constante, a simetria do meio, resistência externa e encolhimento desprezíveis. A solução analítica em termos do adimensional de umidade (XR) é expressa por:

$$XR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{2}{\pi^2}\sum_{0}^{n}\frac{1}{(n+1/2)^2}exp\left\{-(n+1/2)^2\pi^2\frac{D_{ef}t}{\delta^{*2}}\right\} \tag{10}$$

Várias equações semiempíricas e empíricas vêm também sendo utilizadas para descrever a cinética de secagem em camada fina de produtos agrícolas, de acordo com as condições do processo de secagem. Na Tabela 1 encontram-se listadas as comumente empregadas na literatura.

Tabela 1- Equações semiempíricas utilizadas para descrever a secagem em camada fina.

Denominação	Modelo	Referência	Equação
Lewis	$XR = \exp(-K \cdot t)$	(KALETA & GORNICK, 2010)	(11)
Page	$XR = \exp(-K_P \cdot t^p)$	(DIAMANTE *et al*., 2010)	(12)
Henderson e Pabis	$XR = a \cdot \exp(-Kt)$	(DIAMANTE *et al*., 2010)	(13)

em que *a* é um parâmetro da equação de Henderson e Pabis; *K* é a constante de secagem (s^{-1}); K_p é a constante de secagem da equação de Page (s^{-p}); *p* é um parâmetro da equação de Page, *t* é o tempo; *XR* é o adimensional de umidade.

2.5 CONSUMO ENERGÉTICO DO PROCESSO DE SECAGEM

Na secagem há um grande dispêndio de energia, o que incentiva a busca por novas/inovadoras tecnologias de secagem, que diminuam esse consumo de energia.

Na secagem convectiva o que demanda energia são sistemas de aquecimento e ventilação, ao passo que na secagem via radiação infravermelha são os emissores da radiação.

O consumo de energia pode ser quantificado de forma direta utilizando um medidor de grandezas elétricas, como wattímetro, ou de forma indireta usando uma equação que descreva o procedimento. Nimmol e Devahastin (2010) determinaram o consumo específico de energia (CEE) na secagem convectiva de arroz por meio da equação:

$$CEE = \frac{E_{sopr} + E_{aq}}{m_w} \quad (14)$$

onde E_{sopr} é a energia requerida para operar o soprador e E_{aq} para operar o aquecedor elétrico, ambas em MJ; e m_w é a quantidade de água removida durante o processo, em kg.

No trabalho de Motevali *et al*. (2011), a energia requerida para aquecer o ar na secagem convectiva de romã foi calculada como:

$$E_{aq} = A_T \cdot v_{ar} \cdot \rho_{ar} \cdot Cp_{ar} \cdot \Delta T \cdot t_s \quad (15)$$

onde A_T é a área da seção transversal de escoamento do ar, em m^2; v_{ar} é a velocidade do ar, em m/s; ρ_a é a massa específia do ar, em kg/m^3; Cp_{ar} é o calor específico do ar, ΔT é a variação de temperatura do ar no aquecedor; e t_s é o tempo de secagem.

Motevali *et al.* (2011) também aplicaram a lei de Stefan-Boltzmann (Equação 5) para calcular o fluxo de energia radiante na secagem via radiação infravermelho. A energia consumida por radiadores IV, em kWh, foi então obtida ao multiplicar o fluxo de energia IV pela área de transferência de calor e massa e pelo tempo de secagem (em horas). Os autores verificaram que o tempo de secagem aumentou com a velocidade do ar, o que resultou em um maior consumo de energia.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

As sementes residuais do processamento do maracujá-amarelo, utilizadas como material de estudo, foram fornecidas pela Pomar do Brasil Indústria e Comércio de Alimentos Ltda, localizada na cidade de Aracaju, no estado de Sergipe.

3.2 EQUIPAMENTO

O esquema do aparato experimental utilizado para estudar a secagem híbrida de sementes de maracujá é mostrado na Figura 6.

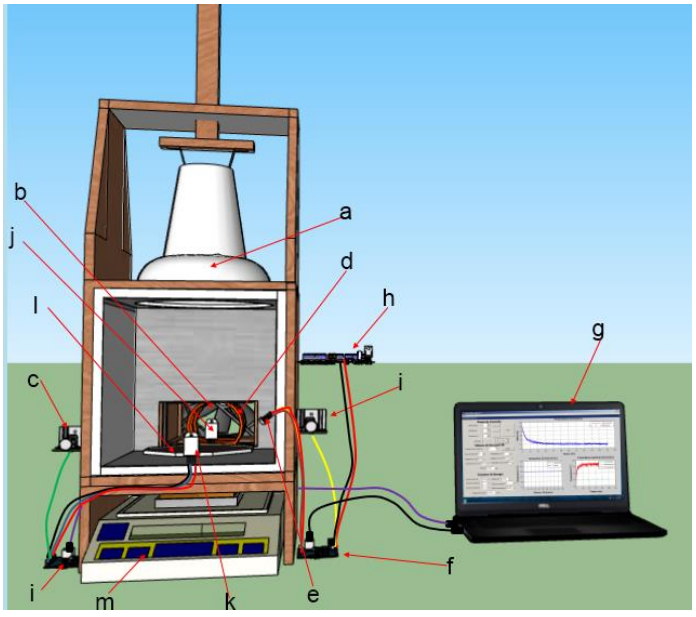


Figura 6- Desenho esquemático do secador experimental.

Ele consiste de uma câmara de secagem equipada com uma lâmpada incandescente de 250 W (a) para o aquecimento IV e um cooler (b) acoplado a um regulador de velocidade (c) para um sistema controlado de convecção. *Dimmers* são também utilizados para regular a temperatura da fonte IV e a potência dissipada pelas resistências elétricas (d) usadas para aquecer o ar de secagem. Para medir a temperatura superficial da amostra, a unidade foi instrumentada

com um sensor de temperatura IV(e) direcionado à superfície das sementes e conectados a uma placa Arduino (f) que envia os dados coletados para um computador (g).

As correntes elétricas da fonte IV, que tem um controlador de potência (h), e das resistências ôhmicas foram medidos por sensores de correntes ligados à outra placa de Arduino (i). A temperatura e a umidade relativa do ar de secagem foram medidas por sensores de umidade localizados na entrada (j) e na saída (k) da câmara de ar de secagem. A bandeja (l) contendo a amostra é acoplada a uma balança analítica digital (m) para registrar continuamente a perda de umidade do material.

Para minimizar as perdas de calor, as paredes internas da câmara foram recobertas com folhas de isopor e alumínio.

3.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Na Figura 7 encontra-se um fluxograma de todas as etapas experimentais realizadas no desenvolvimento deste trabalho.

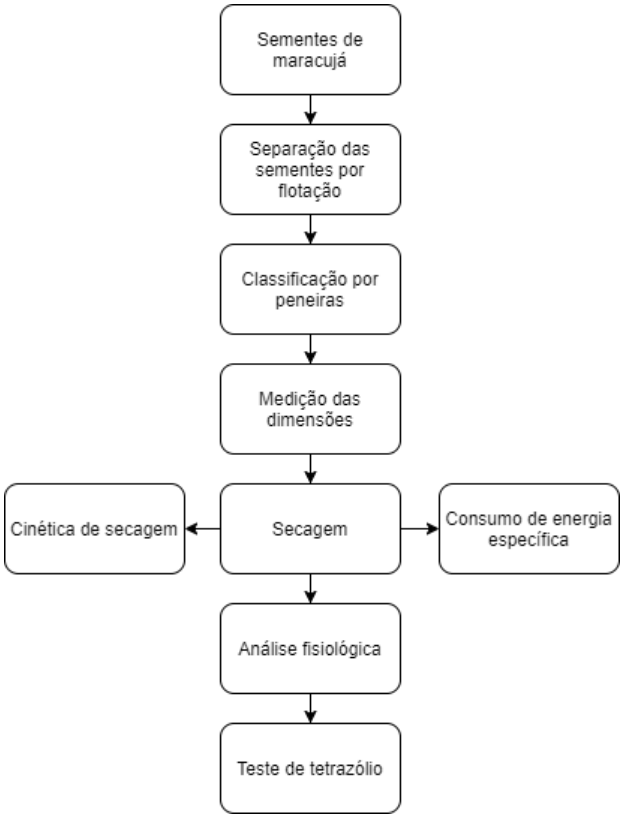


Figura 7-Fluxograma experimental.

3.3.1 Preparação do material

As sementes residuais fornecidas pela indústria de processamento da polpa congelada de maracujá, após transportadas para o laboratório, foram inicialmente imersas em água (Figura 8) para remoção das sementes que não se encontravam em estádio de maturação fisiológica e daquelas não férteis, caracterizadas por serem mais claras e flutuarem em água.

Figura 8-Imersão das sementes em água.

Após a separação por flotação, as sementes mais escuras remanescentes foram, então, lavadas em água corrente, a fim de remover qualquer resíduo de polpa ligado à sua superfície. Em seguida, o excesso de água da superfície das sementes foi removido com papel toalha e foi feita a classificação de tamanho das partículas por peneiras. As sementes foram armazenadas em freezer convencional, a fim de preservá-las até o seu uso nos experimentos. O processo de descongelamento, antes da secagem, ocorreu à temperatura ambiente.

3.3.2 Análise granulométrica das sementes

Após a etapa de preparação, as sementes foram separadas por tamanho utilizando peneiras da série Tyler (Bertel, Brasil), Figura 9, com aberturas de 4, 5, 6, 7 e 8 mesh.

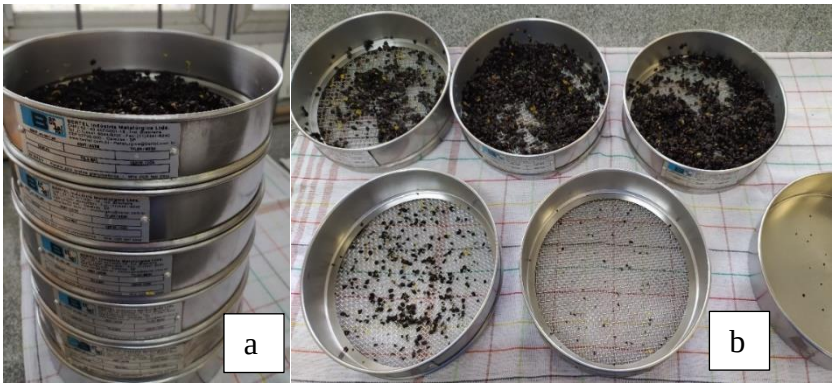


Figura 9-Peneiras: (a) série de peneiras; (b) Sementes retidas nas peneiras.

3.3.3 Medição das dimensões da semente

Antes de cada secagem foram medidas as dimensões comprimento (L), largura (W) e espessura (T) de 20 sementes, utilizando um paquímetro digital DIGIMESS com resolução de 0,01 mm, conforme ilustrado na Figura 10.

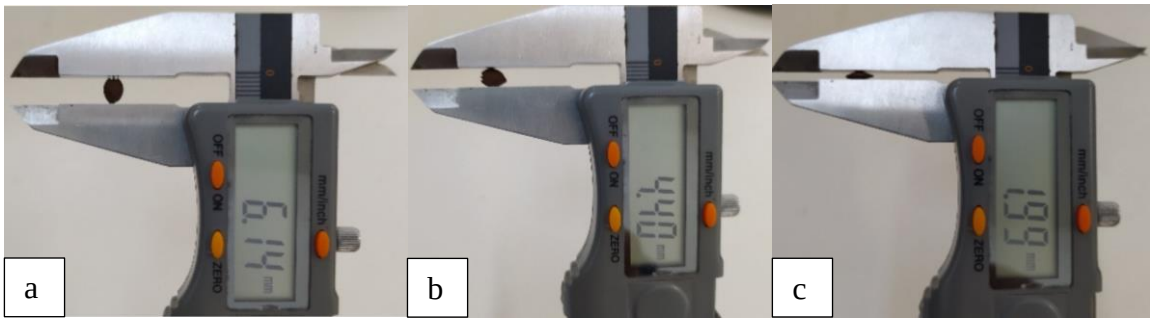


Figura 10-Medição: comprimento (a), largura (b) e espessura (c).

A partir das dimensões medidas foram calculados o volume da semente (V_p), a área superficial (A_s), o diâmetro da esfera equivalente(dp) e a esfericidade da partícula (ϕ), de acordo com as equações, (ARAUJO et al., 2020; MOHSENIM, 1986):

$$V_p = \frac{\pi w \delta l^2}{6\left[2l - \sqrt[]{w\delta}\right]} \tag{16}$$

$$A_s = \frac{\pi \sqrt[]{w\delta}\, l^2}{\left[2l - \sqrt[]{w\delta}\right]} \tag{17}$$

$$dp = \left(\frac{6V_p}{\pi}\right)^{1/3} \tag{18}$$

$$\phi = \frac{dp}{l} \tag{19}$$

3.3.4 Experimentos de secagem

Cerca de 36 g de sementes de maracujá foram dispostas em uma bandeja na forma de monocamada (Figura 11) e então expostas à radiação IV e à convecção forçada de ar aquecido (secagem híbrida). Com o propósito de comparação foram conduzidos experimentos com as

sementes submetidas apenas ao escoamento de ar quente (secagem convectiva convencional) e outros em que foram expostas somente à radiação IV (secagem infravermelho). A distância entre a fonte IV e a amostra foi fixada em 15 cm.

Os experimentos de secagem híbrida foram conduzidos com temperaturas da fonte IV de 50, 65 e 80ºC, temperaturas do ar de 30, 40 e 50ºC e com velocidades do ar de 1, 2 e 3 m/s, obedecendo um planejamento fatorial completo 3^3. Na secagem convectiva as temperaturas do ar empregadas foram 30, 40 e 50°C e velocidades do ar de 1, 2 e 3 m/s. Já na secagem com radiação IV, foram utilizadas temperaturas da fonte IV de 50, 65 e 80°C.

Figura 11-Monocamada de sementes dispostas na bandeja.

Os valores da massa da amostra e da temperatura da superfície das sementes foram continuamente medidos e coletados num sistema de aquisição de dados, desenvolvido no software Scilab 5.5.2. Ao término de cada corrida, a massa de sólido seco e umidade final foram determinadas por meio do analisador de umidade (Shimadzu, MOC-120H).

Para estudar a cinética de secagem das sementes de maracujá-amarelo em camada fina, os experimentos foram realizados até não ser observado mudança no valor da massa da amostra, ou seja, até atingir o equilíbrio termodinâmico. Por sua vez, antes dos testes de viabilidade fisiológica das sementes, os experimentos de secagem foram conduzidos até um teor de umidade final de 0,11 b.s., considerado adequado para a preservação da qualidade do produto e seu armazenamento seguro.

3.3.5 Descrição da cinética de secagem

A segunda lei de Fick foi utilizada para modelar a cinética de secagem de cada processo investigado. A solução analítica aplicada aos dados experimentais foi desenvolvida

considerando a forma geométrica do material como esferóide prolato, a transferência de massa simétrica, o encolhimento da partícula como desprezível e assumindo também o equilíbrio termodinâmico na superfície da semente (BROOKER *et al*., 1992):

$$XR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{6}{\pi^2}\sum_{1}^{n}\frac{1}{n^2}exp\left\{-\frac{n^2\pi^2}{9}\left[\frac{A_s}{V_p}\left(D_{eff}t\right)^{\frac{1}{2}}\right]^2\right\} \quad (20)$$

A Equação (20) foi então aplicada aos dados experimentais e os valores de difusividade de umidade efetiva nas sementes de maracujá submetidas a cada método e condição de secagem estimados por regressão não linear, utilizando o método dos mínimos quadrados e o software OriginPro 8.5.0. Os critérios estatísticos adotados para avaliar a qualidade do ajuste foram o coeficiente de determinação (R^2) e o teste Chi-quadrado (χ^2).

3.3.6 Avaliação energética do processo

O desempenho do secador proposto foi avaliado com base no consumo de energia específica (CEE), definido como a energia requerida para reduzir a umidade inicial da semente, até um valor considerado ideal para o armazenamento das sementes, 0,11 b.s.

$$CEE = \frac{(P_{IV} + P_{resist} + P_{cooler}).t}{m_w} \quad (21)$$

Em que:

P_{IV} - Potência consumida pela fonte IV;

P_{resist} - Potência consumida pela resistência elétrica da convecção;

P_{cooler} - Potência consumida pelo *cooler*;

m_w - massa de água evaporada;

t – tempo do processo.

As potências consumidas foram calculadas a partir das medidas de voltagem e corrente elétrica realizadas continuamente durante o processo e coletadas pelo sistema de aquisição.

3.3.7 Avaliação da viabilidade fisiológica das sementes

A falta de critérios de avaliação para sementes de espécies de Passiflora dificulta o ajuste dos resultados obtidos no teste de tetrazólio, assim a seleção do método apropriado para usar esse teste deve ser baseada em recursos que distinguem entre tecidos vivos e não vivos e lotes de qualidades fisiológicas diferentes (COSTA e SANTOS, 2010).

Ao término da secagem, parte da amostra de sementes foi para o analisador de umidade e a outra foi submetida ao teste de tetrazólio, utilizando 2 repetições de 20 sementes de cada um dos experimentos e 20 sementes secas em temperatura ambiente (controle), pré-condicionadas em água destilada por 24 horas a 30°C em estufa. Após esse período, foram feitos cortes na extremidade distal do eixo embrionário para exposição do embrião e contato deste com a solução de cloreto de trifenil tetrazólio a 0,75% pelo período de 24 horas em estufa a 30°C (PADUA *et al*., 2011). Em seguida, os embriões foram excisados e visualizados sob lupa, sendo a viabilidade das sementes expressa em porcentagem a partir do número de sementes que apresentavam coloração rósea em pelo menos metade do cotilédone e de todo o eixo embrionário.

3.3.8 Análise estatística

A fim de avaliar o efeito das variáveis operacionais (temperatura da fonte IV, temperatura e velocidade do ar) sobre a difusividade de umidade efetiva das sementes e sobre o consumo de energia dos processos, bem como estabelecer as condições de operação ótimas, foi realizada uma análise estatística com base no planejamento fatorial completo, de modo a levantar o diagrama de Pareto para quantificar os efeitos dos fatores, bem como plotar a superfície de resposta para as variáveis dependentes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS SEMENTES DE MARACUJÁ

As sementes de maracujá provenientes dos resíduos fornecidos pela indústria de polpa de fruta congelada foram submetidas à separação por flotação, seguida de lavagem em água corrente e classificação de tamanho em peneiras da série Tyler. A maior quantidade de sementes foi retida na peneira de mesh 6, com as partículas apresentando, portanto, um diâmetro médio de peneira de 3,675 mm. Sementes com esse principal tamanho foram, então, utilizadas nos ensaios de secagem, com o propósito de padronizar a amostra, garantindo a uniformidade do tamanho de partícula e minimizando assim seu efeito sobre os fenômenos de transferência de calor e massa envolvidos na secagem.

Antes de cada experimento de secagem, as três principais dimensões de 20 sementes selecionadas randomicamente foram medidas e os valores de área superficial, volume, diâmetro da esfera equivalente e esfericidade da partícula calculados. Os resultados médios obtidos com base nas medidas de 780 sementes encontram-se listados na Tabela 2.

Tabela 2-Dimensões, esfericidade, área superficial e volume das sementes com umidade de (0,354 ± 0,022) b.s.

L (mm)	W (mm)	T (mm)	A_s (m^2)	V_p (m^3)	d_p (mm)	ϕ (-)
6,17 ± 0,05	4,28 ± 0,03	1,87 ± 0,01	35,51 ± 0,33	16,73 ± 0,22	3,17 ± 0,01	0,515 ± 0,003

Moreno *et al*. (2015) analisaram as características morfológicas de frutos e sementes de *Passiflora edulis* f. flavicarpa em duas populações distribuídas nos municípios de Alta Floresta (AF) e Carlinda (CA), MT. Verificou-se que o comprimento das sementes da população AF variou de 5,12 mm a 6,74 mm, com média de 5,85 mm, enquanto que o da população CA variou de 5,18 mm a 6,44 mm, com média de 5,88 mm. A largura média das sementes foram 4,31 mm para a população AF e 4,07 mm para a população CA, onde AF teve variação da largura de 4,32 a 4,44 mm e em CA 3,46 a 5,14 mm, observando-se, pelos valores das médias, sementes com maior largura em AF em relação à população CA. A espessura da semente da população AF variou de 1,78 mm a 1,96 mm, ficando com uma média de 1,81 mm, já para a população CA a espessura variou de 1,80 mm a 1,82 mm, ficando com uma média de 1,86.

Em relação às dimensões comprimento e espessura da semente, as populações não diferiram estatisticamente. Já para a largura da semente houve diferença estatística entre as populações, onde a população AF apresentou uma maior média.

As sementes investigadas no presente trabalho tiveram valores médios de comprimento, largura e espessura dentro da faixa reportada por Moreno *et al*. (2015). O volume da partícula foi 25% menor que o das sementes de maracujá amarelo utilizadas por Araújo et al. (2020), as quais ainda apresentaram uma maior esfericidade, de 0,564.

O teor de umidade inicial das sementes de maracujá determinado experimentalmente foi de (0,354 ± 0,022) kg de água/kg de sólido seco. O valor médio obtido é próximo ao valor de 0,4 b.s. reportado por Araújo *et al.* (2020), mas significativamente inferior à umidade de 0,53 b.s. das sementes de maracujá utilizadas por Carlesso *et al.* (2008).

4.2 SECAGEM HÍBRIDA

4.2.1. Cinética de secagem

Nas Figuras 12 (a), (b) e (c) são apresentados os resultados típicos do comportamento cinético de secagem das sementes de maracujá, ao combinar o aquecimento infravermelho e o aquecimento convectivo, expressos em termos do teor de umidade em função do tempo, taxa de secagem em função do teor de umidade e evolução temporal da temperatura das sementes, respectivamente, para temperatura do ar de 30^{o}C e velocidade de 1 m/s. As características de secagem estão parametrizadas na temperatura da fonte IV.

A partir da Figura 12 (a) pode ser notado que a umidade diminui acentuadamente no estágio inicial de secagem e, subsequentemente, diminui lentamente à medida que o processo ocorre. O tempo de secagem requerido para as sementes atingirem o teor de umidade de 0,11 b.s., considerado adequado para o seu armazenamento seguro, diminuiu significativamente com o aumento da temperatura da fonte de radiação IV, em toda a faixa de temperatura do ar e velocidade empregada. Por exemplo, para T_{ar} = 30^{o}C e v_{ar} = 1 m/s, o tempo de processo para atingir o teor de umidade alvo foi reduzido em aproximadamente 67%, ao aumentar a temperatura da fonte de 50 para 80^{o}C.

As curvas experimentais de taxa de secagem, Figura 12 (c), indicam que o comportamento de secagem do material é caracterizado por um curto período de aquecimento, onde as taxas são crescentes, seguido de um período, no qual a taxa de secagem diminui continuamente com o tempo, à medida que a umidade é removida. Logo, o processo de secagem híbrida ocorreu, predominantemente, no período de taxa decrescente, durante o qual a difusão molecular de umidade dentro da partícula é o mecanismo principal de transferência de massa.

Esta tendência tem sido reportada para grãos, sementes, frutas e vegetais, por outros pesquisadores (Nourmohamadi-Moghadami *et al.*, 2017; Puente-Diaz *et al.*, 2013).

Como mostrado na Figura 12 (c) não foi observado período de taxa constante na faixa operacional estudada. Isto pode ser atribuído ao fato de as condições empregadas terem causado uma rápida remoção da umidade superficial da semente, não sendo esta suprida pela migração interna de umidade.

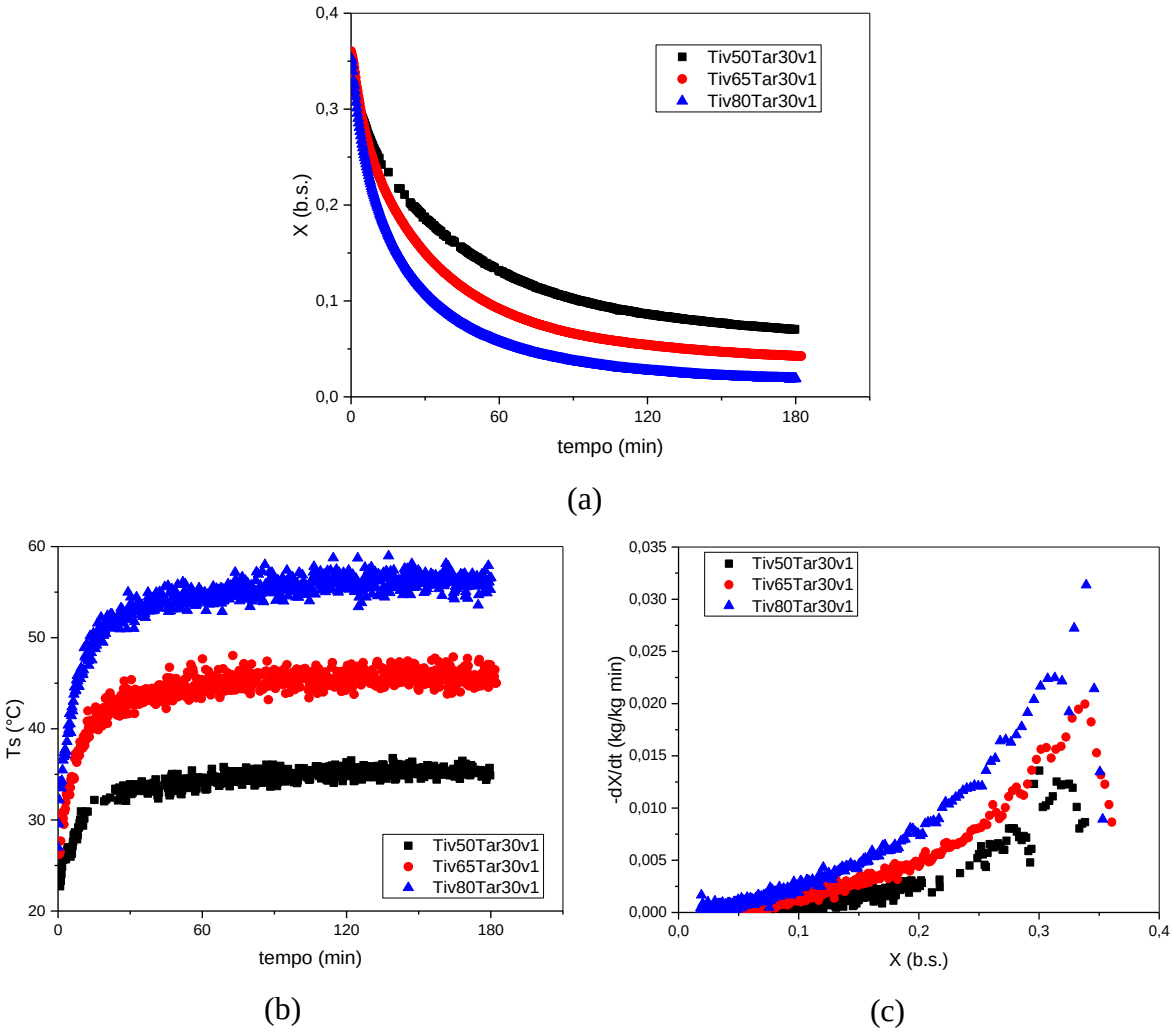


Figura 12-Características de secagem de sementes de maracujá submetidas à secagem combinada em diferentes temperaturas da fonte IV, para temperatura do ar de 30°C e velocidade de 1 m/s.

Os resultados mostram como esperado que a taxa de remoção de umidade das sementes aumenta ao aumentar a temperatura da fonte. Isto porque o fluxo de calor radiante para a superfície da partícula aumenta. Com o aumento da vibração molecular devido à maior absorção da energia eletromagnética, calor é gerado simultaneamente na superfície e em camadas internas da semente, contribuindo para um maior e mais rápido aquecimento do material, Figura

12 (b), e por conseguinte, para aumentar a pressão de vapor, melhorando assim a força motriz para a remoção de umidade da semente.

A evolução da temperatura superficial das sementes está diretamente associada à cinética do processo e, por conseguinte, aos períodos de secagem apresentados. Nos instantes iniciais do processo há um abrupto aumento da temperatura superficial das amostras, que leva a um acentuado aumento da taxa de secagem, que caracteriza o período de aquecimento. A temperatura do sólido passa, então, a aumentar gradualmente durante a secagem, ao mesmo tempo que a difusão começa a governar o processo, tendendo assintoticamente a uma temperatura, cujo valor é definido pelo saldo líquido da taxa de transferência de calor fornecido às sementes via radiação IV e a taxa de calor transferido por convecção para o ar e as perdas para a vizinhança.

Na Figura 12 (b) pode ser observado que, ao empregar ar a 30°C e 1 m/s, o aumento da temperatura da fonte IV de 50 para 80°C resultou num aumento de aproximadamente 22°C na temperatura superficial atingida pelas sementes no final do processo, levando a uma redução do teor de umidade de equilíbrio de 0,07 para 0,018 b.s. Quando expostas a maiores fluxos de calor radiante, as moléculas de água contidas nas sementes são ativadas a maiores níveis de energia, tornando-se menos estáveis e deixam os sítios de ligação de água do material (Liu et al., 2015). Assim, quanto maior a temperatura atingida pelo produto, menor sua umidade de equilíbrio.

As curvas típicas de secagem, de evolução de temperatura e de taxa de secagem do material, obtidas ao se fixar a temperatura da fonte IV e a velocidade do ar, e variar a temperatura do ar, são mostradas nas Figuras 13 (a), (b) e (c), respectivamente.

Como esperado, um aumento na temperatura do ar de secagem resultou no aumento da temperatura da amostra para qualquer temperatura da fonte IV empregada na combinação. Um rápido aumento na temperatura da amostra pode ser observado no estágio inicial do processo, devido ao efeito acoplado da radiação IV e da transferência de calor por convecção do ar para a amostra. Neste período, quanto maior a temperatura do ar maior será a contribuição do fluxo convectivo de calor.

Entretanto, num determinado tempo do processo a temperatura da superfície da amostra pode se tornar maior que a temperatura do ar, e a convecção forçada passa a ter um efeito de resfriamento. Na Figura 13 (b) pode ser notado que na secagem com ar a 30^{o}C e fonte IV a 50^{o}C o escoamento tem efeito de resfriamento logo nos instantes iniciais no processo. Por sua vez, na condição de temperatura da fonte de 50^{o}C, a temperatura das sementes não ultrapassa a temperatura do ar de 50^{o}C, de modo que nessa condição o fluxo convectivo continua a

contribuir para o aquecimento da amostra, em menor magnitude, por causa da redução da força motriz provocada pelo aumento da temperatura do sólido.

Ao fixar a temperatura da fonte IV na secagem combinada, verifica-se que um aumento na temperatura do ar resultou num ligeiro aumento da taxa de secagem. Isto por contribuir para um mais rápido aquecimento do produto, nos estágios iniciais de secagem resultando em aumento da temperatura e da pressão de vapor da água dentro do produto acoplada com a rápida evaporação da água da superfície da partícula (Nachaisin et al., 2016), seja minimizando o efeito de resfriamento das partículas no estágio final do processo. Efeitos semelhantes da temperatura do ar sobre a secagem híbrida de diferentes produtos agrícolas encontram-se relatados na literatura (Onwude et al., 2019; Chen et al., 2017).

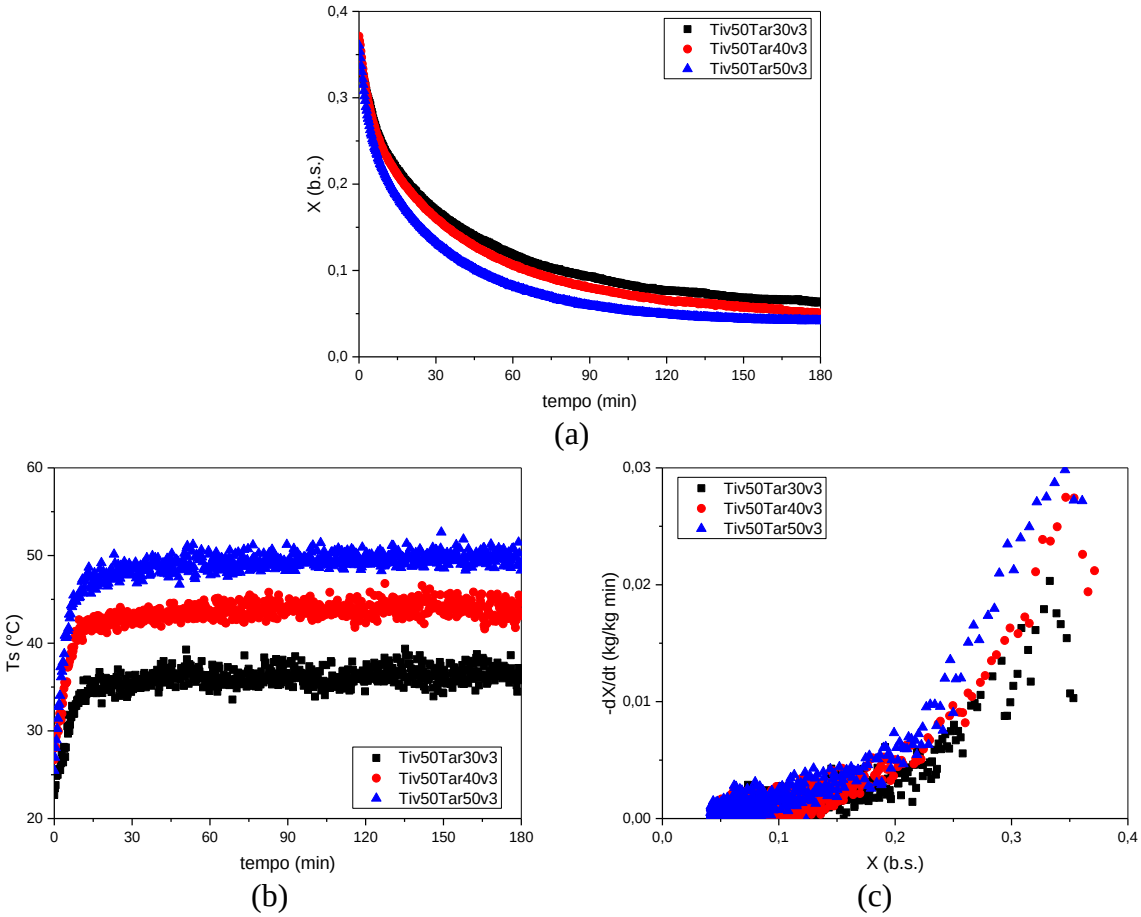


Figura 13-Características de secagem de sementes de maracujá submetidas à secagem combinada em diferentes temperaturas do ar, para temperatura da fonte IV de 50°C e velocidade do ar de 3 m/s.

O tempo de secagem requerido para atingir a umidade alvo de 0,11 diminuiu aproximadamente 40%, ao aumentar a temperatura do ar de 30 para 50°C, empregando temperatura da fonte IV de 50°C e velocidade do ar de 3 m/s.

Nas Figuras 14 (a), (b) e (c) são apresentados os resultados típicos de umidade em função do tempo, evolução da temperatura superficial das sementes e taxa de secagem em função da umidade, a partir dos quais pode ser avaliada a influência da velocidade do ar sobre o comportamento cinético de secagem do material, para temperatura da fonte IV de 65ºC e temperatura do ar de 30ºC.

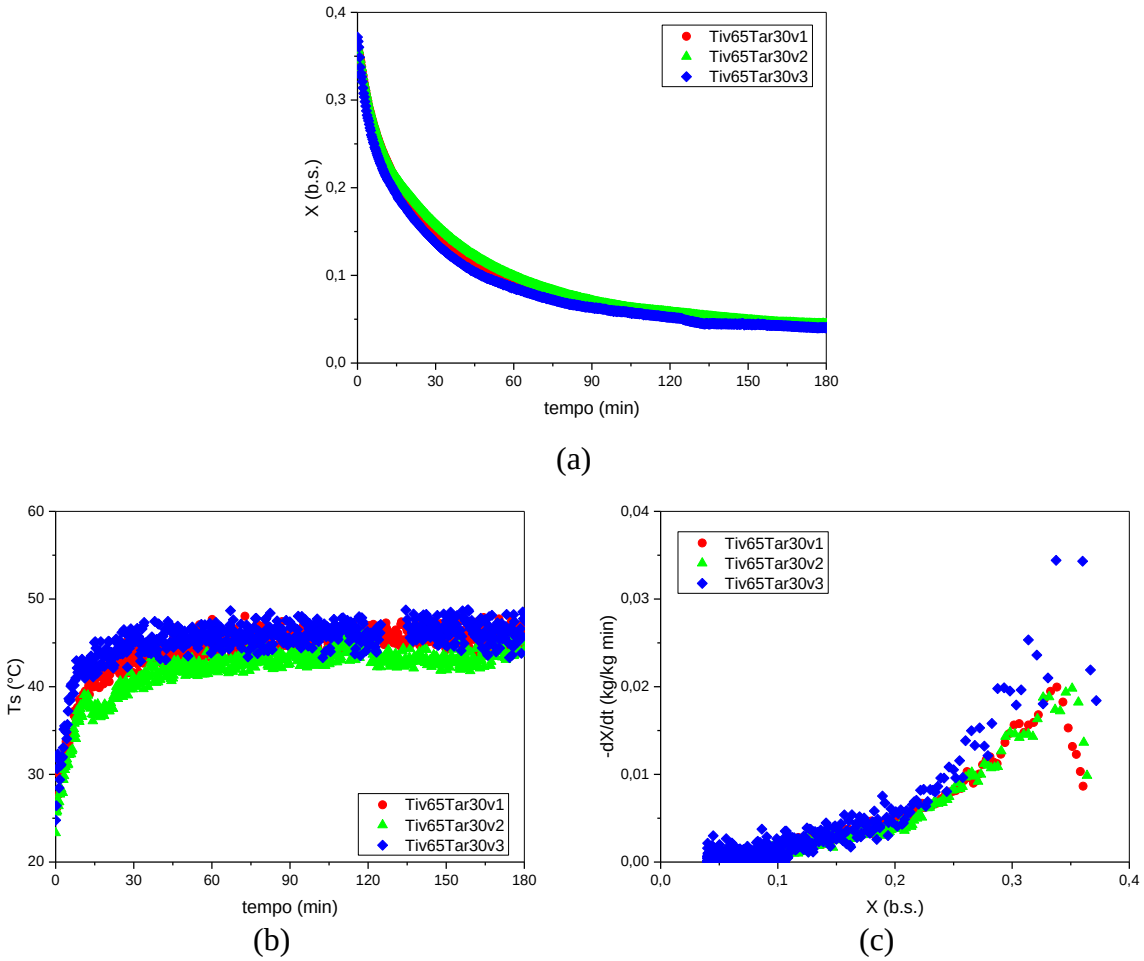


Figura 14-Características de secagem de sementes de maracujá submetidas à secagem combinada em diferentes velocidades do ar, para temperatura da fonte IV de 65°C e temperatura do ar de 30ºC.

Na secagem híbrida, entre as várias combinações de temperatura do ar e temperatura da fonte IV empregadas, ao se variar a velocidade do ar de 1 a 3 m/s, não foram observadas diferenças significativas no comportamento de secagem das sementes de maracujá.

A influência da velocidade do ar parece ocorrer apenas no estágio inicial do processo, onde o emprego da maior velocidade do ar de 3 m/s não somente contribui para uma maior taxa de aquecimento do material, Figura 14 (b), mas também para o arraste por convecção da umidade localizada na superfície das sementes, levando a maiores taxas nesse período, Figura 14 (c). Mas como essa umidade superficial é rapidamente evaporada pela aplicação do fluxo de

calor IV, o efeito da velocidade do ar deixa de ser pronunciado nos períodos subsequentes da secagem, de modo que a temperatura e a taxa de secagem das sementes passam a ser praticamente independentes da velocidade do ar.

A temperatura final atingida pelo produto, ao se variar a velocidade de 1 a 3 m/s, fixando T_{IV} = 65ºC e T_{ar} = 30ºC, foi de (44,5 ± 1,5)ºC e o tempo de secagem para alcançar a umidade de 0,11 b.s foi de (46,6 ± 3,5) min.

Os resultados obtidos sobre a influência da velocidade do ar são coerentes com o fato do processo de secagem híbrida ser governado pela difusão de umidade, ou seja, ser controlado pelas resistências internas à transferência de massa, localizadas no sólido.

4.2.2. Difusividade mássica efetiva

A solução do modelo difusivo, Equação (20), foi aplicada para estimar a difusividade efetiva durante a secagem das sementes de maracujá no período de taxa decrescente. A Tabela 3 mostra os resultados da difusividade efetiva para as condições de secagem híbrida, combinando a convecção forçada de ar quente com o aquecimento IV.

Os valores baixos de χ^2 e os valores acima de 0,96 do coeficiente de determinação (R^2) mostram a boa qualidade de ajuste do modelo difusivo aos dados experimentais.

A difusividade efetiva (D_{ef}) de umidade nas sementes de maracujá, expostas simultaneamente à radiação IV e ao escoamento forçado de ar, variou de 3,067 x 10^{-11} a 10,716 x 10^{-11} m^2/s, estando dentro da faixa de 10^{-12} a 10^{-8} m^2/s reportada na literatura para produtos agrícolas (CUEVAS *et al*., 2019; RAMACHANDRAN *et al*., 2018; CHEN *et al*., 2020).

Os valores de D_{ef} aumentaram com o aumento da intensidade de radiação IV provocada pelo aumento da temperatura da fonte, o que está de acordo com resultados obtidos por Nourmohamadi- Moghadami et al. (2017), Onwude et al. (2019) e Zhang et al. (2020), ao aplicarem o método de secagem híbrida para secar milho, bucha vegetal e batata-doce, respectivamente. Isto porque a maior energia IV absorvida pelas moléculas de água dentro das sementes, resultante da maior temperatura da fonte, causou um maior aquecimento volumétrico, o que levou a uma maior temperatura do material e, consequentemente, uma maior pressão de vapor e a uma maior eficiência do transporte de umidade.

Ao fixar a temperatura e velocidade do ar em 30ºC e 1 m/s, e aumentar a temperatura da fonte IV de 50 para 80ºC, a difusividade efetiva aumentou 112,5%. Tal impacto diminui com o aumento da temperatura do ar para 50ºC, resultando num aumento em torno de 59% no parâmetro de transferência de massa.

Tabela 3-Coeficiente de difusão efetiva para a secagem híbrida.

Condições de secagem					
T_{IV} (°C)	**T_{ar} (°C)**	**V_{ar} (m/s)**	**Def (10^{11} m^2 s^{-1})**	**χ^2**	**R^2**
50	30	1	3,441	7,77E-04	0,985
65	30	1	5,254	7,99E-04	0,988
80	30	1	7,313	7,04E-04	0,993
50	40	1	3,804	7,42E-04	0,976
65	40	1	4,626	9,71E-04	0,970
80	40	1	7,421	1,57E-03	0,940
50	50	1	3,692	6,36E-04	0,989
65	50	1	5,469	1,26E-03	0,984
80	50	1	9,089	9,45E-04	0,988
50	30	2	2,850	6,72E-04	0,976
65	30	2	4,021	1,02E-03	0,967
80	30	2	6,542	1,59E-03	0,942
50	40	2	3,090	8,88E-04	0,970
65	40	2	4,232	2,29E-03	0,913
80	40	2	10,716	4,24E-04	0,984
50	50	2	3,935	8,96E-04	0,972
65	50	2	9,877	2,97E-04	0,988
80	50	2	10,576	1,03E-03	0,951
50	30	3	3,067	1,63E-03	0,964
65	30	3	5,358	1,73E-03	0,977
80	30	3	7,643	2,06E-03	0,973
50	40	3	3,635	1,60E-03	0,938
65	40	3	4,939	3,09E-03	0,864
80	40	3	8,534	2,45E-03	0,882
50	50	3	5,373	1,62E-03	0,980
65	50	3	6,780	1,88E-03	0,978
80	50	3	9,892	2,16E-03	0,973

Mantendo a temperatura da fonte IV e a velocidade do ar constantes, maiores valores de difusividade foram observados em maiores temperaturas do ar. Além de uma maior temperatura do ar contribuir para a transferência de calor convectiva e remoção da umidade superficial no período inicial de secagem, ela tende a minimizar o efeito de resfriamento causado pelo escoamento do ar no estágio final do processo, ajudando a manter as moléculas de água dentro das sementes em maiores níveis de energia.

O impacto do aumento da temperatura do ar de 30 para 50^{o}C é maior ao se trabalhar com a menor temperatura da fonte IV, provocando um aumento da difusividade efetiva em torno de 75%, para uma velocidade do ar de 3 m/s. Esse valor é reduzido para 29% ao aplicar o aquecimento IV com temperatura da fonte de 80^{o}C.

Por sua vez, não são observadas diferenças significativas entre os valores de difusividade obtidos na faixa de velocidades do ar de 1 a 3 m/s, fixando o par temperatura da fonte IV e temperatura do ar. Por exemplo, para T_{IV} = 65°C e T_{ar} = 30ºC, nas diferentes condições de velocidade empregadas, os valores de D_{ef} variaram dentro de uma estreita faixa de 5,254 x 10^{-11} a 5,358 x 10^{-11} m^2/s.

Os valores de D_{ef} para a secagem híbrida de sementes de maracujá foram, sob toda a faixa operacional estudada, menores que aqueles reportados para a secagem hibrida de milho em leito fixo (NOURMOHAMADI-MOGHADAMI *et al.*, 2017). No entanto, cabe ressaltar que no referido trabalho, o escoamento foi do tipo *through flow* e não paralelo à amostra, e empregou-se maiores temperaturas do ar.

Da Tabela 3 nota-se que o valor máximo do coeficiente de difusão efetiva foi 9,892 10^{-11} m^2 s^{-1} na condição de secagem combinando a temperatura da fonte IV de 80°C, a temperatura do ar de 50°C e a velocidade do ar 3 m/s.

A Figura 15 apresenta o diagrama de Pareto com os efeitos das variáveis independentes sobre a difusividade efetiva, plotado com o auxílio do software STATISTICA 10®.

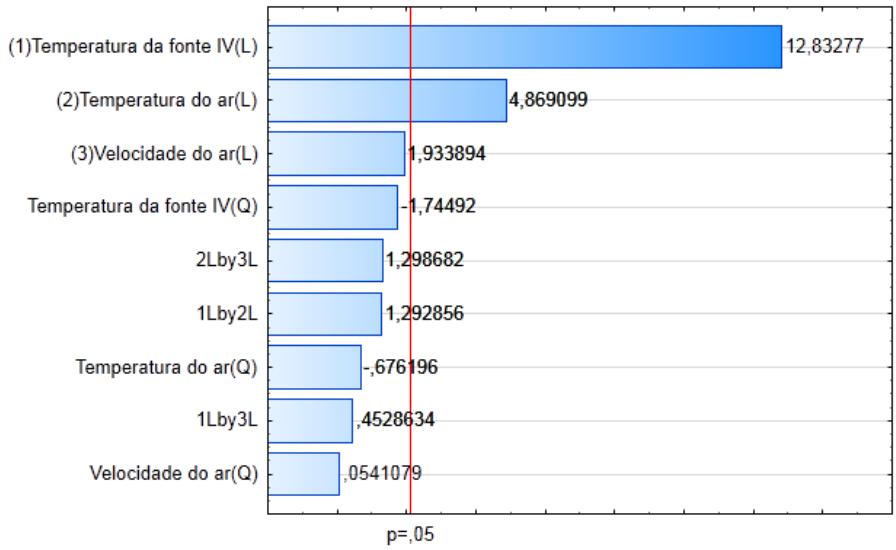


Figura 15-Diagrama de Pareto com os efeitos sobre a difusividade efetiva.

A linha vertical no gráfico representa as variáveis estatisticamente significativas a um nível de significância de 5%. Com base no diagrama, verifica-se que as variáveis temperatura da fonte IV e temperatura do ar têm efeitos positivos sobre a transferência de massa, mais precisamente sobre a variável resposta Def, sendo a temperatura da fonte IV a variável independente mais influente.

A linear dependência da difusividade efetiva (Def) com a temperatura da fonte IV e com a temperatura do ar é expressa pela equação:

$$Def = 0{,}153 \times 10^{-11} T_{IV} + 0{,}685 \times 10^{-11} T_{ar} - 6{,}656 \times 10^{-11} \quad (22)$$

A Figura 16 mostra a superfície de resposta para a difusividade efetiva em função da temperatura da fonte IV e da temperatura do ar.

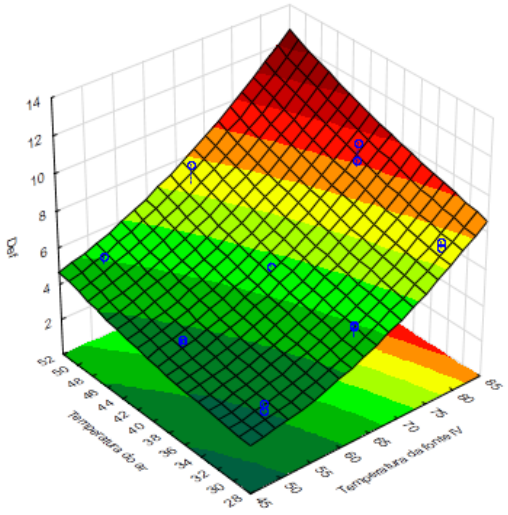


Figura 16-Superfície de resposta para a difusividade efetiva em função da temperatura do ar e da temperatura da fonte IV na velocidade do ar a 3 m/s.

A difusividade efetiva é significativamente afetada por aumentos tanto na temperatura da fonte IV, como na temperatura do ar, levando à intensificação da taxa de transferência de massa na secagem de sementes de maracujá.

4.2.3. Consumo específico de energia

Os resultados referentes ao consumo energético do processo combinando a convecção forçada de ar quente e o aquecimento IV para a secagem de sementes de maracujá, sob a faixa operacional investigada, são apresentados na Tabela .

Ao se analisar os dados de potência consumida das contribuições associadas ao aquecimento IV (P_{IV}) e do aquecimento convectivo, potência consumida pela resistência elétrica (P_r) e cooler (P_c), verifica-se que a energia gasta para aquecer o ar via resistência elétrica é a principal responsável pelo consumo total de energia do secador híbrido. A exceção ocorre

ao empregar a temperatura do ar de 30ºC, quando a lâmpada IV em qualquer uma de suas temperaturas consome ligeiramente mais energia que as resistências elétricas.

Ademais, o gasto energético associado ao aquecimento convectivo, para aumentar a temperatura do ar de 30 para 50ºC, é de duas a quatro vez o gasto com aquecimento IV, para aumentar a temperatura da lâmpada IV de 50 a 80ºC.

Tabela 4-Dados do consumo energético da secagem híbrida das sementes de maracujá em diferentes condições operacionais.

Condições de secagem						
T_{IV} (°C)	**T_{ar} (°C)**	**V_{ar} (m/s)**	**P_{IV} (W)**	**P_r (W)**	**P_c (W)**	**CEE (kWh/kg)**
50	30	1	0,47	0,38	0,12	33,0
65	30	1	0,59	0,40	0,12	21,7
80	30	1	0,68	0,34	0,12	13,6
50	40	1	0,39	0,83	0,12	30,7
65	40	1	0,63	0,84	0,12	23,1
80	40	1	0,73	0,85	0,12	17,6
50	50	1	0,46	1,16	0,12	33,1
65	50	1	0,51	1,14	0,12	23,6
80	50	1	0,74	1,14	0,12	18,1
50	30	2	0,44	0,40	0,14	31,8
65	30	2	0,64	0,42	0,14	21,6
80	30	2	0,74	0,50	0,14	14,0
50	40	2	0,34	1,04	0,14	32,1
65	40	2	0,54	1,05	0,14	24,0
80	40	2	0,71	1,06	0,14	18,2
50	50	2	0,50	1,45	0,14	39,3
65	50	2	0,58	1,39	0,14	25,5
80	50	2	0,73	1,39	0,14	18,2
50	30	3	0,50	0,55	0,16	29,2
65	30	3	0,69	0,56	0,16	21,0
80	30	3	0,80	0,44	0,16	19,0
50	40	3	0,54	1,28	0,16	38,0
65	40	3	0,70	1,19	0,16	22,6
80	40	3	0,80	1,21	0,16	15,2
50	50	3	0,52	1,65	0,16	25,3
65	50	3	0,66	1,66	0,16	24,5
80	50	3	0,79	1,64	0,16	16,2

Em toda a faixa de temperatura e velocidade do ar empregada, um aumento na temperatura da fonte diminuiu o consumo de energia específica, à medida que quanto maior a temperatura da fonte IV, maior é a intensidade de energia eletromagnética emitida e absorvida pela umidade das sementes A vibração das moléculas de água gera, então, calor dentro do produto, eliminando largamente os problemas relacionados à condução de calor e secagem da

camada superficial da partícula. Assim, maiores temperaturas da fonte IV levam a um maior aquecimento das sementes, melhorando a difusão de umidade e, portanto, resultando numa maior redução do tempo de secagem, diminuindo o consumo de energia.

Para temperatura do ar de 40°C e velocidade de 3 m/s, o aumento da temperatura da fonte IV de 50 para 80°C resultou numa redução de 60% no consumo de energia específica do processo.

Nota-se também que, independentemente da temperatura da fonte IV e velocidade, o aumento da temperatura do ar não causou uma variação significativa nos valores médios de CEE, estando a diferença entre eles dentro das incertezas. Esse resultado diverge daqueles reportados na maioria dos trabalhos da literatura, nos quais há redução do CEE com o aumento da temperatura do ar, em razão da redução de tempo do processo. A explicação para o resultado obtido no presente trabalho se deve ao fato do gasto de energia para aquecer o ar de 30 a 50ºC ter sido de mesma magnitude que a economia de energia provocada pela correspondente redução do tempo de secagem.

Na secagem híbrida, entre as várias combinações de temperatura do ar e temperatura da fonte IV empregadas, ao se variar a velocidade do ar de 1 a 3 m/s, não foram observadas diferenças pronunciadas de CEE. Por exemplo, para T_{IV} = 65ºC e T_{ar} = 50 ºC, os valores de CEE foram na faixa de 24,8-25 kWh/kg.

A Figura 17 mostra o diagrama de Pareto com os efeitos dos fatores velocidade, temperatura do ar e temperatura da fonte IV sobre CEE. O efeito detectado está relacionado apenas à temperatura da fonte IV. Esta tem um efeito linear negativo sobre CEE. Todos os termos de segunda ordem e de interação entre as variáveis estão abaixo do nível de significância. Elas são, portanto, excluídos da relação empírica para CEE.

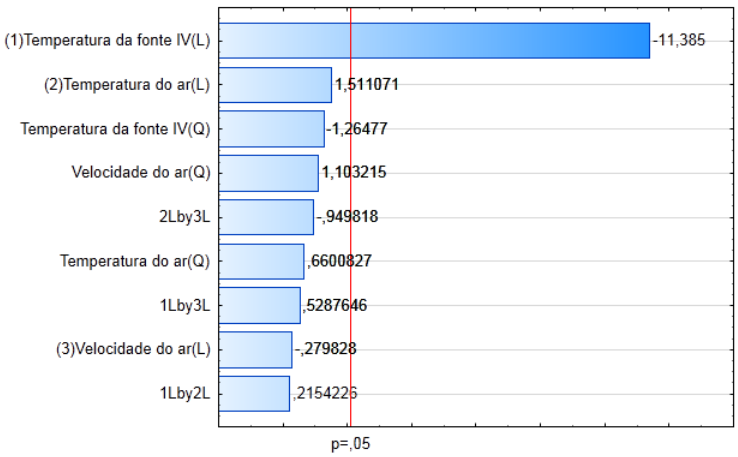


Figura 17-Diagrama de Pareto com os efeitos dos fatores estudados sobre CEE.

Considerando apenas os fatores que influenciaram estatisticamente a variável resposta, ao se aplicar uma análise de regressão multivariável foi obtida a seguinte correlação empírica para CEE:

$$CEE = 58{,}4 - 0{,}527T_{IV} \quad (23)$$

Na Figura 18 é mostrada a superfície de resposta do consumo de energia específica como uma função da temperatura do ar e da temperatura da fonte IV, a partir da qual é possível observar o decréscimo de CEE com o aumento de T_{IV}, e o seu aumento com o aumento de T_{ar}.

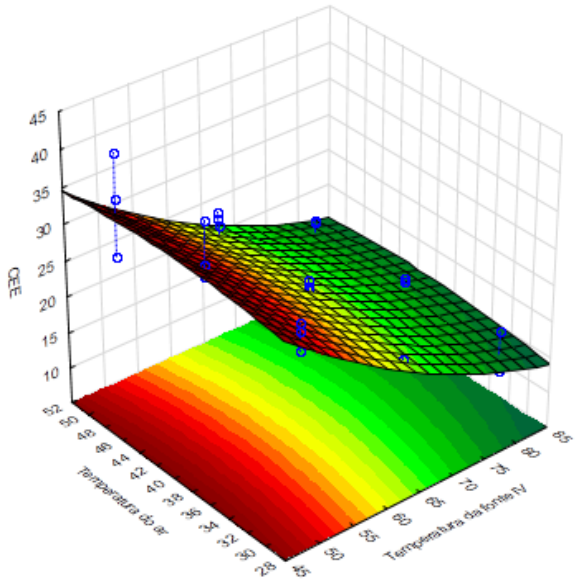


Figura 18- Superfície de resposta para o consumo de energia específica.

A análise dos resultados mostra que o consumo mínimo de energia para secar sementes de maracujá via combinação do aquecimento IV e do aquecimento convectivo foi 13,6 kWh/kg, ao utilizar temperatura da fonte IV de 80°C, temperatura do ar de 30°C e velocidade de 1 m/s. Esta condição operacional pode, portanto, ser sugerida como a melhor, do ponto de vista do consumo energético, para a secagem de sementes de maracujá.

4.3 SECAGEM CONVECTIVA

4.3.1. Cinética de secagem

Nas Figuras 19 (a) a 20 (c) são apresentados os resultados típicos das curvas de cinética de secagem de sementes de maracujá, que permitem a avaliação da influência temperatura e velocidade do ar sobre as características de secagem convectiva do material.

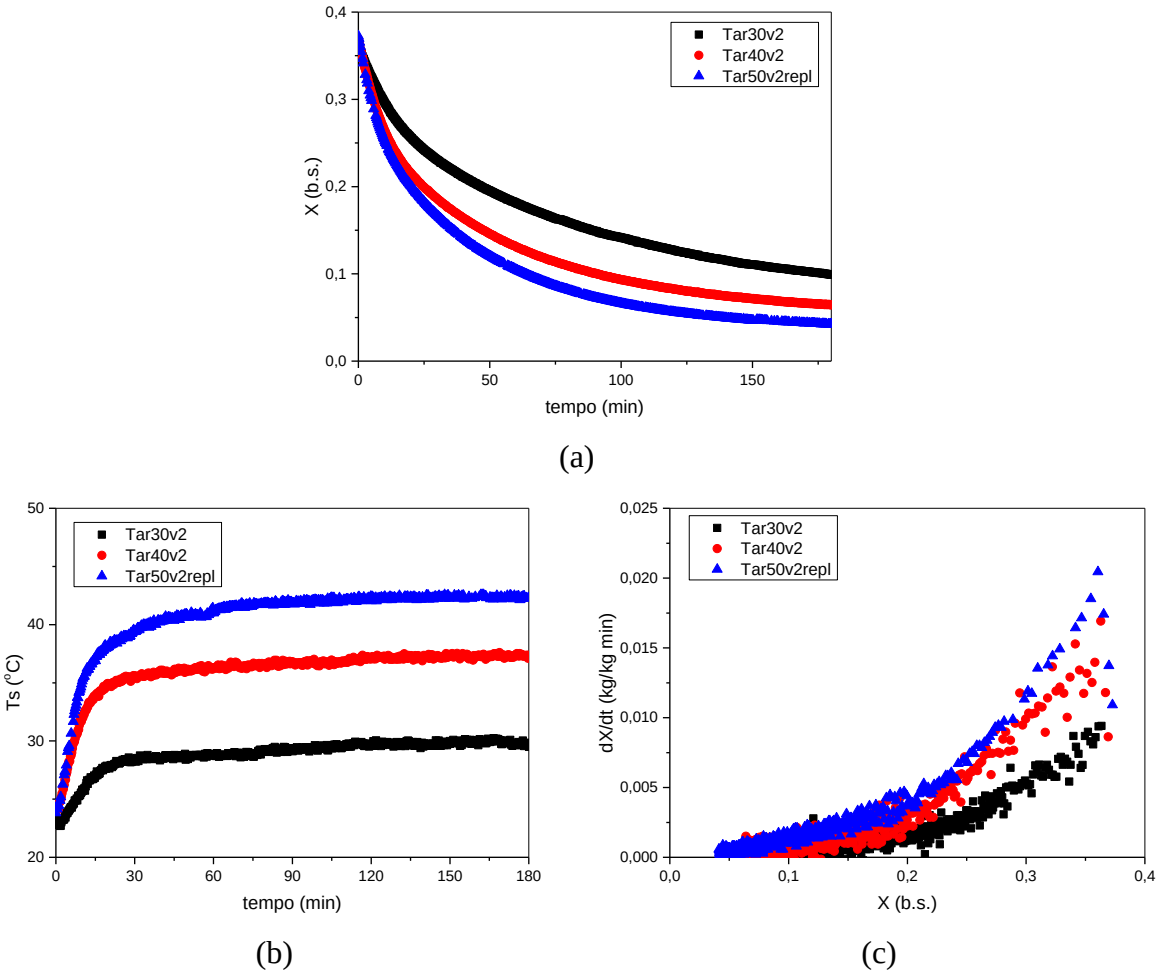


Figura 19-Características de secagem de sementes de maracujá submetidas à secagem convectiva em diferentes temperaturas do ar, a uma velocidade do ar de 2 m/s (a) Umidade em função do tempo, (b) Evolução temporal da temperatura superficial, (c) Taxa de secagem em função da umidade.

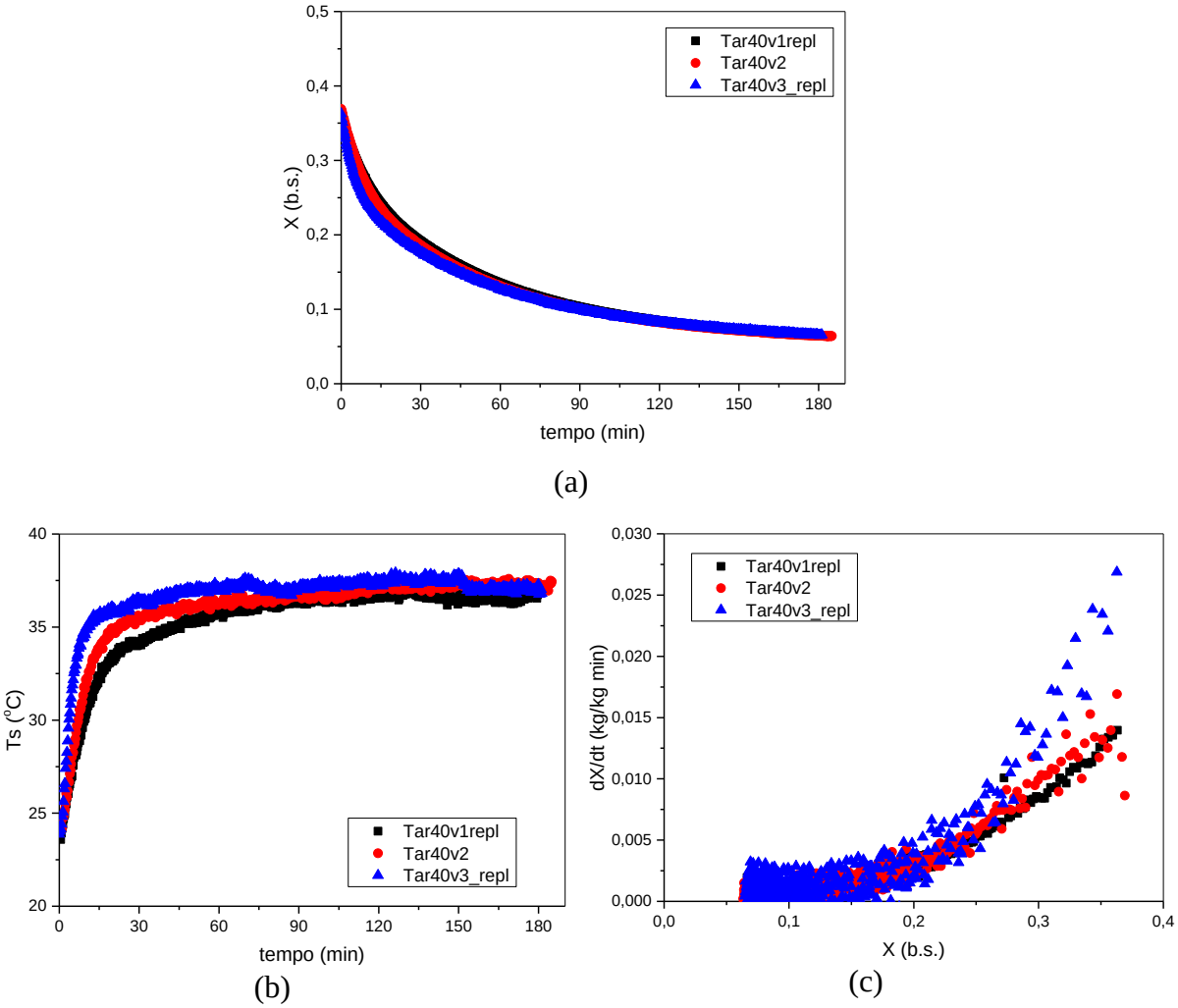


Figura 20-Características de secagem de sementes de maracujá submetidas à secagem convectiva em diferentes velocidades do ar, a uma temperatura do ar de 40ºC. (a) Umidade em função do tempo, (b) Evolução temporal da temperatura superficial, (c) Taxa de secagem em função da umidade.

A Figura 19 (b) mostra que na secagem convectiva de sementes de maracujá ocorre uma alta taxa de aquecimento no início do processo diretamente seguido por um período cujo aquecimento é mais gradual, com a temperatura da semente aumentando assintoticamente até um valor um pouco abaixo da temperatura do ar, em razão das perdas de calor para a vizinhança. Após isso, foi observado um patamar onde a temperatura permanece constante.

As curvas de secagem apresentadas nas Figuras 19 (a) e 19 (c) mostram, como esperado, que a temperatura exerce uma influência significativa sobre o processo de secagem. Um aumento da temperatura do ar resultou em maiores temperaturas das sementes, Figura 19 (c), e em maiores taxas de remoção de umidade, Figura 19 (c), e consequentemente, em menores tempos de secagem. Isto foi observado em toda a faixa de velocidade do ar utilizada.

De acordo com Borel et al. (2020), isto se deve a três fatores: primeiro, o aumento da temperatura do ar resulta num aumento do fluxo convectivo de calor; segundo, o consequente

aumento na temperatura do sólido causa o aumento da pressão de vapor d'água dentro do material, favorecendo a transferência de massa; e, finalmente, o aumento da temperatura do ar leva a uma redução da umidade relativa, tal que a diferença entre as concentrações de vapor d'água na superfície da semente e do ar aumente, aumentando assim a força motriz para a secagem.

Nota-se na Figura 20 (a) que as curvas de secagem das sementes de maracujá em diferentes velocidades mostram pequenas diferenças entre elas, sendo um indicativo de um transporte de umidade controlado principalmente pelas resistências externas. A baixa influência da velocidade do ar sobre a cinética de secagem do material pode ser atribuída à presença predominante do período de taxa decrescente, conforme pode ser constatado na curva de taxa de secagem, Figura 20 (c). Este período de secagem é caracterizado pelo transporte de umidade intrapartícula que depende principalmente da temperatura, quando comparado à velocidade do ar. Cabe destacar ainda que com base nas Figuras 20 (b) e 20 (c) é possível verificar que o efeito convectivo parece ocorrer apenas nos estágios iniciais de secagem, principalmente ao se aplicar a velocidade de 3 m/s, contribuindo para uma maior remoção da umidade superficial das partículas. Esta análise é válida para toda a faixa de temperatura estudada.

4.3.2. Difusividade mássica efetiva

Os valores de difusividade efetiva estimados para as sementes de maracujá submetidas à secagem convectiva convencional são mostrados na Tabela 4-. Com base nos baixos valores de χ^2 e valores do coeficiente de determinação R^2 acima de 0,97, verifica-se a boa qualidade de ajuste do modelo difusivo aos dados experimentais.

Tabela 4-Coeficiente de difusão efetiva para a secagem convectiva convencional.

Condições de secagem					
T_{IV} (°C)	**T_{ar} (°C)**	**V_{ar} (m/s)**	**Def (10^{11} m^2 s^{-1})**	**χ^2**	**R^2**
-	30	1	1,547	7,61E-04	0,988
-	40	1	2,597	8,09E-04	0,990
-	50	1	3,564	6,56E-04	0,988
-	30	2	1,504	1,93E-04	0,993
-	40	2	2,642	8,12E-04	0,972
-	50	2	3,768	7,16E-04	0,978
-	30	3	1,844	8,02E-04	0,985
-	40	3	2,917	1,35E-03	0,977
-	50	3	4,928	8,31E-04	0,990

A difusividade efetiva das sementes secas via convecção forçada de ar quente variou de 1,547 x 10^{-11} m^2 s^{-1} a 4,928 x 10^{-11} m^2 s^{-1}. Esses valores são relativamente menores que aqueles reportados por Váquiro et al. (2016) para a secagem convectiva de sementes de maracujá, 2,995 x 10^{-11} – 1,468 x 10^{-9} m^2 s^{-1}, obtidos sob temperaturas do ar de 40, 50 e 60°C, e velocidades do ar de 0,6 e 1,4 m/s.

Verificou-se que ao aumentar a temperatura do ar de 30 para 50°C, mantendo a velocidade do ar em 3 m/s, houve um aumento de 167,3% na difusividade efetiva. Para a velocidade de 1 m/s o aumento foi de 130%. Vários autores retratam que na secagem de produtos agrícolas ao aumentar a temperatura há um aumento no valor do coeficiente de difusão (CUEVAS *et al*., 2018; RAMACHANDRAN *et al*., 2018; CHEN *et al*., 2020).

Por sua vez, ao aumento da velocidade do ar de 1 a 3 m/s, na faixa de temperatura empregada, resultou em aumentos na difusividade efetiva de 12 a 38%. A velocidade do ar tem um efeito menor que o da temperatura do ar sobre a difusividade de umidade, corroborando que a resistência interna à transferência de massa controla o processo.

O maior valor do coeficiente de difusão efetiva observado para a secagem convectiva convencional (Tabela 4-) foi de 4,928 x 10^{-11} m^2 s^{-1} nas condições de secagem utilizando a temperatura do ar a 50°C e velocidade do ar a 3 m/s.

A Figura 21 apresenta o diagrama de Pareto com os efeitos das variáveis independentes sobre a difusividade efetiva para a secagem convectiva plotado com o auxílio do software STATISTICA 10®. Apesar dos resultados sugerirem uma influência relativa da velocidade do ar, a análise estatística com base no diagrama de Pareto mostra que o efeito da velocidade do ar sobre D_{ef} não foi significante num nível de 5% de significância. Por outro lado, D_{eff} foi significativamente afetada pelo aumento da temperatura do ar, que levou a uma intensificação da transferência de massa na secagem convectiva.

A dependência linear da difusividade efetiva (Def) com a temperatura do ar é expressa pela Equação (24) e pode ser observada na Figura 22, a qual exibe a superfície de resposta para a difusividade efetiva como uma função da temperatura e velocidade do ar.

$$Def = 1{,}227 \times 10^{-12} T_{ar} - 2{,}098 \times 10^{-11} \quad (24)$$

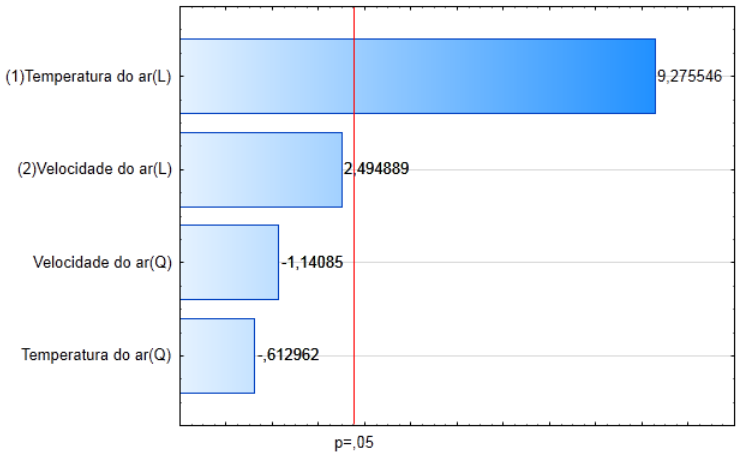


Figura 21-Diagrama de Pareto com os efeitos sobre a difusividade efetiva na secagem convectiva.

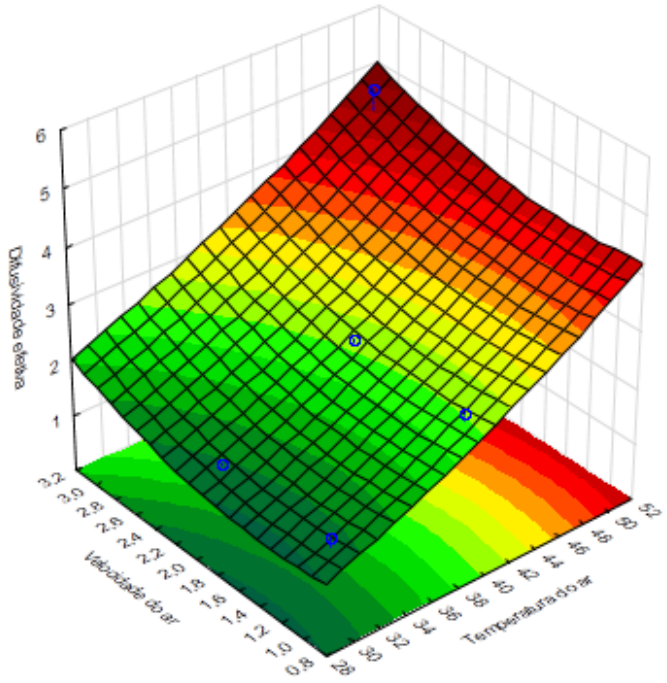


Figura 22-Superfície de resposta para a difusividade efetiva em função da temperatura e velocidade do ar na secagem convectiva.

Na Figura 22 pode ser notado também que o efeito convectivo se restringe à maior velocidade aplicada (3 m/s), a qual contribui de fato para uma maior difusividade de umidade efetiva.

4.3.3. Consumo específico de energia

Os resultados obtidos para o consumo de energia do processo de secagem convectiva convencional são sumarizados na Tabela 5.

Tabela 5-Dados do consumo energético da secagem convectiva convencional das sementes de maracujá em diferentes condições operacionais.

Condições de secagem						
T_{IV} (°C)	**T_{ar} (°C)**	**V_{ar} (m/s)**	**P_{IV} (W)**	**P_r (W)**	**P_c (W)**	**CEE (kWh/kg)**
-	30	1	-	0,34	0,12	20,0
-	40	1	-	0,80	0,12	21,0
-	50	1	-	1,14	0,12	21,5
-	30	2	-	0,39	0,14	21,8
-	40	2	-	0,90	0,14	20,9
-	50	2	-	1,29	0,14	20,6
-	30	3	-	0,39	0,16	22,1
-	40	3	-	1,18	0,16	24,8
-	50	3	-	1,69	0,16	22,3

Na secagem convectiva, o consumo específico de energia mostrou-se independente tanto da temperatura, como da velocidade do ar, conforme mostra o diagrama de Pareto da Figura 23.

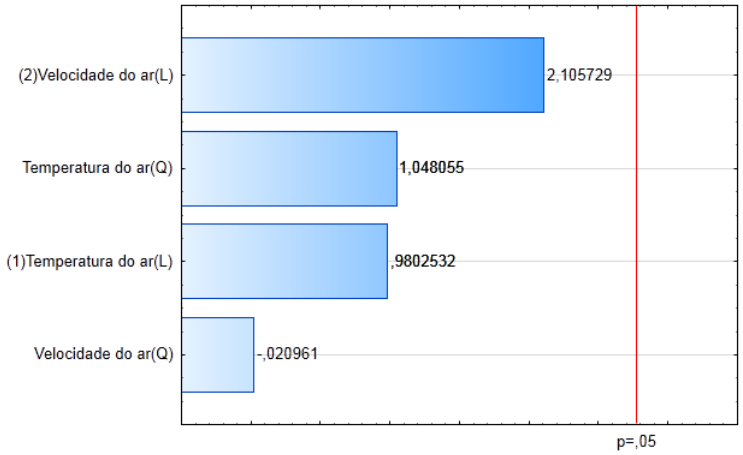


Figura 23-Diagrama de Pareto com os efeitos dos fatores estudados sobre CEE na secagem convectiva.

De acordo com o diagrama de Pareto (Figura 23), nenhum dos parâmetros avaliados (temperatura e velocidade do ar) foram estatisticamente significativos nestas condições dentro dos resultados de confiança ($p<0,05$). A redução significativa do tempo de secagem com o aumento da temperatura compensou o aumento no gasto de energia para aquecer o ar via resistências elétricas. O aumento da velocidade do ar também não impactou o consumo específico de energia do processo. Apesar de não ter influenciado significativamente o tempo do processo, o aumento no gasto energético associado ao ventilador foi desprezível.

4.4 SECAGEM INFRAVERMELHO

4.4.1. Cinética de secagem

Na Figura 24(a) a 24 (c) são apresentadas as curvas típicas de secagem, evolução temporal da temperatura superficial das sementes e de taxa de secagem, parametrizadas na temperatura da fonte, obtidas ao se aplicar somente a radiação IV para a secagem das sementes de maracujá.

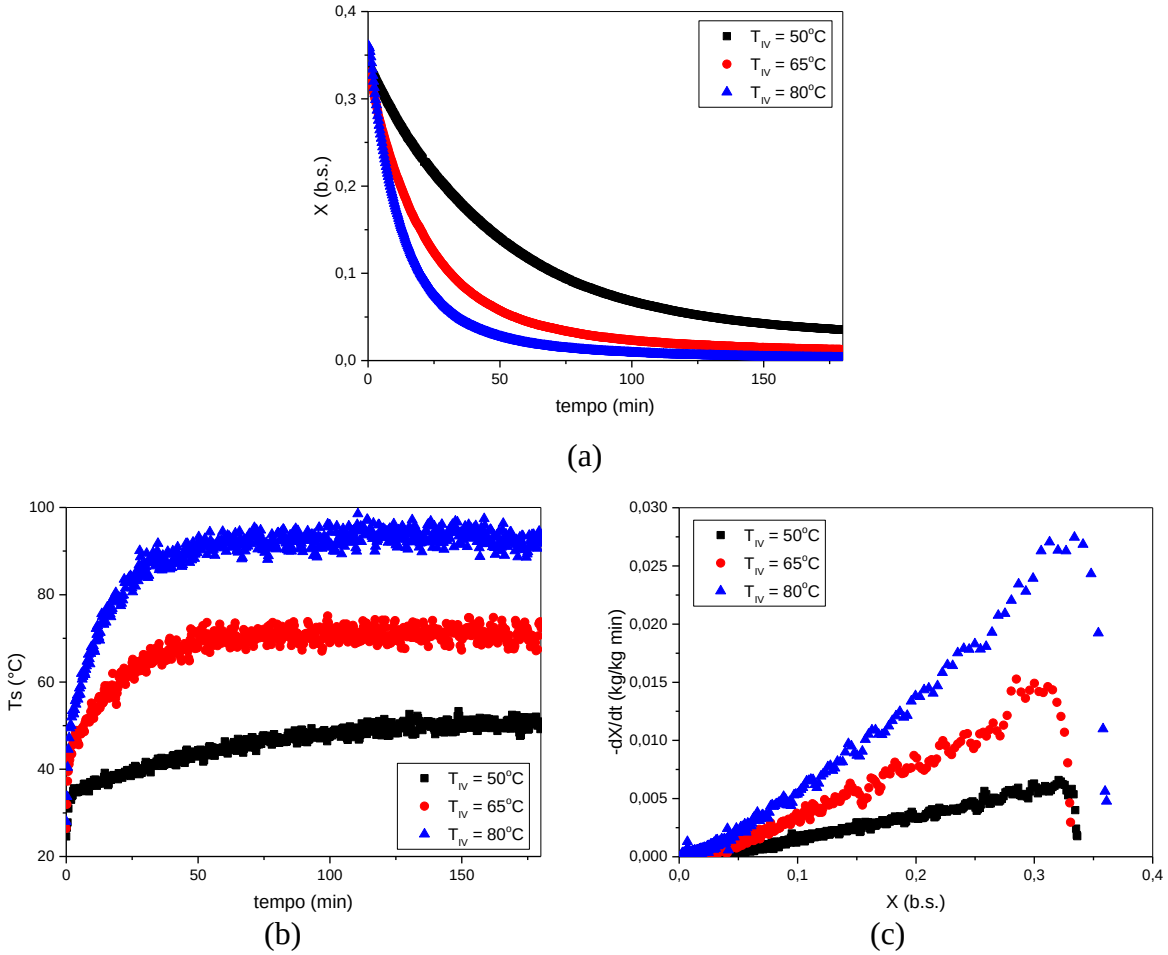


Figura 24-Características de secagem de sementes de maracujá submetidas à secagem IV em diferentes temperaturas da fonte. (a) Umidade em função do tempo, (b) Evolução temporal da temperatura superficial, (c) Taxa de secagem em função da umidade.

Os resultados obtidos mostram, como esperado, a intensificação das taxas de transferência de calor e de massa ao se aumentar a temperatura da fonte IV. Nas Figuras 24 (a) – (c) verifica-se que a temperatura superficial e a taxa de remoção de umidade das sementes aumentam, e o tempo requerido para a secagem é reduzido ao aumentar a temperatura de radiação. À medida que a temperatura da lâmpada aumenta, o fluxo de calor IV aumenta, bem

como a taxa de transferência de calor por radiação entre o emissor e a superfície das sementes, o que leva a um aumento da temperatura da amostra, aumentando assim a difusão de umidade e a taxa de evaporação.

A explicação é a mesma dada ao discutir os resultados da secagem híbrida, mas agora potencializada pela ausência da convecção forçada de ar e do seu efeito de resfriamento.

Com o aumento da temperatura da fonte de radiação de 50 a 80°C a temperatura superficial das sementes aumenta cerca de 45°C, atingindo um valor final que ultrapassa 90°C.

4.4.2. Difusividade mássica efetiva

A Tabela 6 mostra os resultados da difusividade efetiva de umidade nas sementes de maracujá expostas somente à radiação IV, com diferentes temperaturas da fonte.

Tabela 6-Coeficiente de difusão para a secagem com radiação IV

Condições de secagem					
T_{IV} (°C)	**T_{ar} (°C)**	**V_{ar} (m/s)**	**Def (10^{11} m^2 s^{-1})**	**χ^2**	**R^2**
50	-	-	2,761	3,89E-03	0,958
65	-	-	7,088	1,40E-03	0,982
80	-	-	14,912	6,86E-04	0,991

Com o aumento da temperatura da fonte IV de 50 para 80°C o valor médio da difusividade de umidade efetiva aumentou aproximadamente 440%, com o maior valor 14,9 x 10^{-11} m^2 s^{-1} sendo notado para a condição de secagem na temperatura da fonte IV de 80°C. A explicação está relacionada com o aumento da temperatura da semente causada pelo aumento da temperatura da fonte de radiação, que leva a um aumento na pressão de vapor d'água nas sementes e, consequentemente, a uma mais rápida difusão de umidade para a superfície da partícula.

Como a dependência da difusividade efetiva com a temperatura da fonte não foi adequadamente descrita por uma relação linear, ajustou-se uma relação do tipo Arrhenius aos dados experimentais. Os valores estimados para a energia de ativação e fator pré-exponencial foram 53,3 kJ/mol e 11,96 x 10^{-3} m^2 s^{-1}, respectivamente. A Figura 25 mostra a boa concordância entre os valores preditos e os experimentais.

O valor de energia de ativação obtido ao aplicar a radiação IV para secar as sementes de maracujá foi 1,85 vezes aquele reportado por Hebbar e Rastogi (2001) para castanhas de caju durante a secagem IV com temperaturas do produto entre 100 e 120ºC, e de 2,31 a 2,8

vezes os valores obtidos por Chen et al. (2017) para briquetes de quatro diferentes tipos de biomassa, com temperaturas de radiação entre 100 e 200^{o}C.

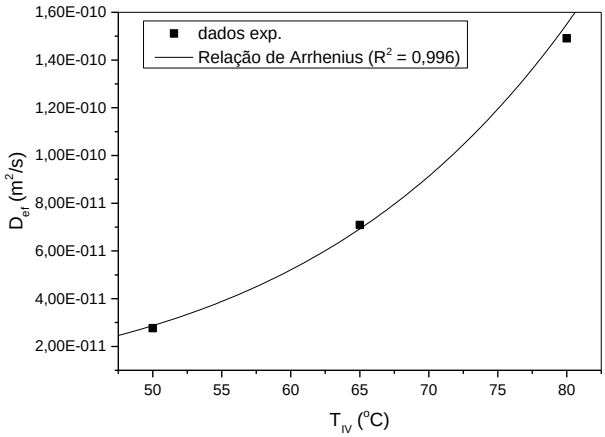


Figura 25-Difusividade de umidade efetiva em função da temperatura da fonte IV.

4.4.3. Consumo específico de energia

A Tabela 7 mostra os valores médios de CEE para a secagem IV das sementes de maracujá com convecção natural de ar, em diferentes temperaturas da fonte. Conforme análise da cinética de secagem, um aumento da temperatura da fonte causou uma redução significativa no tempo de secagem, o que contribuiu para a redução do consumo de energia do processo.

Tabela 7-Dados do consumo energético da secagem com radiação IV das sementes de maracujá em diferentes condições operacionais.

Condições de secagem						
T_{IV} (°C)	**T_{ar} (°C)**	**V_{ar} (m/s)**	**P_{IV} (W)**	**P_r (W)**	**P_c (W)**	**CEE (kWh/kg)**
50	-	-	0,42	-	-	16,2
65	-	-	0,61	-	-	10,9
80	-	-	0,70	-	-	6,3

4.5 ANÁLISE COMPARATIVA DA SECAGEM HÍBRIDA, DA SECAGEM CONVECTIVA E DA SECAGEM INFRAVERMELHO

Neste item, os resultados obtidos com a secagem híbrida são comparados com aqueles provenientes da secagem convectiva convencional e da secagem apenas com a radiação IV.

4.5.1. Cinética dos processos

Na Figura 26 são mostradas as evoluções de temperatura superficial das sementes de maracujá submetidas à secagem convectiva a 50°C e 1 m/s, à secagem com radiação IV com temperatura da fonte de 80°C e à secagem híbrida combinando a convecção de ar quente a 50°C e 1 m/s e o aquecimento IV com diferentes temperaturas da fonte IV. As correspondentes curvas típicas de umidade em função do tempo e de taxa de secagem em função do teor de umidade são apresentadas nas Figura 27 e 28, respectivamente.

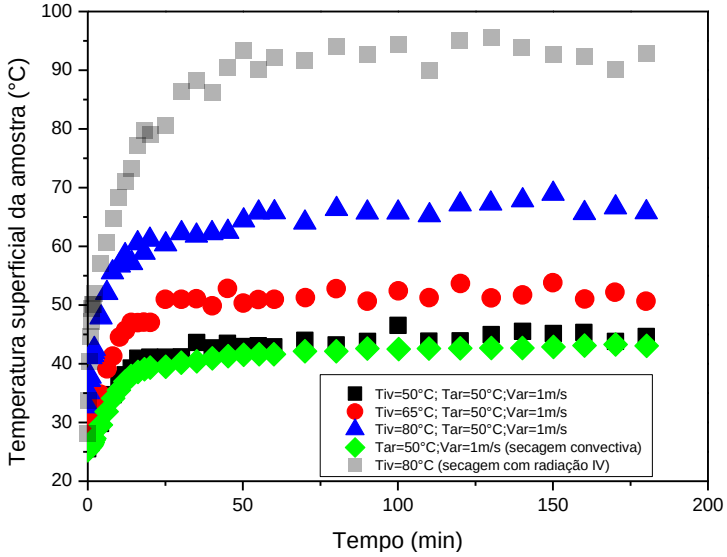


Figura 26-Evolução da temperatura superficial das sementes de maracujá submetidas a diferentes métodos de secagem.

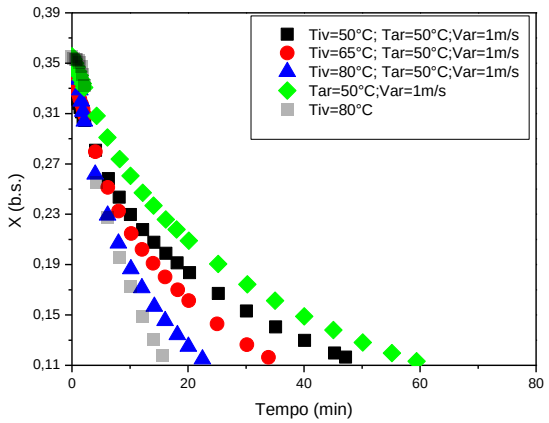


Figura 27-Curvas de umidade em função do tempo para a secagem convectiva convencional, secagem com radiação IV e para a secagem híbrida.

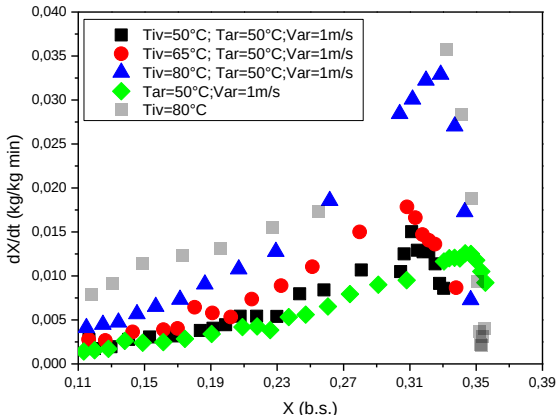


Figura 28-Curvas de taxa de secagem de sementes de maracujá sob condições de secagem convectiva convencional, secagem com radiação IV e secagem híbrida.

A partir da Figura 26 pode ser notado que a combinação da convecção forçada de ar com o aquecimento IV utilizando temperatura da fonte de 50ºC resultou num pequeno aumento de 2,5ºC na temperatura das sementes, comparado à das sementes expostas ao escoamento de ar quente somente. Os resultados sugerem que para uma temperatura do ar de 50ºC aplicar uma temperatura da fonte IV de 50ºC não é tão eficaz para intensificar o processo em relação à secagem convectiva. Por sua vez, ao aumentar a temperatura da fonte IV de 50 para 80°C, a temperatura superficial das sementes aumentou de 45 para 65°C, sendo 53% maior que a atingida durante a secagem convectiva convencional. Isto se deve à maior intensidade de radiação emitida e, consequentemente, à maior densidade de energia eletromagnética absorvida e convertida em calor dentro da partícula.

Nesse contexto, a secagem utilizando somente a radiação IV com temperatura da fonte de 80°C e convecção natural de ar, sem o efeito de resfriamento causado pelo escoamento forçado de ar, resultou na maior temperatura da amostra, cerca de 95ºC.

A menor taxa de aquecimento e a menor temperatura atingida pelas sementes submetidas à secagem apenas com ar quente, denota a baixa eficiência do aquecimento convectivo, que resulta numa menor taxa de remoção de umidade, quando comparada à secagem híbrida.

Além do aumento na temperatura da semente, a incorporação do aquecimento IV à convecção forçada de ar, no modo de secagem híbrida, resultou também em uma maior taxa de secagem e em uma redução significativa do tempo de secagem em comparação com a secagem convectiva, conforme pode ser observado nas Figuras 27 e 28.

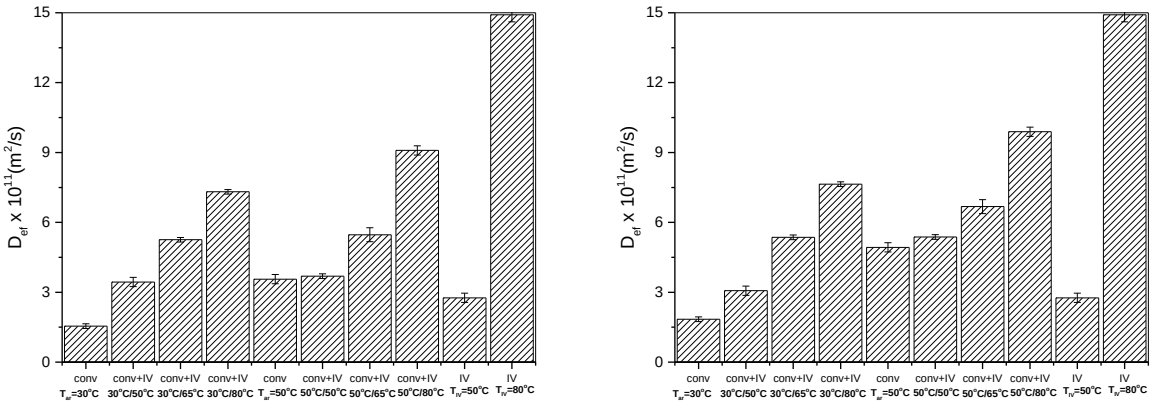
Comparado com os 60 min da secagem convectiva convencional, o tempo requerido para as sementes atingirem a umidade alvo de 0,11 b.s. foi reduzido entre 20 e 64% na secagem híbrida, a depender da temperatura da fonte IV empregada.

Entre todos os métodos e condições de secagem apresentados na Figura 27, a secagem IV com convecção natural foi a mais rápida e durou somente 15 min. Cabe destacar, no entanto, que ao combinar com o escoamento forçado de ar a 50ºC e 1 m/s foi obtido um tempo de secagem de apenas 22 min, mas com o material atingindo uma temperatura 33% menor, o que pode contribuir para a preservação da qualidade do produto.

Como pode ser observado na Figura 28, em geral a taxa de remoção de umidade na secagem combinada foi maior que a da secagem convectiva e menor que a da secagem IV com convecção natural.

4.5.2. Difusividade efetiva

Nas Figuras 29 (a) e 29 (b) são comparadas as difusividades efetivas de umidade nas sementes de maracujá nos diferentes métodos e condições de secagem investigados.



(a) v_{ar} = 1 m/s (b) v_{ar} = 3 m/s

Figura 29-Difusividades mássicas efetivas em sementes de maracujá submetidas à secagem convectiva e à secagem combinada, em diferentes temperaturas do ar e da fonte IV. (a) v_{ar} = 1 m/s; (b) v_{ar} = 3 m/s.

Os valores de difusividade de umidade das sementes de maracujá submetidas à secagem híbrida foram maiores comparadas àqueles obtidos para a secagem convectiva. Resultados estes coincidentes com os reportados por Puente-Diaz et al. (2013) e Zhang et al. (2020). Isto pode ser explicado pelo fato da radiação IV aumentar a energia de ativação das moléculas de água, resultando numa maior mobilidade da umidade (Khir et al., 2011).

Por sua vez, a aplicação da radiação IV combinada com a convecção forçada de ar quente foi somente mais eficiente (em termos de Def) que a secagem IV com convecção natural, para a temperatura da fonte IV de 50^{o}C, resultando na faixa de temperatura e velocidade do ar empregada em valores de D_{ef} 33 a 95% superiores.

Quando T_{IV} = 80 ^{o}C, a difusividade nas sementes sob condições de secagem híbridas foi 33 a 40% menor que aquela das sementes expostas somente à radiação IV. Para T_{IV} = 65^{o}C, T_{ar} = 50^{o}C e v_{ar} = 3 m/s, as difusividades obtidas nos dois métodos apresentaram valores comparáveis, com uma diferença de apenas 4% entre eles.

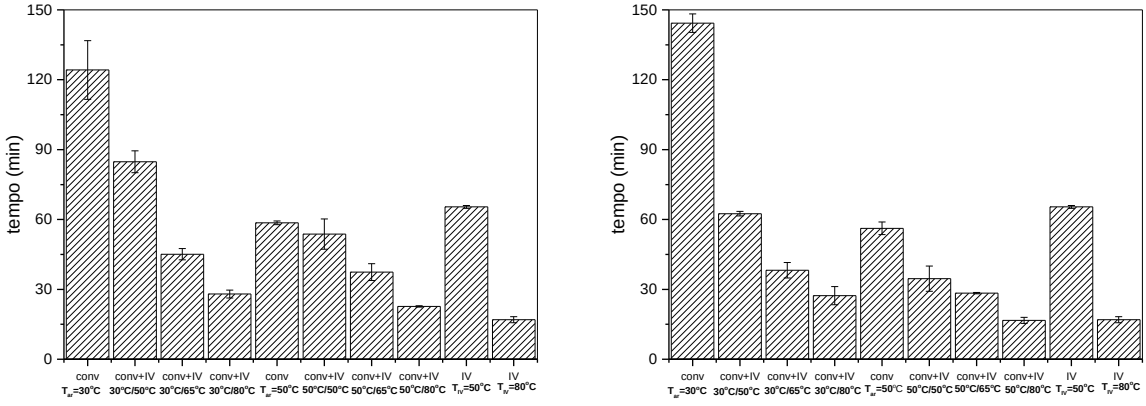
Esses diferentes comportamentos podem ser explicados pelos diferentes efeitos dos fluxos de calor radiante, convectivo e evaporativo nos diferentes períodos de secagem, conforme reportado por Onwude et al. (2019).

Na secagem combinada utilizando temperatura da fonte IV de 50º, em razão da menor intensidade de energia eletromagnética emitida e absorvida pelas sementes, o aquecimento do material é devido principalmente ao efeito acoplado da transferência de calor por radiação IV e convecção forçada do ar para a superfície da partícula.

A maior densidade de fluxo de energia eletromagnética causada pela temperatura da lâmpada IV de 80 ºC faz com que, desde o estágio inicial do processo, a geração interna de calor nas sementes seja maior que o calor transferido por convecção e as sementes atinjam níveis de temperatura maiores que do ar. Assim, o efeito do aquecimento convectivo é logo eliminado e o escoamento do ar passa a ter efeito de resfriamento. A convecção forçada de ar combinada ao aquecimento IV utilizando temperatura da fonte de 80ºC contribui para prevenir o superaquecimento da amostra e, consequentemente, a degradação da qualidade do produto.

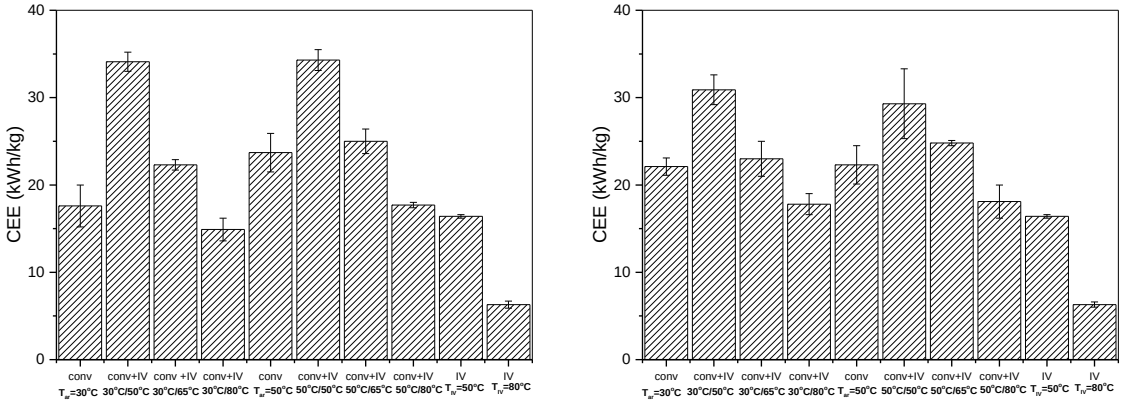
4.5.3. Tempo e consumo de energia dos processos

As Figuras 30 e 31 mostram os valores médios de tempo e CEE da secagem convectiva e da secagem híbrida de sementes de maracujá, sob diferentes condições de temperatura do ar e temperatura da fonte IV, em velocidades do ar de 1 m/s e 3 m/s, respectivamente.



(a) v_{ar} = 1 m/s (b) v_{ar} = 3 m/s

Figura 30-Tempo requerido para atingir o teor de umidade alvo das sementes de maracujá quando submetidas à secagem convectiva e à secagem combinada, em diferentes temperaturas do ar e da fonte IV. (a) v_{ar} = 1 m/s; (b) v_{ar} = 3 m/s.



(a) v_{ar} = 1 m/s (b) v_{ar} = 3 m/s

Figura 31-Consumo específico de energia dos processos de secagem convectiva e secagem combinada, em diferentes temperaturas do ar e da fonte IV. (a) v_{ar} = 1 m/s; (b) v_{ar} = 3 m/s.

Para qualquer uma das temperaturas e velocidades do ar empregadas, a aplicação da radiação IV contribuiu para reduzir o tempo necessário para atingir o teor de umidade alvo das sementes de maracujá, de 0,11 b.s. Em relação ao tempo da secagem convectiva conduzida com T_{ar} = 30ºC e v_{ar} = 1,0 m/s, as reduções observadas no tempo foram de 31,7%, 63,7% e 77,5%, ao se utilizar temperaturas da fonte IV de 50, 65 e 80ºC, respectivamente. Nota-se também a partir da Figura 30 que ao aumentar a temperatura do ar para 50ºC, menor é o efeito da secagem combinada, conforme evidenciado pelas menores reduções no tempo do processo: 8,4%, 36,2% e 61,2%. Tendência similar foi observada para a velocidade do ar de 3 m/s.

A combinação da maior velocidade e maior temperatura do ar com a maior temperatura da fonte IV levou ao menor tempo do processo de secagem híbrida, 16,7 ± 1,3 min, frente aos 56,2 ± 2,7 min da secagem convencional, nas mesmas condições de temperatura e velocidade do ar.

Em toda a faixa de temperatura e velocidade do ar investigada, a incorporação do aquecimento infravermelho só resultou em menores valores de CEE comparados àqueles da secagem convectiva ao ser utilizada a temperatura da fonte IV de 80ºC, que levou a reduções de 15 a 28% no consumo energético do processo. Apesar de nas condições de temperatura da fonte de 50ºC e 65ºC o tempo de secagem ter sido reduzido em relação ao da secagem convectiva, o consumo de energia foi maior porque a energia gasta pela lâmpada IV foi maior que (superou) a energia economizada devido à redução do tempo de secagem.

Logo, a secagem híbrida das sementes de maracujá se mostra viável ou efetiva, do ponto de vista do consumo energético, a partir do uso de temperaturas da fonte IV superiores ou iguais a 80ºC.

Alguns trabalhos na literatura (Zhang *et al.*, 2020, Kaveh *et al.*, 2020) relatam o maior consumo de energia do processo combinando a radiação IV e o escoamento de ar quente em relação à secagem convectiva.

A partir das Figuras 30 e 31 é possível também efetuar comparações com o tempo e o consumo energético do processo que faz uso apenas do aquecimento IV, nas temperaturas da fonte de 50 e 80ºC.

Ao utilizar T_{IV} = 50ºC e v_{ar} = 1 m/s, as combinações com temperaturas do ar de 40 e 50ºC parecem ser mais efetivas para reduzir o tempo do processo em relação àquele obtido ao se aplicar somente o aquecimento IV. Mas em qualquer uma das condições, o CEE praticamente dobra. Ao aumentar a velocidade do ar para 3 m/s, qualquer uma das temperaturas do ar empregadas, contribuem para tempos de secagem menores que o da secagem IV isolada, mas com aumentos de 78 a 88% em CEE.

Para T_{IV} = 80ºC e v_{ar} = 1 m/s, a combinação com ar aquecido em qualquer uma das temperaturas (30, 40 ou 50 ºC) não é suficiente para levar a tempos de processo menores que aquele obtido com a secagem IV, apresentando ainda um consumo de energia 2,4 a 2,8 vezes maior. Com o aumento da velocidade do ar para 3 m/s, nas temperaturas de 40 e 50ºC o tempo do processo combinado passa a ser comparável com a secagem IV, mas com aumentos em CEE de 165 a 187%.

Verifica-se, em toda a faixa investigada, que a secagem combinada aumenta de duas a três vezes o consumo específico de energia em relação à secagem IV. Na secagem combinada, além do incremento de gasto energético com a convecção forçada de ar e o seu aquecimento via resistências elétricas, a eficiência do aquecimento IV faz com que a amostra atinja no início do processo temperaturas superiores às do ar, cujo escoamento passa a ter o propósito de arrefecimento das sementes, evitando seu superaquecimento e possíveis danos térmicos. Assim, o tempo do processo na maioria das condições tende a ser maior que o da secagem IV.

Deve-se destacar que as vantagens técnicas e econômicas do aquecimento IV devem ser acompanhadas pela qualidade do produto, que será avaliada no próximo item.

4.6 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DAS SEMENTES

Nas Figura 32 (a) e (b) são mostradas fotos de sementes de maracujá após o teste com tetrazólio.

Figura 32-Sementes de maracujá após teste com tetrazólio. (a) Semente não viável. (b) Semente viável.

A Figura 32 (a) ilustra o caso de uma semente não viável, de coloração branca, que indica que os tecidos da semente estão mortos. A semente da Figura 32 (b) é considerada viável, por ter coloração rósea uniforme e tecidos com aspecto normal e firme

A Tabela 8 mostra os resultados obtidos para a viabilidade das sementes secas em diferentes condições da secagem híbrida, ao se aplicar o teste de tetrazólio. Nas Tabelas 9 e 10 são apresentados os resultados correspondentes ao se empregar a secagem convectiva e a secagem IV, respectivamente.

Tabela 8-Viabilidade das sementes submetidas à secagem híbrida.

T_{IV} (°C)	T_{ar} (°C)	sementes viáveis %
50	30	70,8 ± 10,6
65	30	65,0 ± 30,0
80	30	69,2 ± 19,3
50	40	65,8 ± 20,6
65	40	77,5 ± 1,7
80	40	65,8 ± 4,4
50	50	67,5 ± 18,3
65	50	70,0 ± 16,7
80	50	71,7 ± 11,1

Tabela 9- Viabilidade das sementes submetidas à secagem convectiva convencional.

T_{ar} (°C)	sementes viáveis %
30	48,3 ± 6,9
40	58,3 ± 6,1
50	64,2 ± 7,4

Tabela 10-Viabilidade das sementes submetidas à secagem com radiação IV.

T_{IV} (°C)	sementes viáveis %
50	57,5
65	40
80	12,5

Na secagem combinada, Tabela 8, seja ao fixar a temperatura do ar e variar a temperatura da fonte, seja ao manter a temperatura da fonte e variar a do ar, as diferenças entre os percentuais de sementes viáveis nas diferentes condições ficaram dentro das incertezas. Logo, a viabilidade das sementes de maracujá mostrou-se independente das condições empregadas na secagem combinada.

Para as temperaturas do ar de 30, 40 e 50ºC, ao se variar a temperatura da fonte de 50 para 80ºC, os percentuais médios de sementes viáveis foram de 68,3, 69,7 e 69,7%, respectivamente.

As sementes secas via convecção forçada de ar apresentaram menores percentuais de viabilidade em comparação àquelas secas via método combinado. É interessante notar na Tabela 9 que o percentual de sementes viáveis aumenta com a redução do tempo de residência no secador, resultante da maior temperatura do ar empregada, chegando a um valor comparável (pouco inferior) ao das sementes submetidas à secagem híbrida.

Na secagem IV, Tabela 10, houve uma redução de aproximadamente 79% no índice de sementes viáveis ao se aumentar a temperatura da fonte de 50 para 80ºC. Ademais, as sementes de maracujá expostas somente à radiação IV, na faixa operacional estudada, apresentaram uma viabilidade significativamente menor, que aquela das sementes submetidas à secagem híbrida.

Os resultados mostram que, apesar de intensificar as taxas de secagem, reduzindo o tempo e o consumo de energia, a secagem IV pura teve um impacto negativo sobre a qualidade fisiológica das sementes, em razão das elevadas temperaturas atingidas pelo produto.

5. CONCLUSÕES

À unidade de secagem IV existente no LFTSP/UFS foi incorporado um sistema de convecção de ar aquecido, devidamente instrumentado, que possibilitou o monitoramento de importantes variáveis do processo, como a temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, bem como da temperatura da fonte IV, permitindo a realização de estudos sobre a secagem híbrida.

O comportamento de secagem das sementes de maracujá, ao se combinar o aquecimento convectivo e o aquecimento IV, foi caracterizado pela presença dos períodos de aquecimento e de taxa decrescente, com predominância deste último, indicando que a difusão molecular de umidade dentro da partícula é o mecanismo que controla a transferência de massa na secagem híbrida das sementes de maracujá. Comportamentos similares foram observados na secagem convectiva e na secagem IV.

O modelo difusivo representou adequadamente os dados experimentais referentes aos períodos de taxa decrescente, com altos valores de R^2 e baixos valores de χ^2.

A difusividade de umidade efetiva nas sementes de maracujá submetidas ao processo envolvendo a aplicação combinada da radiação IV e da convecção forçada de ar variou de $3{,}07 \cdot 10^{-11}$ a $9{,}89 \cdot 10^{-11}$ $m^2 s^1$. Para as diferentes condições de secagem convectiva convencional, Def variou de $1{,}55 \cdot 10^{-11}$ a $4{,}93 \cdot 10^{-11}$ $m^2 s^1$. Já na secagem com radiação IV variou de $2{,}76 \cdot 10^{-11}$ a $14{,}91 \cdot 10^{-11}$ $m^2 s^1$.

Na faixa operacional investigada, uma análise estatística mostrou que na secagem combinada tanto a temperatura do ar como temperatura da fonte de radiação IV exercem efeitos lineares positivos sobre difusividade efetiva. O aumento no valor de qualquer uma dessas variáveis resulta num aumento do calor fornecido ao sistema por convecção forçada e/ou via radiação IV, aumentando a pressão de vapor da água contida no material e, por conseguinte, a taxa de evaporação de umidade do sólido.

Por sua vez, o consumo específico de energia mostrou-se dependente apenas da temperatura da fonte IV, a qual teve tem um efeito linear negativo sobre CEE.

A secagem de sementes de maracujá combinando a radiação IV e o aquecimento convectivo apresentou maior taxa de remoção de umidade e menor consumo energético específico que a secagem convectiva convencional.

Embora a secagem híbrida tenha apresentado um desempenho em termos de tempo e consumo de energia do processo inferior ao da secagem envolvendo apenas o uso da radiação IV, ela contribuiu para uma maior conservação da viabilidade fisiológica das sementes.

Intensificação das taxas de secagem e redução da degradação da qualidade do produto podem, portanto, ser obtidos simultaneamente, se níveis adequados de temperatura da fonte, temperatura e velocidade do ar são adequadamente selecionados para o processo de secagem híbrida.

Com base nos resultados obtidos pode ser concluído que a condição envolvendo T_{IV} = 80°C, T_{ar} = 30°C e v_{ar} = 1 m/s, é boa opção para à intensificação do processo de secagem de sementes de maracujá, com maior preservação de sua qualidade fisiológica e obtenção de um produto com menor consumo energético (13,6 kWh/kg).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKAMINE, E.K., BEAUMONT, J.H., BOWERS, F.A.I., HAMILTON, R.A., NISHIDA, T., SHERMAN, G.D., SHOJI, K., STOREY, W.B., YEE, W.W.J., ONSDORFF, T., SHAW, T.N. **Passion fruit culture in Hawaii**. Hawaii, University of Hawaii, 1956. 35p. (Extension Circular, 345).

ANDRIC, S.E., BRUNA, E.D., KAIDA, A.M. Preservação de sementes de maracujá doce (*Passiflora alata*) para fins de semeadura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 16, 2000, Fortaleza. **Resumos...**, Fortaleza, 2000. (CDROM).

ARAÚJO, M. E. V., BARBOSA, E. G. B., OLIVEIRA, A. C. L. MILAGRES, R. S., PINTO, F. A .C., CORRÊA, P. C. Physical properties of yellow passion fruit seeds (passiflora edulis) during the drying process. Scientia Horticulturae, v. 261, 109032, 2020.

BARBOSA NETO, A. M.; MARQUES, L. G.; PRADO, M. M.; SARTORI, D. J. Mass transfer in infrared drying of gel-coated seeds. **Advances in Chemical Engineering Science,** v. 4, p. 39-48, 2014.

BOREL, L.D.; MARQUES, L.G.; PRADO, M.M. Performance evaluation of an infrared heating-assisted fluidized bed dryer for processing bee-pollen grains. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 155, 108044, 2020. DOI: 10.1016/j.cep.2020.108044.

BORIN, I.; FRASCARELI, E. C.; MAURO, M. A.; KIMURA, M. Efeito do pré-tratamento osmótico com sacarose e cloreto de sódio sobre a secagem convectiva de abóbora. **Food Science And Technology**, v. 28, n. 3, p. 39-50, 2008.

BRANDÃO, R. J. SANTOS, L. D. M., MARQUES, L. G., PRADO, M. M. Heat and mass transfer and energy aspects in combined infrared-convective drying of bee-pollen. **Defect and Diffusion Forum**, v. 364, p. 9-17, 2015.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W. & HALL, C.W. **Drying and Storage of Grains and Oilseeds**. Westport: The AVI Publishing Company, 1992, 450 p.

CAMPOS, D. A.; COSCUETA, E. R.; VILAS-BOAS, A. A.; SILVA, S.; TEIXEIRA, J. A.; PASTRANA, L. M.; PINTADO, M. M. Impact of functional flours from pineapple by-products on human intestinal microbiota. **Journal of Functional Foods**, v. 67, 103830, 2020. DOI: 10.1016/j.jff.2020.103830.

CARLESSO, V. DE O.; BERBERT, P. A.; SILVA, R. F. DA; DETMANN, E. Secagem e armazenamento de sementes de maracujá amarelo (*Passiflora edulis* sims f. Flavicarpa degener). **Revista Brasileira de Sementes**, v. 30, n. 2, p. 65–74, 2008.

CATUNDA, P. H. A.; VIEIRA, H.D.; SILVA, R.F.; POSSE, S. C. P. Influência do teor de água da embalagem e das condições de armazenamento na qualidade de sementes de maracujá amarelo. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 25, n. 1, p. 65-71, 2003.

CHAU, C.F. E HUANG, Y. L. Characterization of passion fruit seed fibres – a potencial fibre source. **Food Chemistry**, v. 85, p. 189-194, 2004.

CHEN, N.N., CHEN, M.Q., FU, B.A., SONG, J.J. Far-Infrared Irradiation Drying Behavior of Typical Biomass Briquettes. **Energy**, v. 121, p. 726–738, 2017.

CHEN, C.; VENKITASAMY, C.; ZHANG, W.; KHIR, R.; UPADHYAYA, S.; PAN, Z. Effective moisture diffusivity and drying simulation of walnuts under hot air. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 150, 119283, 2020. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119283.

CORRÊA, P. C.; ARAÚJO, E. F.; JÚNIOR, P. C. A. Determinação dos parâmetros de secagem em camada delgada de sementes de milho doce (*Zea mays* L.). **Revista Brasileira de Milho e Sorgo,** v. 2, n. 2, p. 110-119, 2003.

COSTA, E.; SANTOS, L. C. R. DOS; CARVALHO, C. DE; LEAL, P. A. M.; GOMES, V. A. Volumes de substratos comerciais, solo e composto orgânico afetando a formação de mudas de maracujazeiro-amarelo em diferentes ambientes de cultivo. **Revista Ceres**, v. 58, n.2, p. 216-222, 2011.

COSTA, C.J.; SANTOS, C.P. dos. Teste de tetrazólio em sementes de leucena. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 32, p. 66-72, 2010. DOI: 10.1590/S0101-31222010000200008.

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion.** 2. ed. New York: Oxford University Press.1992

CUEVAS, M.; MARTÍNEZ-CARTAS, M. L; PÉREZ-VILLAREJO, L. H.; GARCÍA-MARTÍN, J.; SÁNCHEZ, S. Drying kinetics and effective water diffusivities in olive stone and olive-tree pruning. **Renewable Energy**, v. 132, p. 911–920, 2019. DOI: 10.1016/j.renene.2018.08.053.

DELOUCHE, J.C.; BaASKIN, C.C. Accelerated aging techniques for predicting the relative storability of seed lots. **Seed Science and Technology**, v. 1, p.27-452, 1973.

DIAMANTE, L. M. *et al*. A new mathematical model for thin layer drying of fruits. International. **Journal of Food Science & Technology**, v. 45, n. 9, p. 1956-1962, 2010.

DONGBANG, W.; NUANTONG, W. Drying kinetics of glutinous rice using an infrared irra iation technique. **Engineering and Applied Science Research**, v.45, n. 2, p. 127-131, 2018.

DURANTE, M.; MONTEFUSCO, A.; MARRESE, P. P.; SOCCIO, Mario; PASTORE, D.; PIRO, G.; MITA, G.; LENUCCI, M. S. Seeds of pomegranate, tomato and grapes: An underestimated source of natural bioactive molecules and antioxidants from agri-food by-products. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 63, p. 65–72, 2017. DOI: 10.1016/j.jfca.2017.07.026.

FACHINELLO, M. R.; POZZA, P. C.; FURLAN, A. C.; PAULA, V. R. C. de; BONAGURIO, L. P.; MARCATO, S. M.; LEAL, I. F.; HUEPA, L. M. D. Nutritional evaluation of passion fruit seed meal for meat quails. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 17, n. 2, p. 202–213, 2016. DOI: 10.1590/S1519-99402016000200008.

FERRARI, R.; COLUSSI, F.; AYUB, R. A. Caracterização de subprodutos da industrialização do maracujá-aproveitamento das sementes. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 26, n. 1, p. 101–102, 2004. DOI: 10.1590/S0100-29452004000100027.

FERREIRA, G. Propagação do maracujazeiro. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 21, n. 206, p.18-24, 2000.

FINCH-SAVAGE, W.E.; BASSEL, G. W. Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation. **Journal of experimental botany**, v. 67, n. 3, p. 567-591, 2016.

FRANÇA-NETO, J. B.; KRZYZANOWSKI, F. C. Tetrazolium: an important test for physiological seed quality evaluation. **Journal of Seed Science**, v. 41, n. 3, p. 359–366, 2019. DOI: 10.1590/2317-1545v41n3223104.

GHANEM, N.; MIHOUBI, D.; BONAZZI, C.; KECHAOU, N.; BOUDHRIOUA, N. Drying characteristics of lemon by-product (*Citrus limon* v. Lunari): effects of drying modes on quality attributes kinetics. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, p. 303-322, 2020.

GHAVIDELAN, M. A.; CHAYJAN R. A. Modeling engineering characteristics of hazelnut kernel during infrared fluidized bed drying. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 11, n. 2, p. 460–478, 2017.

HAMMOUDA, D. MIHOUBI, Comparative Numerical Study of Kaolin Clay with Three Drying Methods: Convective, Convective–Microwave and Convective Infrared Modes, **Energy Conversion and Management, v. 87, p.832-839, 2014**.

HAO, Q. *et al*. Evaluation of seed vigor in soybean germplasms from different eco-regions. **Oil Crop Science**, v. 5, n. 1, p. 22–25, 2020.

HEBBAR, H. U.; VISHWANATHAN, K. H; RAMESH, M. N. 2004. Development of combined infrared and hot air dryer hot air dryer for vegetables. **Journal of Food Engineering**, v.65, p. 557–563.

HEBBAR, H. U.; RASTOGI, N. K. Mass transfer during infrared drying of cashew kernel. **Journal of Food Engineering**, v. 47, p. 1-5, 2001.

HUC-MATHIS, D.; JOURNET, C.; FAYOLLE, N.; BOSC, V. Emulsifying properties of food by-products: Valorizing apple pomace and oat bran. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 568, p. 84–91, 2019. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.02.001.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal, 2018**. disponível em: [http://www.cnpmf.embrapa.br/base_de_dados/index_pdf/dados/brasil/maracuja/b1_maracuja.pdf]. Acesso em: 23 set. 2020.

IOANNIDOU, O.; ZABANIOTOU, I. Agricultural residues as precursors for activated carbon production—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, n. 9, p.1966-2005, 2007.

KALETA, A.; GÓRNICKI, K. Evaluation of drying models of apple (var. McIntosh) dried in a convective dryer. **International Journal of Food Science & Technology**, v.45, n. 5, p. 891-898, 2010.

KAPOOR, S.; GANDHI, N.; TYAGI, S.; Kumar; KAUR, A.; MAHAJAN, B. V. C. Extraction and characterization of guava seed oil: A novel industrial byproduct. **LWT – Food Science and Technology**, v. 132, 109882, 2020. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.109882.

KAVEH, M.; CHAYJAN, R. A.; TOGHINEZHAD, e.; SHARABIANI, V. R.; MOTEVALI, A. Evaluation of specific energy consumption and GHG emissions for different drying methods (Case study: Pistacia Atlantica). **Journal of Cleaner Production**, v. 259, 120963, 2020.

KEEY, R. B. **Drying: principles and practice**. Oxford: Pergamon Press, 1972.

KHIR, R.; PAN, Z.; SALIM, A.; HARTSOUGH, B. R.; MOHAMED, S. Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying**. LTW – Food Science and Technology**, v. 44, n. 4, p. 1126 – 1132, 2011.

KOTOVICZ, V.; ELLENDERSEN, L. S. N.; CLARINDO, M. D. M.; MASSON, M. L. Influence of process conditions on the kinetics of the osmotic dehydration of yacon (p olymnia sonchifolia) in fructose solution. **Journal of Food Processing and Preservation,** v. 38, n. 3, p. 1385-1397, 2014.

KRISHNAMURTHY, K.; KHURANA, H. K.; JUN, S.; IRUDAYARAJ, J.; DEMIRCI, A. Infrared heating in food processing: an overview. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 7, n. 1, p. 2-13, 2008.

KUMAR, P.; HEBBAR, H.; RAMESH, M.N. suitability of thin layer models for infrared–hot air-drying of onion slices. **Food Science and Technology,** v. 39, p. 700–705, 2006.

LIMA A.G.B, DELGADO J.M.P.Q., NETO S.R.F., Franco C.M.R. Intermittent Drying: Fundamentals, Modeling and Applications. In: Delgado J., Barbosa de Lima A. (eds). **Drying and Energy Technologies. Advanced Structured Materials**, v. 63. Springer, Cham., 2016, p. 19-41. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19767-8_2

LIMA, A. A; CUNHA, M. A. P. Maracujá: produção e qualidade na passicultura. Cruz das Almas: **Embrapa Mandioca e Fruticultura**, 2004. 396 p.

LIU, C. S.; CHEN, S. Y.; WU, W. F.; WANG, J. F.; ZHOU, H. B. The experimental study on infrared dryer for corn. **Applied Mechanics and Materials**, v. 723, p. 711-714, 2015

LOPES, F. J. **Secagem convectiva e secagem micro-ondas-vácuo de yacon osmoticamente pré-tratado**. 2016. 131 p. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, 2016.

LUIKOV, A.V. **Analytical Heat Diffusion Theory**. 2a. ed. Moscow: Academic Press. 1968

LYU, Y.; BI, J.; CHEN, Q.; WU, X.; QIAO, Y.; HOU, .H; ZHANG, X. Bioaccessibility of carotenoids and antioxidant capacity of seed-used pumpkin byproducts powders as affected by

particle size and corn oil during in vitro digestion process. **Food Chemistry**, v. 343, 128541, 2021. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.128541.

MARCOS FILHO, J. Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 4, p. 363–374, 2015. DOI: 10.1590/0103-9016-2015-0007.

MAYOR, L.; SERENO, A. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. **Journal of Food Engineering,** v. 61, n. 3, p. 373-386, 2004.

MENG, L-S, WANG, Y - B, LOAKE, G. J.; JIANG, J - H Seed Embryo Development Is Regulated via na *AN3-MINI3* Gene Cascade. **Frontiers in Plant Science,** v. 7, 1645, 2016. doi: 10.3389/fpls.2016.01645

MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**, New York: Gordon and Breach Publishers, 1986, 841 p..

MORENO, E. C.; TIAGO, P., ROSSI, F. S., ROSSI, A. P. B. Caracterização morfométrica de frutos e sementes do maracujá-amarelo (*Passiflora edulis* Sims f. Flavicarpa Degener). **Enciclopédia Biosfera**, v.11, n. 11, 2015.

MOTEVALI, A.; MINAEI, S.; KHOSHTAGAZA M.H. Evaluation of energy consumption in different drying methods. **Energy Conversion and Management**, v. 52, p. 1192–1199, 2011.

MUJUMDAR, A.S. Principles, Classification, and Selection of Dryers. In: *In:* MUJUMDAR, A. S. (org.). **Handbook of Industrial Drying**. 3ªed. Boca Raton: CRC Press, 2006, p. 3-32.

NACHAISIN, M., JAMRADLOEDLUK, J., NIAMNUY, C. Application of combined far-infrared radiation and air convection for drying of instant germinated brown rice. **Journal of Food Process Engineering**, v. 39, p. 306–318, 2016.

NIMMOL, C.; DEVAHASTIN, S. Evaluation of performance and energy consumption of an impinging stream dryer for paddy. **Applied Thermal Engineering**, v. 30, p. 2204-2212, 2010.

NOURMOHAMADI- MOGHADAMI, A. RAHMANIAN- KOUSHKAKI, H. ZARE, D. KARIMI, G. Experimental and theoretical investigation of hot air- infrared thin layer drying of corn in a fixed and vibratory bed dryer. **Engineering in Agriculture, Environment and Food**, v. 10, n. 3, p. 191-197, 2017.

OLIVEIRA, R. M., ANDRADE, K. S., PRADO, M. M., MARQUES, L. G. Study on hybrid drying with infrared radiation of watermelon seeds (*Citrullus lanatus*) **Defect and Diffusion Forum**, v. 399, p. 173-182, 2020.

OLIVEIRA, D.A., ANGONESE M., GOMES, C., FERREIRA, S. R. S. Valorization of passion fruit (passiflora edulis sp.) by-products: sustainable recovery and biological activities. **Journal of Supercritical Fluids**, v.111, p. 55-62, 2016.

OLIVEIRA, L. F.; NASCIMENTO, M. R. F.; BORGES, S. V.; RIBEIRO, P. C. N.; RUBACK. Aproveitamento alternativo da casca do maracujá-amarelo (Passiflora edullis F. Flavicarpa) para produção de doce em calda. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.22, n.3, 2002.

O'SHEA, N.; KTENIOUDAKI, A.; SMYTH, T. P.; MCLOUGHLIN, P.; DORAN, L.; AUTY, M. A. E.; ARENDT, E.; GALLAGHER, E. Physicochemical assessment of two fruit by-products as functional ingredients: Apple and orange pomace. **Journal of Food Engineering**, v. 153, p. 89–95, 2015. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2014.12.014.

ONWUDE, D.I., HASHIM, N., ABDAN, K., JANIUS, R., CHEN, G. Modelling of coupled heat and mass transfer for combined infrared and hot-air drying of sweet potato. **Journal of Food Engineering**, v. 241, p. 75–87, 2019.

ONWUDE, D. I.; HASHIM, N.; CHEN, G.; PUTRANTO, A.; UDOENOH, N.R. A fully coupled multiphase model for infrared-convective drying of sweet potato. **J Sci Food Agric**, 2020.

PADUA, J. G.; SCHWINGEL, L. C.; MUNDIM, R. C.; SALOMAO, A. N.; JOSE, S. C. B. R. Germinação de sementes de Passiflora setacea e dormência induzida pelo armazenamento. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 33, n. 1, p. 80-85, 2011.

PARK, K. J. B.; PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T.; CORNEJO, F. E. P.; FABBRO, I. Secagem: fundamentos e equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais,** v. 16, n. 1, p. 93-127, 2014.

PATIÑO-RODRÍGUEZ, O.; BELLO-PÉREZ, L. A.; AGAMA-ACEVEDO, E.; PACHECO-VARGAS, G. Pulp and peel of unripe stenospermocarpic mango (*Mangifera indica* L. cv Ataulfo) as an alternative source of starch, polyphenols and dietary fibre. **Food Research International**, v. 138, 109719, 2020. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109719.

PÉREZ-CORTÉZ, S.; TILLETT, S.; ESCALA, M. Estudio morfológico de la semilla de 51 especies del género passiflora. **Acta Bot. Venezolana**, v. 25, p. 67–96, 2002.

PIRES, D.; BARROS, R. C.; LEMES, I.; SILVEIRA, R. A.; ROCHA, P. A. Análise térmica de seções transversais via método dos elementos finitos. **CILAMCE,** v. 36, p. 1-19, 2015.

PONKHAM, K.; MEESO, N.; SOPONRONNARIT, S.; SIRIAMORNPUN, S. Modeling of combined far-infrared radiation and air drying of a ring shaped-pineapple with/without shrinkage. **Food Bioprod. Process**. v.90, p. 155–164, 2012.

PEREIRA, D. F.; BUGATTI, P. H.; LOPES, F. M.; SOUZA, A. L. S. M.; SAITO, P. T. M. Contributing to agriculture by using soybean seed data from the tetrazolium test. **Data in Brief**, v. 23, 103652, 2019. DOI: 10.1016/j.dib.2018.12.090.

PUENTE-DÍAZ, L., AH-HEN, K., VEGA-GALVEZ, A., LEMUS-MONDACA, R., SCALA, K.D. Combined infrared-convective drying of murta (*Ugni molinae* turcz) berries: kinetic modeling and quality assessment. **Drying Technology**, v. 31, n. 3, p. 329–338, 2013.

RAMACHANDRAN, R. P.; PALIWAL, J.; CENKOWSKI, S. Modeling of effective moisture diffusivity and activation energy of distillers' spent grain pellets with solubles during superheated steam drying. **Biomass and Bioenergy**, v. 116, p. 39–48, 2018. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.06.004.

RAMÍREZ-MAGANDA, J.; BLANCAS-BENÍTEZ, F. J.; ZAMORA-GASGA, V. M.; GARCÍA-MAGAÑA, M. de L.; BELLO-PÉREZ, L. A.; TOVAR, J.; SÁYAGO-AYERDI, S. G.

Nutritional properties and phenolic content of a bakery product substituted with a mango (Mangifera indica) 'Ataulfo' processing by-product. **Food Research International**, v. 73, p. 117–123, 2015. DOI: 10.1016/j.foodres.2015.03.004.

RATTI, Cristina. **Advances in food dehydration**. Boca Raton: CRC Press, 2009.

RATTI, C.; MUJUMDAR, A. S. Infrared Drying. *In:* MUJUMDAR, A. S. (org.). **Handbook of Industrial Drying**. 4ªed. New York: Marcel Dekker, 2015, p. 405-420.

RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. *In:* RAO, M.A., RIZVI, S. S. H., and DATTA, A.K. (org.). **Engineering Properties of Foods.** 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2005, p. 239–325.

ROSBAKH, S.; HÜLSMANN, L.; WEINBERGER, I.; BLEICHER, M.; POSCHLOD, P. Bleaching and cold stratification can break dormancy and improve seed germination in Cyperaceae. **Aquatic Botany**, v. 158, 103128, 2019.

SAKAI, N.; MAO, W. Infrared heating. In: SUN, D. (org.). **Thermal Food Processing**, p. 493 – 522, 2006.

SANTOS, C. H. B.; CRUZ NETO, A. J.; JUNGHANS, T. G.; JESUS, O. N.; GIRARDI, E. A. Estádio de maturação de frutos e influência de ácido giberélico na emergência e crescimento de Passiflora spp. **Revista Ciência Agronômica**, v.47, n.3, p.481-490, 2016.

SILVA, S.M.G., LINS, C.Q.G., OLIVEIRA, J.C., SOUZA, A.D. Efeito da idade das sementes no poder germinativo de granadilla (*Passiflora ligularis*) no município de Mairiporã, São Paulo. Disponível na Internet: http://www.unitau.br/prppg/inicient/vieic/vieicresumobio7.html. Acesso de 18/01/2021.

STOCKERT, J. C.; HOROBIN, R W.; COLOMBO, L. L.; BLÁZQUEZ-CASTRO, A. Tetrazolium salts and formazan products in Cell Biology: Viability assessment, fluorescence imaging, and labeling perspectives. **Acta Histochemica**, v. 120, n. 3, p. 159–167, 2018. DOI: 10.1016/j.acthis.2018.02.005.

TOGASHI, C. K.; FONSECA, J. B.; SOARES, R. T.R. N.; GASPAR, A.; DETMANN, E. Composição em ácidos graxos dos tecidos de frangos de corte alimentados com subprodutos de maracujá. **Revista Brasileira Zootecnia**, v.36, n.6, p.2063-2068, 2007.

VÁQUIRO, H., RODRÍGUEZ, O., SIMAL, S., SOLANILLA-DUQUE, J. F., TELIS-ROMERO, J. Modelling of drying kinetics during non-isothermal convective drying of passion fruit seeds. **Japan Journal of Food Engineering**, v. 17, n. 4, p. 117 – 121, 2016.

VASCO-CORREA, J.; ZAPATA, A. D. Enzymatic extraction of pectin from passion fruit peel (passiflora edulis f. Flavicarpa) at laboratory and bench scale. **LWT - Food Science dnd Technology**, v. 80, p. 280–285, 2017.

WANG, Y., ZHANG, M., MUJUMDAR, A.S., CHEN, H. Drying and quality characteristics of shredded squid in an infrared-assisted convective dryer. **Drying Technology**, v. 32, p. 1828–1839, 2014.

XIA, Y.; XU, Y.; LI, J.; ZHANG, C.; FAN, S. Recent advances in emerging techniques for non-destructive detection of seed viability: A review. **Intelligence Artificial in Agriculture**, v.1, p.35-47, 2019.

ZANETTI, L. H.; MURAKAMI, A. E.; DIAZ-VARGAS, M.; GUERRA, A. F. Q. G.; OSPINA-ROJAS, I. C.; PINTRO, P. T. M.; CRUZ-POLYCARPO, V. C. By-product of passion fruit seed (Passiflora edulis) in the diet of commercial laying hens. **Canadian Journal of Animal Science**, 2016. DOI: 10.1139/cjas-2016-0027. Disponível em: https://cdnsciencepub.com/doi/abs/10.1139/cjas-2016-0027. Acesso em: 18 jan. 2021.

ZANINI, A.; VILLA, F.; HECH, A. L.; MEZZALIRA, E. J.; LIMA, P. R.; PRESTES, T. M. V.; PORTZ, T. M. Germinação de sementes de maracujá azedo embebidas em soluções em três substratos. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 15, n. 4, p.381-384, 2016.

ZARATIN, C. **Armazenamento das sementes associado à embebição, hormônios e KNO_3 na germinação e desenvolvimento inicial de mudas de *Passiflora alata* Dryander.** 2002. 65 p. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", 2002, 65 p.

ZHANG, T.; FAN, S.; XIANG, Y.; ZHANG, S.; WANG, J.; SUN, Q. Non-destructive analysis of germination percentage, germination energy and simple vigour index on wheat seeds during storage by Vis/NIR and SWIR hyperspectral imaging. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 239, 118488, 2020. DOI: 10.1016/j.saa.2020.118488.