ISSN 1678-0817 Qualis B2

SECAGEM INFRAVERMELHO DE MANDACARU (CEREAUS JAMACARU): ANÁLISE DA CINÉTICA E DO CONSUMO ENERGÉTICO DO PROCESSO

Engenharia Química, Volume 28 – Edição 132/MAR 2024 SUMÁRIO / 03/03/2024

REGISTRO DOI:10.5281/zenodo.10775407

Breno Lopes Souza Ribeiro

RESUMO

No presente trabalho foi investigada a secagem de fatias de mandacaru (*Cereus jamacaru*) utilizando a radiação infravermelha (IV), a partir de uma avaliação experimental dos efeitos da temperatura da fonte IV e da espessura da amostra sobre a difusividade mássica efetiva e sobre o consumo específico de energia do processo. Propriedades termodinâmicas também foram determinadas, bem como foi feita uma discriminação de equações semiempíricas para a descrição da cinética de secagem. Os experimentos foram conduzidos com fatias dessa cactácea contendo 0,010; 0,015 e 0,020 m de espessura, submetidas a temperaturas da fonte IV de 773, 698 e 623 K. Aos dados de secagem foram ajustadas oito equações comumente encontradas literatura. Os resultados de R^2 e χ^2 mostraram que o modelo de Midilli et al. foi superior aos demais para descrever a cinética do processo. A difusividade efetiva foi determinada

para cada condição experimental e, a sua relação com as variáveis independentes temperatura e espessura foi avaliada estatisticamente através da análise ANOVA com nível de significância de 5%. Em conjunto, o diagrama de Pareto e as superfícies de resposta permitiram visualizar o impacto dos termos lineares da espessura e temperatura na difusividade. As difusividades efetivas de umidade ficaram compreendidas entre 6,66 x 10^{-9} e 4,38 x 10^{-8} m^2/s. Além disso, as variações de entalpia, entropia e energia livre de Gibbs foram determinadas, a fim de avaliar a não-espontaneidade da secagem. Seus valores ficaram, de maneira respectiva, nas faixas de 13,33 a 13,76 kJ/mol; -0,37013 a -0,36908 kJ/mol K; e 174,99 a 155,82 kJ/mol. A energia mínima necessária para o processo de sorção ocorrer, traduzida na energia de ativação, também foi determinada, apresentando um valor de 16,96 kJ/mol a partir da relação de Arrhenius. O consumo de energia específica variou entre 45,47 e 83,60 kWh/kg. A menor demanda energética foi observada na condição de 773 K e 0,015 m de espessura. Com base nos resultados obtidos, a técnica aqui descrita se mostrou promissora para a aplicação da secagem de mandacaru e de outros produtos agrícolas.

PALAVRAS-CHAVE: Consumo energético; difusividade efetiva; secagem infravermelho.

ABSTRACT

In the present work the drying of mandacaru slices (Cereus jamacaru) was investigated using an infrared radiation (IR) from an experimental evaluation of the temperature effects of the source IV and the thickness of the sample on the effective diffusivity and on the specific consumption process energy. Thermodynamic properties were also determined, as well as a breakdown of semi-empirical equations for a description of drying kinetics. The experiments were carried out with slices of this cactus containing 0.010; 0.015 and 0.020 m thick, submitted to source IV temperature of 773, 698 and 623 K. To the drying data, eight equations commonly found on literature were adjusted. The results of R^2 and χ^2

outdated that the model of Midilli et al. was superior to the others to describe the kinetics of the process. The effective diffusivity was specified for each experimental condition and, in relation to the independent variables temperature and thickness, it was statistically evaluated through ANOVA analysis with a 5% level of significance. The Pareto Chart and the response surfaces allow visualizing the impact of linear terms of thickness and temperature on diffusivity. The effective diffusivities of known data comprised between 6.66 x x 10^{-9} and 4.38 x 10^{-8} m^2/s. In addition, how Gibbs' enthalpy, entropy and free energy variations were determined, in order to assess non-spontaneity of drying. The results, respectivily, was obtain in the ranges of 13.33 to 13.76 kJ/mol; -0.37013 to -0.36908 kJ/mol K; and 174.99 to 155.82 kJ/mol. The necessary energy required for the sorption process to occur, translated into the activation energy, was also provided, with a value of 16.96 kJ/mol set from the Arrhenius ratio. Specific energy consumption varied between 45.47 and 83.60 kWh/kg. The lowest energy demand was observed at 773 K and 0.015 m thick condition. Based on the results obtained, the technique applied here is promising for the application of drying mandacaru and other agricultural products

KEYWORDS: Energy consumption; effective diffusivity; infrared drying

1. INTRODUÇÃO

O papel ecológico e econômico das cactáceas, em muitos dos ecossistemas representados nas Américas é incontestável, uma região onde esse grupo de plantas é endêmico, com mais de 1.300 espécies reconhecidas. Além de importantes para a manutenção de vários organismos vertebrados e invertebrados das regiões de Caatinga, as cactáceas podem ser utilizadas na alimentação animal, na alimentação humana, como fonte de madeira, paisagismo, como material adsorvente e até como biomassa para a geração de energia. (ICMBIO, 2011; LIMA, 1996).

De acordo com Davet (2005), especificamente no Nordeste do Brasil, uma das espécies de cactáceas que tem uma maior parcela de contribuição ambiental, medicinal e econômica é a *Cereus jamacaru*, conhecida popularmente como mandacaru ou cardeiro. Seu destaque está associado ao fato de ser a representante dessa família que é mais facilmente encontrada nessa localidade. No entanto, apesar da sua abundância relativa, o conhecimento da população brasileira sobre sua utilização e benefícios, bem como o conhecimento de pesquisadores sobre as potencialidades dessa cactácea ainda são incipientes.

O consumo do *Cereus jamacaru* e de outras plantas da família Cactaceae como ração animal, é recomendado por especialistas e técnicos da área agrícola, por garantirem em períodos de estacionalidade da produção de forragem devido à distribuição irregular das chuvas, a nutrição dos rebanhos com fartura, já que nessas plantas são encontradas proteínas, fibras e água (EMBRAPA, 2021). Sendo assim, uma dificuldade enfrentada pela agroindústria é a de que a qualidade da dieta não seja prejudicada durante a fabricação da ração.

Para diminuir as perdas nutricionais, emprega-se a secagem, que se torna etapa crítica na busca pela obtenção da dieta com umidade homogênea entre a ração extrusada, visto que, uma variação percentual pequena no teor de umidade entre as amostras pode gerar grande prejuízo econômico devido à produção de grandes volumes, além de proliferação microbiana. Portanto, o objetivo principal de um processo de secagem de ração animal é o de diminuir e nivelar o percentual de umidade da amostra (FERRAZ, 2020).

Lopes (2016) apresenta em seu estudo a caracterização do mandacaru para classifica-lo como vegetal portador de material categorizado como madeira. A madeira é extraída do lenho (xilema), que consiste numa região rígida anelar do ramo desta cactácea. Sendo assim, uma vez destinado à produção madeireira, o mandacaru deverá passar pelo processo de secagem, pois, alto teor de umidade reduz significativamente

a maioria das propriedades mecânicas da madeira, e índices de umidade irregulares podem causar danos a peça, bem como o ataque por fungos manchadores e apodrecedores. (MORESCHI, 2014; REMADE, 2020).

Estudos como o de Costa (2014) têm demonstrado o potencial do *Cereaus jamacaru* como material biológico adsorvente útil na purificação de efluentes líquidos contaminados com derivados do petróleo. Para isso, deve-se haver um preparo da biomassa antes do início do tratamento. Essa preparação segue as seguintes etapas: corte do mandacaru, trituração, secagem, nova trituração, separação granulométrica. Essas etapas tem o objetivo de transformar a biomassa inicial em pó, classificando-o pelo tamanho de suas partículas obtendo-se, portanto, partículas com superfícies de contato distintas. Para esse objetivo a operação de secagem é essencial.

De acordo com Silva (2019), outra potencialidade do mandacaru é o seu emprego como biomassa na geração de energia, opção esta que é atrativa para o Nordeste brasileiro, uma vez que mais da metade dos requerimentos energéticos dessa região depende de biomassa vegetal (ICMBIO, 2011). Dados da Agência Internacional de Energia mostram o potencial de crescimento nos próximos anos no emprego de biomassa na produção de energia, podendo adicionar ao sistema elétrico do Brasil cerca de 180 MW de capacidade de geração (ANEEL, 2016). Vantagens como o baixo custo, permitir o reaproveitamento de resíduos e ser menos poluente que outras fontes de energia como o petróleo e o carvão estão associadas ao uso de biomassa para fins energéticos (MIURA e WALDMAN, 2011; CACURO et al, 2015).

Um problema a ser contornado no processo de conversão da biomassa em energia, seja por intermédio da combustão em fornos e caldeiras, seja por pirólise, é a eficiência reduzida. Diante disso, técnicas de pré-tratamento tem a finalidade de preparar o material de forma que potencialize seu fator de conversão. A operação unitária secagem é uma

dessas técnicas, onde a remoção da umidade do material tem como consequência o aumento do seu poder calorífico por unidade de massa.

A nível industrial são empregados comumente secadores rotativos, de leito fluidizado e pneumático. Porém, desvantagens como baixa eficiência energética; alto custo com instalação, operação e manutenção; alto consumo energético e limitação nos tipos de materiais que podem ser empregados, estão associadas a esses equipamentos (SILVA, 2016).

O uso de energia radiante na região do infravermelho (IV) como fonte de calor serve desponta como alternativa às técnicas tradicionais de remoção de umidade, por possui características como capacidade de transferência de calor elevada, alto poder de penetração em produtos porosos, resposta de regulação rápida, além de permitir um controle adequado do processo (SKJOLDEBRAND, 1986, apud Junior, 2017).

Quando comparada com a secagem convectiva, secadores IV apresentam como principal vantagem a redução do tempo de processamento e do custo energético do processo, dado que a transmissão de energia para a amostra acontece de forma direta e uniforme, enquanto que a convecção requer incialmente o aquecimento do ar para que então seja transferido calor para o material a ser seco (NASCIMENTO et al, 2015). Após um levantamento, Mujumdar (2014) destaca que cerca de 85% dos secadores industriais são do tipo convectivo com ar aquecido, mostrando que o potencial da utilização do IV pode ser muito explorado.

Posto isto, o desenvolvimento de uma técnica de secagem adequada é essencial para agregar valor ao mandacaru, seja através de biomassa para a geração de energia, seja para a produção madeireira, produção de ração ou material adsorvente. Nesse sentido, e considerando a incipiência de estudos de secagem com essa planta, o presente trabalho tem como objetivo estudar a cinética de secagem infravermelho do *Cereus jamacaru*, por meio da avaliação da influência da espessura da amostra e temperatura da fonte IV sobre a difusividade mássica efetiva; avaliar,

dentro oito equações semiempíricas disponíveis na literatura, a mais adequada para descrever o processo na faixa experimental investigada; determinar as propriedades termodinâmicas do processo de remoção de umidade; e o consumo energético específico da secagem via radiação infravermelha.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Cactáceas e Cereus Jamacaru: Aspectos Gerais

A família Cactaceae constitui um grupo de plantas com habilidades para se desenvolverem e reproduzirem em condições de limitação hídrica. Para isso contam com flores reduzidas, evitando perda de água excessiva por transpiração, caules suculentos e fotossintéticos, e espinhos para a sua proteção. Podem ser multiplicadas por sementes ou propagação vegetativa via brotos ou estacas. Os frutos destas espécies caracterizam-se pelas suas propriedades nutracêuticas (EMBRAPA, 2011).

As cactáceas foram divididas por Wallace (1995) em três subfamílias, Cactoideae, Opuntioideae e Pereskiodeae. Sendo a primeira a mais numerosa em gêneros e espécies, e a mais diversificada em termos de características físicas e hábitos. A Cactoideae é subdividida ainda em nove tribos, destacando-se dentre elas a Cereeae como a mais representativa no Brasil, com 12 gêneros catalogados e amplamente encontrados na Região Nordeste, que é considerada o terceiro maior centro de diversidade para as Cactaceae no mundo (DAVET, 2005).

Dentre os gêneros pertencentes à tribo Cereeae, encontra-se o gênero *Cereus,* cujas espécies podem ser encontradas em países da África, Ásia e América do Sul. As suas espécies mais conhecidas e utilizadas pela população são: *Cereus adeemani, Cereus bicolor, Cereus comarapanus, Cereus friccie, Cereus jamacaru, Cereus hildman-nianus, Cereus repandus, Cereus trigonodendrone, Cereus vargasianus* sul (TAYLOR e ZAPPI, 2004).

Adaptado às condições climáticas do Semiárido, o mandacaru pode alcançar até dez metros de altura, composto por um tronco lenhoso com muitos ramos eretos, dando ao topo do cacto um aspecto compacto. As aréolas são circulares, distantes de 2 a 5 centímetros entre si, sendo maiores no tronco principal. Os espinhos de coloração amarela, vermelha ou marrom, são radiais, medindo de 9 a 30 centímetros de comprimento (DAVET, 2005).

Suas flores são solitárias, noturnas, brancas, possuindo de 20 a 30 centímetros de comprimento e 1,5 centímetros de diâmetro, recobertas de escamas largas e oblongas de cor verde. Os frutos comestíveis possuem formato elipsoide, com cerca 7 centímetros de diâmetro, em média, de cor alaranjada, com polpa mucilaginosa branca onde estão presentes inúmeras sementes de cor preta (MEIADO et al., 2010).

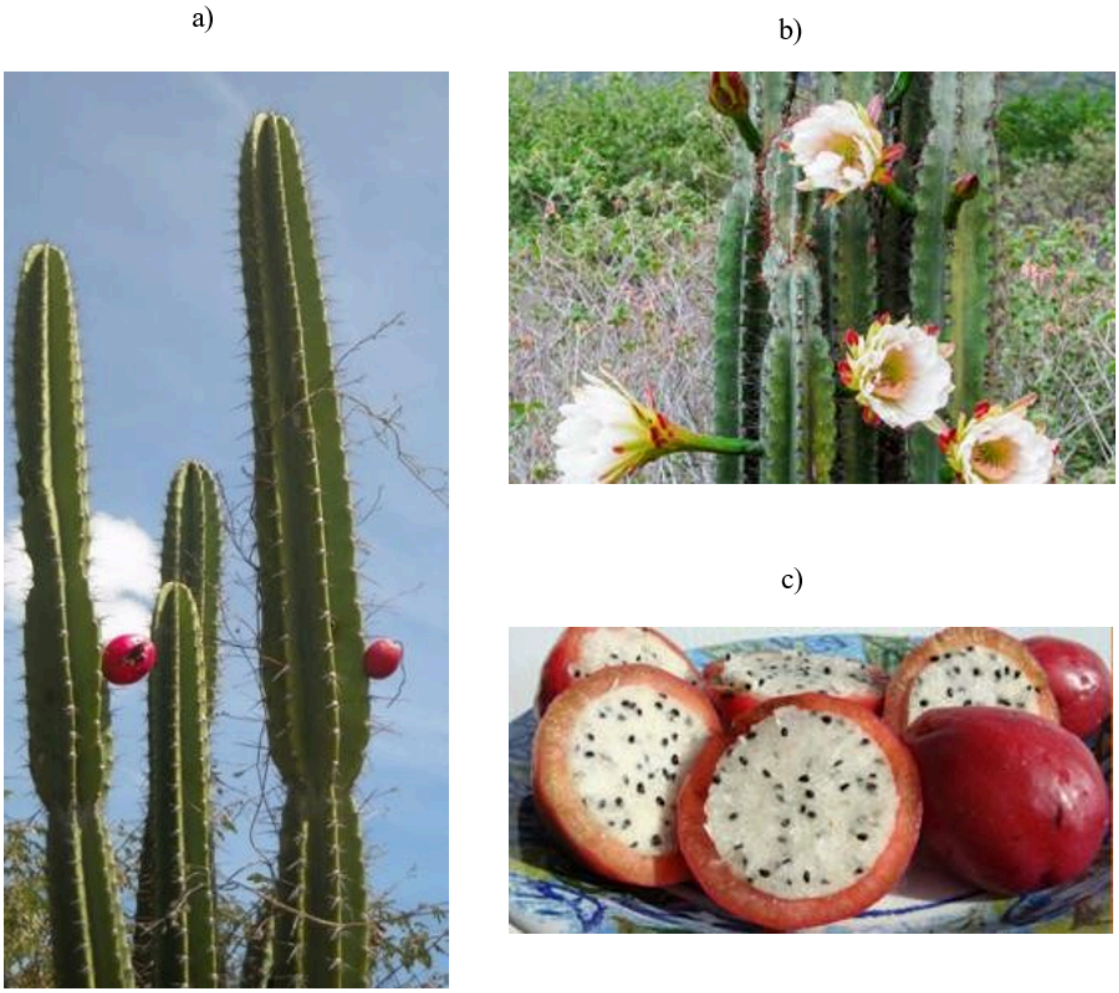


Figura 1 – Planta mandacaru*:* a) Mandacaru e fruto sob o sol; b) Mandacaru e suas flores brancas e solitárias desabrochadas; c) Fruto do

mandacaru com a polpa exposta.

Fonte disponível em: https://www.todafruta.com.br/mandacaru/#:~:text=Possui%20um%20formato%20que%20pode,lanosas%2C%20com%20ou%20sem%20espinhos. Acesso: 05/02/2021

2.2 Potencialidades do Mandacaru

O cultivo do mandacaru apresenta como limitações o lento crescimento e o alto custo de mão de obra para o preparo adequado da planta que envolve a remoção dos espinhos através de corte, queima e/ou trituração (SILVA et a, 2010). Contudo, devido às suas características físicas, químicas e biológicas, a planta é considerada um material rico, encontrando aplicações em diversas áreas, desde usos populares a usos industriais (Figura 2).

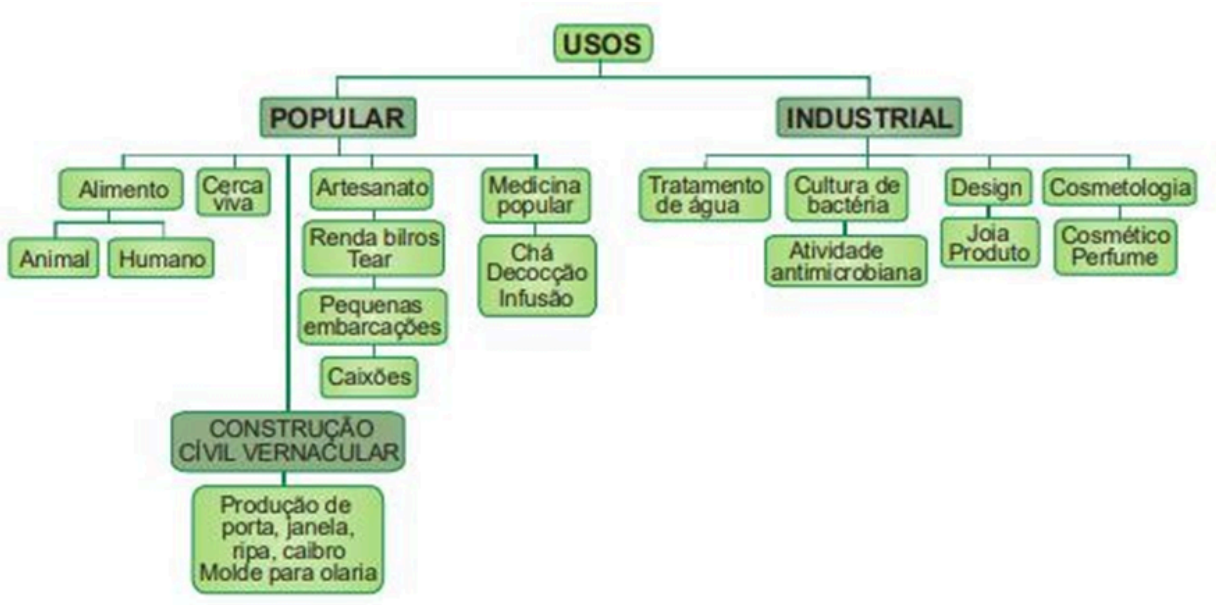


Figura 2 – Fluxograma de aplicações de mandacaru.

Fonte: LOPES, J. A. **O mandacaru e sua utilização como material expressivo e alternativo renovável no design e na arte**. 2016, p 29.

Em épocas de déficit hídrico, por exemplo, essa cactácea nativa da caatinga brasileira é muito utilizada como uma estratégia alimentar para os ruminantes. Cerca de 46,52% dos pequenos agropecuaristas avaliados

em cinco comunidades da Bahia e Pernambuco, utilizaram o mandacaru para alimentação animal, de acordo com a pesquisa conduzida por Cavalcanti & Resende (2004). Entretanto, resultados de maiores aumento de peso dos animais estavam ligados às associações de mandacaru com outras fontes de nutrientes ao invés do seu uso exclusivo nas dietas. Silva et al (2010) constataram um aumento de peso médio de 84 a 95 g/dia nos ovinos e caprinos que utilizaram o mandacaru em conjunto com feno e silagem, alimentos ricos em fibras e proteínas. Em outro estudo Cavalcanti e Resende (2006) concluíram que os caprinos que receberam suplementação de mandacaru obtiveram um ganho de peso de 5,16% em relação ao peso inicial dos animais e, um aumento insignificante foi notado para os caprinos que receberam oferta de mandacaru como única forrageira, enquanto que uma perda de 5,25% foi percebida naqueles animais que não foram alimentados com mandacaru.

Relativo à alimentação humana, projetos como o de Lucena et al (2016) têm demonstrado que é possível inserir espécies forrageiras na alimentação humana como forma de promover a Segurança Alimentar e Nutricional (SAN). No projeto em questão, foram apresentados para degustação entre alunos do município de Picuí-PB, doces e sorvetes solidificados a partir de *Opuntia fícus-indica* (palma) e *Cereus jamacaru*, com boa recepção qualitativa pelos experimentadores destes alimentos. Pinto (2017) desenvolveu cinco formulações de sorvete à base de polpa de mandacaru e xique-xique. Em seguida, avaliou parâmetros sensoriais (aparência, sabor, textura, cor, aroma) e físico-químicos (pH, acidez, SST, umidade, cinzas), além de intenção de compra do público avaliador. Para as análises sensoriais, foi adotado o sistema de notas de 0 a 10, no qual o sorvete recebeu notas entre 6 e 7 para todos os atributos. Os resultados físico-químicos foram de pH entre 5,7 e 6,2; acidez total entre 0,21 e 0,52; SST variando entre 3,9 e 4,9; umidade entre 71 e 79%; e cinzas de 0,6 a 0,9%. Os experimentadores demonstraram também interesse em consumir novamente os produtos oferecidos.

A plantação do mandacaru é muitas vezes planejada no sentido de formar uma cerca viva ao redor de uma determinada propriedade, a fim de proteger os rebanhos de ataques de predadores, e também evitar que rebanhos evadam o pasto de seus proprietários. Lopes (2016) apresenta em seu trabalho que além do uso da planta viva, a sua madeira in natura também pode ser empregada na arquitetura vernacular, em peças da construção civil, móveis e decorativos. Segundo a mesma autora, seus espinhos encontram também espaço na criação de artesanatos e joias diversos a nível popular e industrial.

Em diferentes populações do nordeste brasileiro há registros de uso medicinal do mandacaru, seus frutos e flores (DANTAS, 2019). A literatura apresenta a versatilidade da planta nos campos de atuação terapêutica, podendo servir no tratamento de doenças cardíacas, respiratórias, nefrológicas e digestivas. Todavia, Dantas (2019) aponta que essas inferências foram obtidas a partir de relatos de povos em várias regiões, que acumularam informações através da sua inserção permanente (até os dias atuais) transmitidas de geração a geração, sugerindo necessidade de aprofundamento continuado sobre as capacidades fármaco- medicinais da planta.

Silva et al (2015) através de seu levantamento, apresentaram o *Cereus jamacaru* como agente ativo na prevenção e combate a doenças cardíacas. Lucena et al (2012) investigaram em uma região da Paraíba, que as raízes do mandacaru em decocção ou infusão produzem uma bebida que tem características amenizadoras da sinusite, de acordo com os habitantes locais. A pesquisa conduzida por Andrade et al (2006), bem como a conduzida por Carmo et al (2015) mostraram o emprego da planta no tratamento de pedras nos rins. Teixeira e Melo (2006) em seu levantamento etnobotânico apresenta o chá do caule do mandacaru como tratamento de transtornos digestivos.

O extrato de cacto do mandacaru consiste num polímero natural que possui características físico-químicas agregadoras. Zara et al (2012)

demonstrou isso em seu estudo da eficiência desse polímero natural como auxiliar do sulfato de alumínio nos processos de coagulação e floculação através de ensaios realizados em Jar-Test. A remoção da turbidez utilizando apenas o sal foi inferior àquela apresentada nos testes em que ambos agentes floculantes foram utilizados, evidenciando a performance do extrato na aplicação. A potabilização da água também foi atingida com o tratamento utilizando extrato de mandacaru por Nobrega et al (2017), porém associado a sementes de umbu. Neste trabalho foi construído um sistema completo de tratamento de água composto por unidades de redução de salinidade, redução de turbidez e unidade de filtragem lenta, utilizando matérias primas de baixo custo.

Aline Davet (2005) conclui que o extrato de mandacaru possui atividade antimicrobiana, após testes realizados com culturas de oito bactérias causadoras de infecção ao ser humano. Em quatro delas, os efeitos foram altamente efetivos: *Streptococcus epidermidis*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* e *Escherichia coli*.

Outra aplicação para o extrato do mandacaru é na cosmetologia. Sua capacidade de armazenar água, por exemplo, permite um alto poder de hidratação capilar, impactando no alinhamento dos fios e na redução de frizz. Além disso, toda a planta encontra aplicação no ramo dos cosméticos e estética (L'OCCITANE, 2021). A empresa francesa L'OCCITANE possui perfumes, linhas dermatológicas de cremes, óleos e sabonetes, além de produtos capilares, com compostos oriundos do mandacaru.

Todavia, para o bom aproveitamento da cactácea em aplicações nas áreas alimentícia, artesanal, arquitetônica, cosmetológica, farmacológica, de energia renovável e de tratamento químico ou biológico, faz-se necessária a redução do seu conteúdo de água a níveis aceitáveis.

2.3 Secagem

Consiste na remoção de quantidades de água ou outro líquido de um material sólido devido a vaporização causada por efeitos térmicos, a fim

de reduzir o conteúdo de líquido residual até níveis desejáveis, que variam de acordo com o destino a ser dado ao produto seco. Pode ser conduzida de forma natural ou artificial (McCABE, 1993; EVANGELISTA, 1984).

A secagem natural é a simples exposição do alimento ao sol colocando-o em piso apropriado, capaz de reter calor para que o alimento seja aquecido e perca água no processo. Ou ainda quando o alimento é armazenado em galpões e são acionados ventiladores e aspiradores. É o método mais empregado por pequenos produtores de grãos (GAVA, 1984).

Por utilizar energia solar ou não demandar equipamentos sofisticados de secagem, esse método é considerado menos dispendioso que a secagem artificial. Porém o processo é lento e necessita de grandes áreas de exposição do material. As condições climáticas da região onde se pretende executar a técnica devem ser devidamente avaliadas, uma vez que as propriedades psicrométricas são determinantes para uma efetiva secagem (OLIVEIRA, 2014).

A secagem artificial ou desidratação, por outro lado, é conduzida em sistemas onde o calor é produzido artificialmente. A remoção de umidade é feita por meio de vapor superaquecido, sistema a vácuo, uso de gases inertes ou pela aplicação direta de calor (GAVA 1984). É um método relativamente rápido, não exige grandes áreas de secagem e exige capital e mão de obra especializada. As condições do processo são controladas e os equipamentos empregados na desidratação são denominados secadores (OLIVEIRA, 2014).

De acordo com Gava (1984) a secagem é uma das técnicas mais antigas de conservação de alimentos utilizada pelo homem, mas de uma forma geral, submeter um determinado material ao processo de secagem pode trazer as seguintes vantagens (EMBRAPA, 2010):

- Aumento de vida útil, pois, a redução do teor de umidade diminui a atividade microbiana;

- Maior concentração do valor alimentício;
- Maior facilidade no empacotamento, armazenamento e transporte por reduzir massa e volume do produto;
- Alto custo-benefício por conta do relativo baixo investimento com secadores e retorno financeiro na comercialização do produto;
- Redução de perda pós colheita.
- Aumento do poder calorífico

2.3.1 Cinética De Secagem

Os fenômenos simultâneos de transferência de calor e de massa estão presentes em todo processo de secagem, independentemente da técnica empregada, podendo ser dividido em três períodos, representados esquematicamente na Figura 3 (OLIVEIRA, 2010). As curvas contidas nessa figura apresentam a evolução do teor de água do produto (X), de sua temperatura (T) e da velocidade de secagem (dx/dt), também chamada de taxa de secagem, ao longo do tempo.

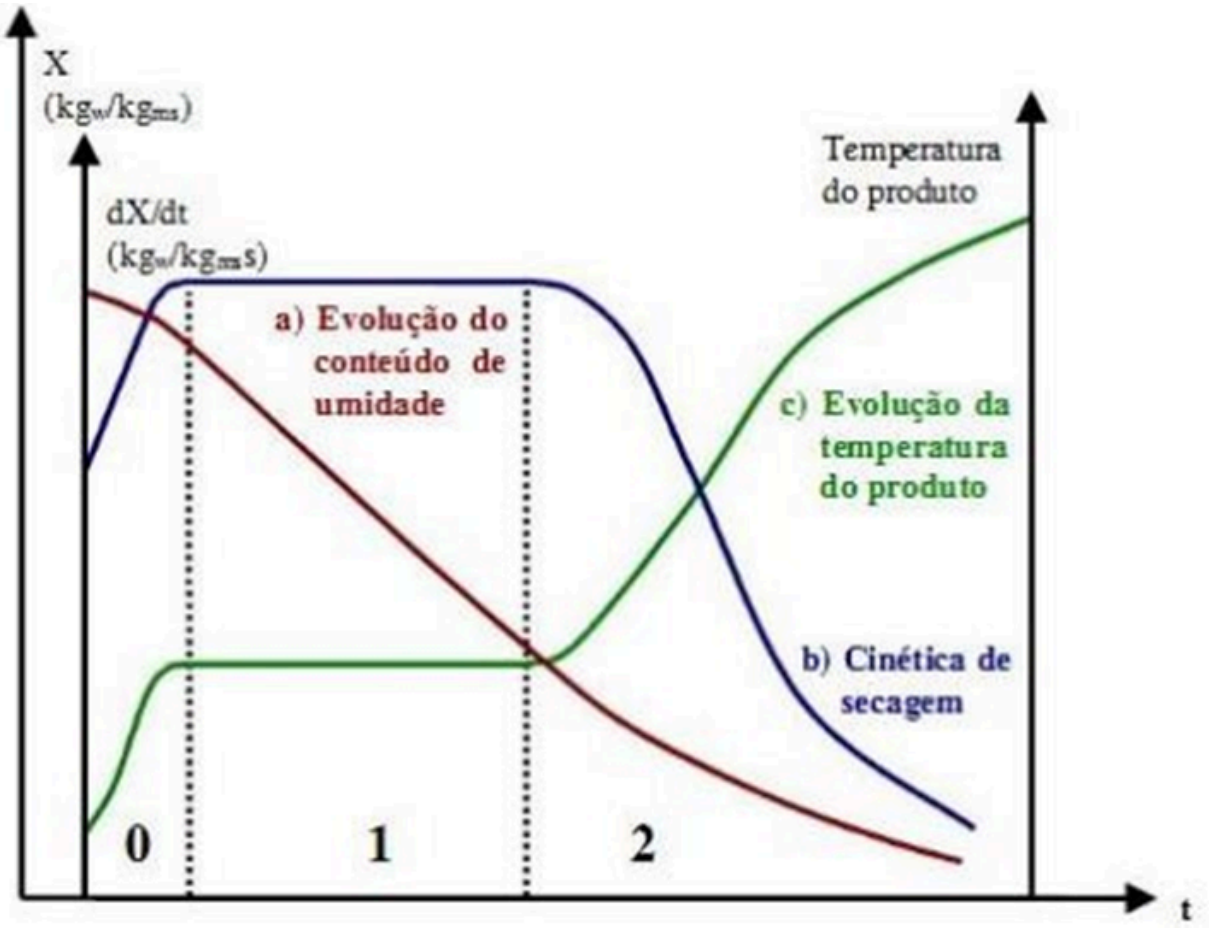


Figura 3 – Curvas típicas de secagem.

Fonte: OLIVEIRA, F.I.P. **Estudo do processo de produção de jambo desidratado sob aplicação de ultra- som**. 2010

A curva a), em vermelho, representa a evolução do conteúdo de umidade em base seca com o tempo no processo de secagem. A curva b), em azul, indica o comportamento da taxa de secagem ao longo deste processo. Enquanto que a curva c), em verde, indica como é o comportamento da temperatura na matriz sólido com a evolução do tempo.

Os três períodos em que as curvas típicas de secagem podem ser divididas são caracterizadas da seguinte maneira: período 0 representa o início da secagem e, nesta etapa, ocorre uma elevação gradual da temperatura do produto e da pressão de vapor de água; o período 1 caracteriza-se pela taxa constante de secagem. A água evaporada é a água livre. A transferência de massa e de calor é equivalente e, portanto, a velocidade de secagem é constante; e no período 2 uma taxa de secagem decrescente se apresenta devido a quantidade de água

presente na superfície do produto ser menor, reduzindo-se, portanto, a transferência de massa (BROD et al., 1999).

2.3.2 Secagem Infravermelho

A radiação infravermelha (IV) é uma forma de onda eletromagnética transferida a partir de uma fonte de calor. O comprimento de onda em que a caracterizada pode variar entre 0,76 e 100 μm do espectro eletromagnético. Sendo os intervalos classificados da seguinte maneira: IV próximo (0,76-3,00 μm), IV médio (3,00-25,00 μm) e IV distante (25-100 μm) (ÇENGEL E GHAJAR, 2012; SANDU, 1986).

A maioria das aplicações de IV na área alimentícia ocorreu durante os anos 1950 e 1970, nos Estados Unidos, na União Soviética e na Europa. Mais recentemente, trabalhos também foram realizados no Japão, Taiwan e outros países asiáticos. A maior parte destes trabalhos ainda é de natureza experimental, afirma William-Gardner (1971, apud Junior, 2017).

De acordo com este mesmo autor, embora esse tipo de transmissão de calor tenha sido utilizado no passado de maneira complementar a outros tipos de mecanismos de troca térmica durante a desidratação, secadores IV como fonte primária estarão em evidência no futuro.

Uma revisão de 100 publicações relevantes sobre secagem infravermelho de alimentos foi feita Riadh et al. (2015), na qual os autores argumentam sobre as vantagens associadas à técnica, frente às comumente empregadas na remoção da umidade, em especial a secagem convectiva. Foram destacadas como vantagens: tempo de secagem mais curto, melhor qualidade de produto final seco, mais economia de energia, além da capacidade de facilmente ser combinada com outros métodos de secagem, como ar aquecido, micro-ondas, vibração e processo à vácuo. Riadh et al. (2015) relatam ainda que o aquecimento IV se tornou mais popular na última década, com aplicação a secagem de diferentes alimentos a nível industrial, tal como apontado como tendência por William-Gardner (1971).

Lechtanska et al. (2015) afirma que uma desvantagem associada à secagem convectiva é o elevado consumo de energia devido a necessidade de aquecer o ar, para em seguida, aquecer o material, diferentemente do secador que funciona via radiação infravermelha, que fornece energia diretamente a superfície da amostra, e assim faz com que o aquecimento seja rápido.

Em seu trabalho os autores comprovaram que a secagem combinada assistida com micro-ondas e/ou radiação infravermelho reduziu significativamente o tempo de secagem de pimenta verde.

Ratti e Mujumdar (1995) demonstraram, através de balanços de energia e massa, considerando o efeito de encolhimento da partícula, que a secagem por infravermelho intermitente com a fonte de energia de 10 kW/m^2 torna-se equivalente à secagem por convecção em que o

coeficiente de transferência de calor seria tão elevado quanto 200 W/(m²K).

Comparando também as técnicas convectiva e via infravermelho, Ashtiani (2017) estudou a cinética de secagem da hortelã nas condições de 303, 313 e 323 K e 0,5, 1,0 e 1,5 m/s para o ar na convecção, enquanto que para o IV 1500, 3000 e 4500 W/m² de intensidade foram aplicadas, com distâncias entre o emissor e a amostra de 0,10; 0,15 e 0,20 metros, e velocidades do ar de 0,5, 1,0 e 1,5 m/s. A menor difusividade efetiva de umidade ocorreu durante a secagem a ar quente a 303 K com o ar a 0,5 m/s, e o maior valor de difusividade estava associado a condição de 4500 W/m², com fluxo de ar de 0,5 m/s e distância emissor-amostra de 0,10 metros.

Hebbar et al. (2004) desenvolveram um sistema combinando radiação infravermelha e ar quente para a secagem de batatas e cenouras. A desidratação era conduzida em três câmaras de forma independente. Na primeira o processo ocorria apenas com o aquecimento infravermelho, na segunda apenas com a convecção a ar quente e na terceira ocorria de maneira combinada. O modo combinado apresentou uma redução de 48% do tempo de secagem e uma redução do consumo de energia de 63% quando comparada a secagem a ar quente.

Aktas et al. (2016) estudaram a cinética de secagem de fatias de pão, de 0,015 metros de espessura, por dois equipamentos a fim de compará-los: secador infravermelho e secador do tipo bomba de calor. Foi observado uma redução de 69% em termos de tempo de secagem e de 43,2% no consumo de energia ao se empregar o secador IV.

A transferência de calor foi única e exclusivamente devido ao aquecimento IV no trabalho de Gardusi (2014). Neste estudo foi avaliada a cinética de secagem da casca da mexerica e os compostos bioativos desta in natura e após a secagem. O modelo que melhor descreveu o comportamento cinético foi o de Overhults, com coeficiente de determinação médio de 0,9993. Os testes de secagem foram realizados

nas temperaturas de 333, 343, 353 e 363 K, das quais, a condição de 363 K apresentou as maiores médias dos compostos de interesse.

Nowak e Lewicki (2004) compararam o desempenho da secagem de fatias de maças via radiação IV e convecção em condições experimentais equivalentes. O tempo do processo pode ser reduzido em até 50% quando o aquecimento é feito com energia infravermelha. Foi observado nesse trabalho a cinética da secagem inversamente proporcional à distância e à velocidade do ar.

De acordo com Wang e Sheng (2006) a literatura dispõe de poucas informações detalhadas sobre os processos de secagem IV distante e secagem IV distante combinada com micro-ondas de pêssegos, e, portanto, esse foi o objeto de estudo escolhido por eles. Durante a secagem da fruta dois períodos de taxa decrescente foram observados, com valor limite de 1.7 de umidade em base seca (b. s.). O consumo de energia do processo encontrou picos para valores menores que 1.7 b.s. No entanto, para a secagem IV houve um período de taxa de remoção da umidade acelerada, diferentemente da secagem por micro-ondas, o que fez com que a secagem IV usada individualmente apresentasse tempos menores de processo quando comparadas às técnicas combinadas. As diferenças sensoriais e de consumo energético total não foram significativas, entretanto.

Por outro lado, um estudo comparativo entre a remoção da umidade de cogumelos shitake via infravermelho, por ar quente e exposição a micro-ondas de maneira intermitente, realizado por Wang et al. (2019), concluiu-se que para uma maior preservação das propriedades físicas e componentes químicos deste fungo, deve-se usar a secagem a ar quente ou combina- la com a incidência de micro-ondas.

Azam et al. (2019) analisaram a distribuição de umidade, textura, razão de reidratação, cor e microestrutura do pêssego após aplicarem as secagens por ar quente, ar quente assistido por micro-ondas, por radiofrequência

combinada com ar quente e via infravermelho. O menor tempo do processo foi no emprego da técnica de ar quente assistido por micro-ondas (180 min), seguida das de radiação IV (210 min), radiofrequência assistida por ar quente (210 min) e secagem por ar quente (300 min). Do ponto de vista sensorial, a remoção da água do pêssego através da incidência de calor infravermelho apresentou os melhores resultados. Estudos da microestrutura revelaram também que a secagem via IV produziu a melhor qualidade dentre as quatro técnicas.

Foi investigado por Celma et al (2008) o comportamento de secagem IV em camada delgada da casca úmida de azeitona entre 353 e 413 K. Houve uma redução no tempo de secagem com o aumento de temperatura e, nas fronteiras das condições experimentais de temperatura foram precisos 105 e 35 min, respectivamente, para reduzir o teor de umidade de 91,97 para 8,69% em peso (base seca). Um modelo matemático foi proposto para o processo de secagem do material, através do método de regressão não linear, método de Marquart. Com a segunda lei de difusão de Fick foram determinados os coeficientes de difusão efetiva, avaliados entre $5,958 \times 10^{-9}$ e $1,589 \times 10^{-8}$ m^2/s. Além disso, 21,30 kJ/mol foi o valor determinado para a energia de ativação da difusividade mássica, com dependência da temperatura deste coeficiente descrita seguindo a relação do tipo Arrhenius.

Doymaz et al. (2015) na caracterização da secagem de feijão verde via radiação infravermelha determinaram o coeficiente de difusividade mássica entre o intervalo de $6,57 \times 10^{-10}$e $4,49 \times 10^{-9}$ m^2/s, com energia de ativação igual a 11,379 kW/kg, de acordo com a equação modificada de Arrhenius. A cinética de secagem, capacidade de reidratação e coloração da leguminosa foram avaliadas para as potencias de 83, 104, 125, 146, 167 e 188 W da fonte, as quais demonstraram grande influência da potência adotada. Os dados experimentais foram ajustados de acordo com cinco modelos disponíveis na literatura. Os modelos de Midilli et al. e Aghbashlo et al. foram os mais representativos. A razão de reidratação das amostras secas a 188 W mostrou-se maior que as amostras submetidas às demais

condições de potência. A coloração dos feijões apresentou uma relação inversamente proporcional a potência da fonte IV.

A secagem infravermelho de folhas de manjericão foi comparada com a secagem em estufa com circulação de ar, por Reis et al (2012), ao reproduzir-se testes nas mesmas temperaturas de 323, 333, 343 e 353 K, e avaliar-se o tempo para que a umidade de equilíbrio fosse atingida. O tempo de processo foi menor para a secagem IV, exceto na condição de 323 K, que se obtiveram tempos iguais de 5h de duração. A cinética de secagem foi modelada de acordo quatro equações encontradas na literatura, tendo a de Midilli et al como a melhor. O coeficiente de difusão variou entre 9,10 x 10^{-12} e 2,92 x 10^{-11} m^2/s. A relação de Arrhenius foi também usada nesse trabalho para relacionar difusividade mássica efetiva e temperatura, obtendo-se 70,79 kJ/mol como valor para energia de ativação.

A forte influência da taxa de secagem com a temperatura foi observada na secagem IV da cenoura, com experimentos entre 323 e 353 K realizados por Togrul (2006). Para a faixa descrita, a difusividade de umidade efetiva variou entre 7,295 x 10^{-11}e 1,501 x $10^{-10}m^2/s$. A energia de ativação foi determinada como 22, 43 kJ/mol. O autor ajusta os dados experimentais com cinco modelos empíricos de secagem para descrever a mudança da razão de umidade com a dependência do tempo. O modelo de Midilli et al apresentou coeficiente de correlação mais próximo da unidade. Togrul (2006) submeteu ainda as constantes contidas em cada modelo sob análise de regressão múltipla a fim de verificar os efeitos combinados de temperatura e tempo combinados sobre eles. Mesmo após essa análise, o modelo derivado de Midilli forneceu o melhor resultado.

2.4 Modelos Matemáticos

A simulação é uma abordagem efetiva na predição do comportamento da secagem, pois fornece informações a respeito do produto de interesse

durante a remoção de água, úteis para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de secadores (BERBERT et al., 1995).

Uma abordagem comumente adotada por muitos modelos é a de se basear em variáveis externas ao produto, como temperatura e umidade relativa do ar, por considerar que todo o processo de secagem ocorre apenas durante o período de decaimento exponencial. Entretanto, tal consideração não permite que a resposta forneça indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e água no interior dos materiais biológicos, como grãos (CORREA J. L. G. et al., 2010).

Diante disso, surge a necessidade de se empregar diferentes tipos de modelos matemáticos para representarem o comportamento da secagem, que de uma forma geral podem ser classificados como: teóricos, empíricos e semi empíricos (LIMA et al., 2007).

Para essa análise, a teoria da migração de água por difusão, baseada na segunda lei de Fick (Equação 1), é comumente empregada. Na Figura 4 é feita a representação esquemática de uma fatia de mandacaru exposta à radiação IV.

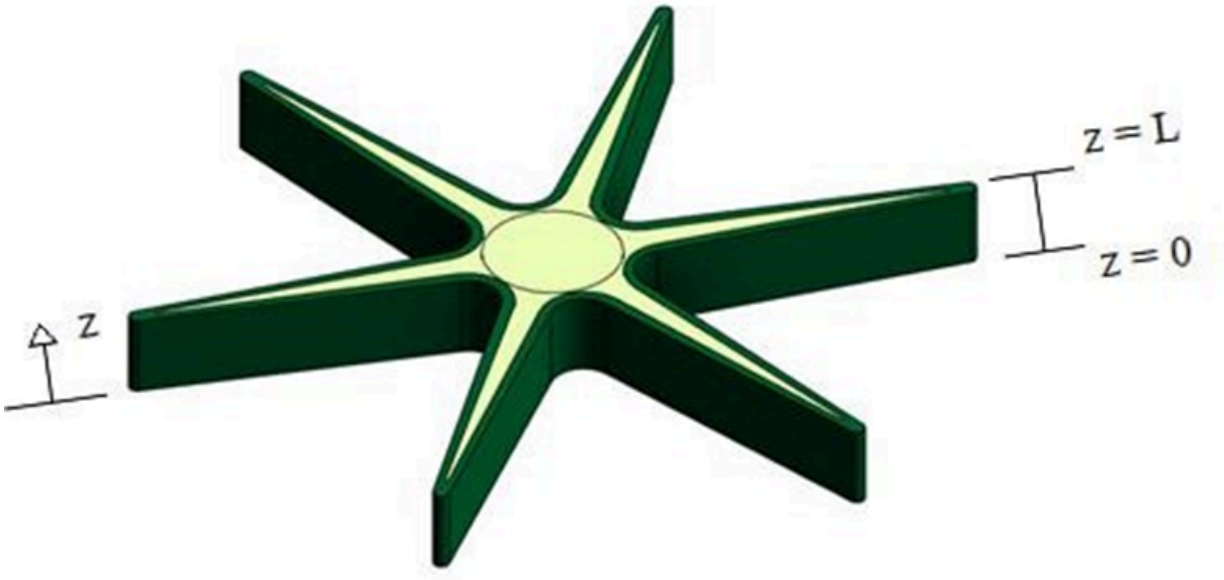


Figura 4 – Esquema da fatia de mandacaru como meio estacionário para o transporte de umidade na direção z.

Para a formulação físico-matemática do problema de transferência de massa por difusão envolvida no processo, são elencadas antes as seguintes hipóteses simplificadoras:

- Regime transiente
- Transferência de massa em uma única direção
- Sem reação química
- Fatia de mandacaru como uma placa plana
- Difusividade constante
- Distribuição inicial de umidade uniforme
- Amostra de mandacaru como meio estacionário
- Resistência externa desprezível
- Encolhimento da amostra negligenciável

A difusão 1-D transiente em coordenadas cartesianas é, então, descrita pela equação:

$$\frac{\partial X}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z}\left(D_{eff}\frac{\partial X}{\partial z}\right),$$

Em conjunção com as seguintes condições inicial e de contorno (CC) pertinentes:

- Condição Inicial: $t = 0 \rightarrow X = Xo$
- CC1: $z = 0, t > 0 \rightarrow \frac{\partial X}{\partial z} = 0$
- CC2: $z = L, t > 0 \rightarrow X = Xe$

A solução analítica integrada ao longo da distância proposta por Crank (1975) foi descrita na forma da Equação 2, tendo-se *Deff* como a

difusividade efetiva em m²/s, L a espessura da amostra de mandacaru em m, e n um número positivo inteiro.

$$\frac{X(t)-X_e}{X_o-X_e} = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{(2n-1)^2}\exp\left(\frac{(2n-1)^2\pi^2 D_{eff}}{4L^2}\right)$$

Para longos períodos de secagem, pode ser considerado n = 1 na Equação 2, sem perdas significativas de precisão, resultando na solução modificada da Equação 3 (SILVA *et al*, 2017).

$$\frac{X(t)-X_e}{X_o-X_e} = \frac{8}{\pi^2}exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}t}{4L^2}\right) \quad (3)$$

Em um ambiente industrial, ao se trabalhar com diversos materiais, são muitas as limitações para a garantia das hipóteses simplificadoras mencionadas na modelagem difusional de sólidos perfeitos e obtenção de soluções analíticas. Nesse sentido, as equações empíricas e semi empíricas possuem um papel importante, ao permitir uma rápida aplicação.

Henderson & Pabis (1961), Newton (1971) e Page (1949) são alguns dos modelos empíricos bem estabelecidos na produção agrícola. Midilli et al (2002), entretanto, é um modelo semi empírico obtido experimentalmente no trabalho sobre a secagem de cogumelos, pólen e pistache, a partir do modelo teórico da 2ª Lei de Fick. Na Tabela 1 são apresentadas equações com níveis altos de previsibilidade para o comportamento cinético, de acordo com a literatura, as quais serão utilizadas neste trabalho.

Tabela 1 – Modelos matemáticos não-lineares empregados no ajuste dos dados experimentais.

Tabela 1 – Modelos matemáticos não-lineares empregados no ajuste dos dados experimentais.

Modelo Matemático	Equação	Referência
Henderson & Pabis	$XR = aexp(-kt)$	Henderson e Pabis (1961)
Logarítmico	$XR = aexp(-kt) + c$	Akpinar e Bicer (2005)
Midilli et al.	$XR = aexp(-kt^n) + bt$	Middilli et al. (2002)
Newton	$XR = exp(-kt)$	O'Callaghan et al. (1971)
Page	$XR = exp(-kt^n)$	Page (1949)
Verma et al.	$XR = aexp(-kt) + (1 - a)\exp(-gt)$	Togrul e Pehlivan (2004)
Wang & Singh	$XR = 1 + at + bt^2$	Wang e Sing (1978)

a, b, c, k, g, n – Coeficientes e constantes empíricas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Espécimes de mandacaru foram colhidos em fazendas de Sergipe. Seu armazenamento foi feito à temperatura ambiente em um local com iluminação natural, pois nestas condições foi observado um maior tempo de manutenção de suas propriedades físico-químicas e sensoriais.

3.2 Equipamento

O secador utilizado foi desenvolvido por Júnior (2017), membro do grupo de Laboratório de Fenômenos de Transporte da Universidade Federal de Sergipe, e está esquematizado na Figura 5. Nela é apresentada a câmara de secagem, que possui duas regiões: a enumerada como (1) representa a região do equipamento em que há uma abertura para ambiente, permitindo a alimentação do produto a ser seco, enquanto que o interior da região (2) está preenchido por lâmpadas que emitem radiação infravermelha. Para a sua construção foi utilizado aço 1020 galvanizado com acabamento de uma tinta na cor cinza resistente a altas temperaturas, a fim de evitar problemas de corrosão. As dimensões do equipamento são de 1,0 m de largura; 1,0 de comprimento; e 1,2 m de altura.

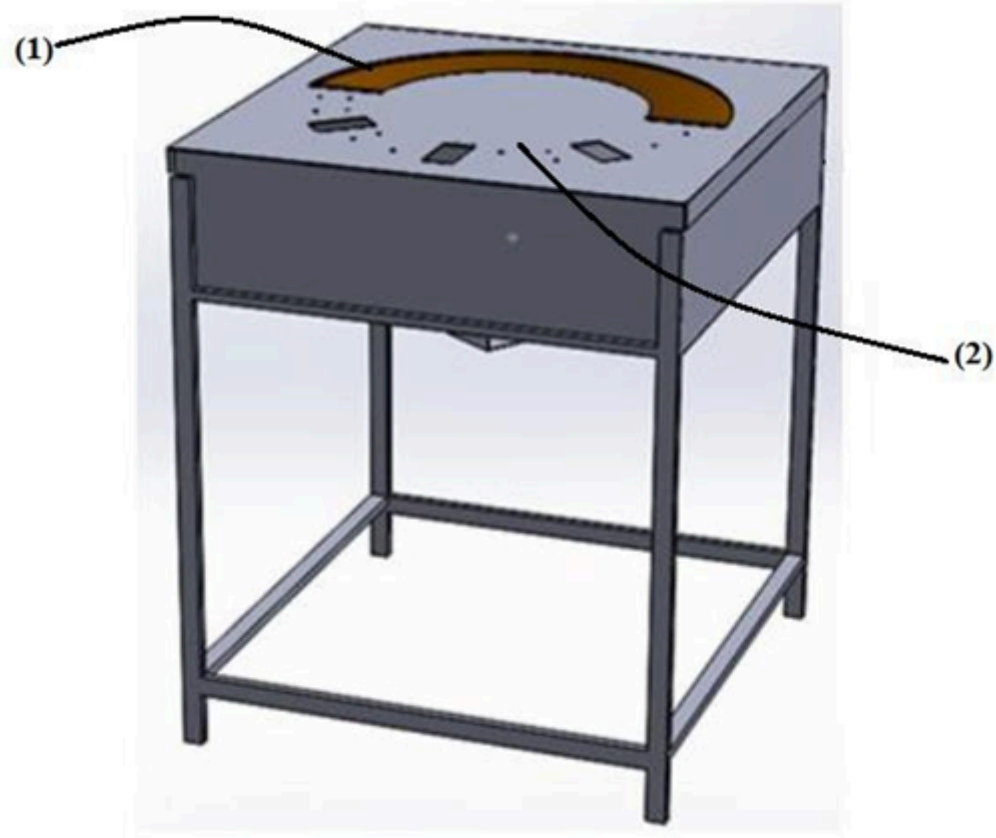


Figura 5 – Equipamento secador.

Fonte: JUNIOR, J. A. S. **Desenvolvimento de um secador tipo esteira circular assistido por aquecimento infravermelho para a secagem de bagaço de cana-de-açúcar**. 2017, p 41.

3.3 Metodologia Experimental

3.3.1 Preparo do Material

Propriedades como viscosidade do suco e coloração da cutícula da planta, eram avaliadas antes de cada experimento. Nas amostras selecionadas executavam-se os cortes no plano transversal ao eixo do tronco nas espessuras 0,010; 0,015 ou 0,020 m, de acordo com a condição experimental a ser estudada. O ambiente onde ocorria o seccionamento das fatias está representado na Figura 6, o qual é composto por uma bancada; suportes para ajudar no nivelamento da lâmina da faca empregada, de acordo com a espessura desejada; além de duas prensas, que permitiam a estabilização da faca; e a matéria prima a ser estudada, o mandacaru. O mandacaru era cuidadosamente deslocado ao longo da

bancada, pelo operador, em direção à lâmina para que fossem obtidas as fatias.

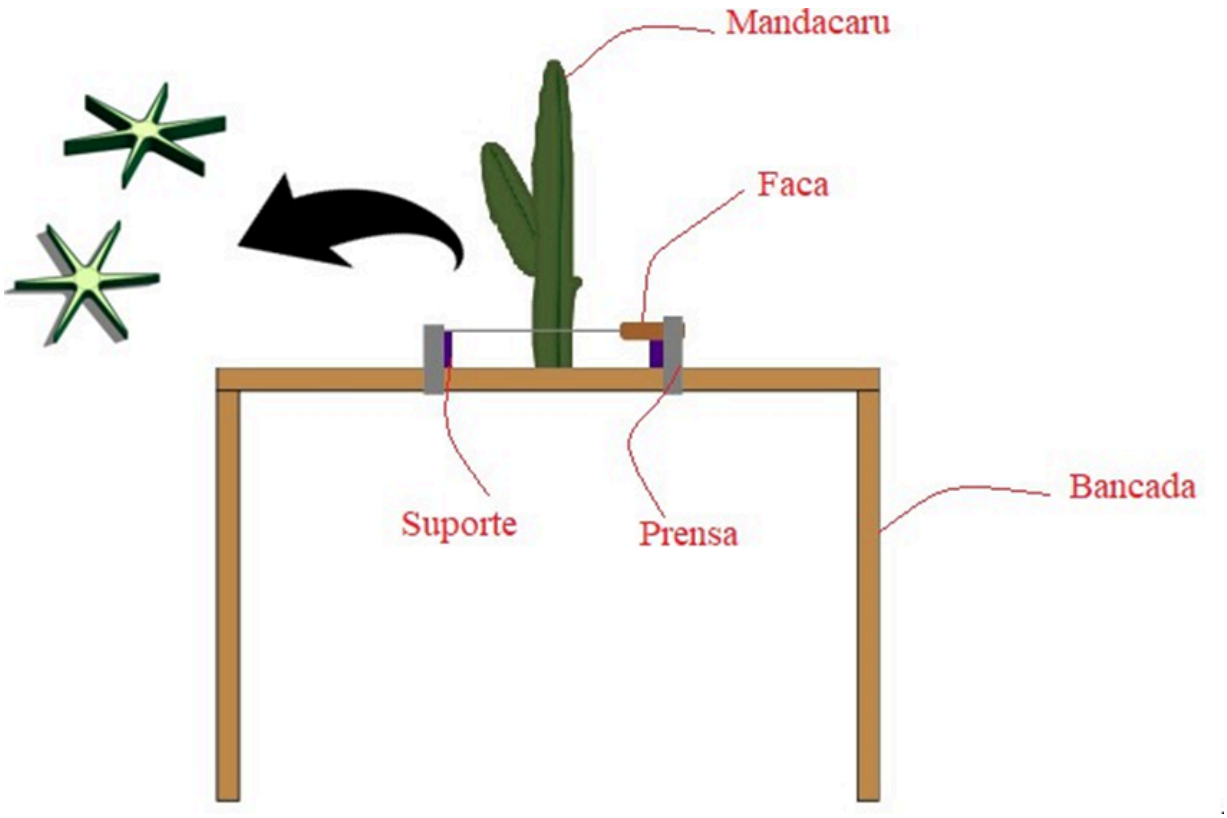


Figura 6 – Ambiente para preparação das amostras.

3.3.2 Experimentos de Secagem

Os experimentos de secagem foram executados com lâmpadas IV a uma distância fixa de 18 cm da amostra, emitindo radiação com comprimentos de onda na faixa do infravermelho médio. Os parâmetros temperatura da fonte IV e espessura da amostra foram variados em três níveis. As condições de operação analisadas estão descritas na Tabela 2. Foram feitos testes em duplicata para cada condição operacional.

Tabela 2 – Planejamento experimental com os valores das variáveis independentes.

Condição de operação	Temperatura da fonte IV (K)	Espessura da amostra (m)
1	773	0,01
2	773	0,015
3	773	0,02
4	698	0,01
5	698	0,015
6	698	0,02
7	623	0,01
8	623	0,015
9	623	0,02

Das amostras seccionadas eram colhidas informações de massa e temperatura iniciais. Em seguida, as amostras eram transportadas para a câmara de secagem, dando-se início ao processo. A cada intervalo de tempo pré-determinado, retirava-se a amostra do secador, aferia- se sua temperatura com um termômetro pistola digital infravermelho, e a massa numa balança UX 420H, e então a amostra era realimentada no secador. Esse procedimento era repetido até que fosse verificada uma massa constante, indicativo de evaporação de toda água livre.

Ao fim do processo as amostras eram encaminhadas para a estufa, onde o método de perda por dessecação era executado de acordo com as normas do Instituto Adolfo Lutz (2005), visando-se obter a correspondente de umidade pós secagem, em base úmida, e relacioná-la com

a massa colhida no início do processo para determinação da umidade inicial da amostra. As umidades iniciais verificadas variaram na faixa de 89% e 93% em base úmida (b.u.).

3.3.3 Tratamento e Análise dos Dados

i) Cinética de secagem

Os dados de teor de umidade em função do tempo foram utilizados para determinar a evolução do adimensional de umidade, através da Equação 4.

$$XR = \frac{X(t) - X_e}{X_o - X_e} \quad (4)$$

Dessa equação tem-se que o adimensional de umidade (XR) é definido como a razão entre a diferença do teor de umidade no tempo, X(t), pelo teor de umidade em equilíbrio, Xe, e a diferença entre o teor de umidade inicial, Xo, pelo teor de umidade de equilíbrio. Os gráficos de XR, temperatura da fonte IV e taxa de variação de umidade versus tempo foram obtidos a partir do software SciDAVis.

A influência das diferentes condições operacionais sobre a cinética de secagem foi avaliada também em termos da difusividade efetiva de umidade, como variável resposta. O valor de difusividade efetiva de umidade, *Deff*, para condição experimental foi obtido a partir de um ajuste não linear da Equação 3 com auxílio do software SciDAVis. Além disso, as equações empíricas, semi empíricas e a equação teórica de Fick, foram ajustas aos dados cinéticos. A qualidade do ajuste dos modelos foi avaliada no software, a partir dos parâmetros estatísticos: chi-quadrado reduzido (χ^2) e do coeficiente de determinação (R^2), entre os dados obtidos experimentalmente e o modelo. Valores altos para o coeficiente R^2 e baixos para o coeficiente χ^2 estão associados a um modelo representativo.

Os parâmetros R^2 e χ^2 foram calculados a partir das Equações 5 e 6, respectivamente. Os parâmetros XR^{exp} e XR_{pre} correspondem aos adimensionais de umidade experimentais e previstos pelo modelo, respectivamente, enquanto N representa o número de observações, z o número de parâmetros ajustados no modelo e i, o número de termos.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1} (XR_i - XR_{pre,i}) \sum_{i=1} (XR_i - XR_{exp,i})}{\sqrt{\left|\sum_{i=1}^{\cdot\cdot} (XR_i - XR_{pre,i})^{\sim}\right| * \left|\sum_{i=1}^{\cdot\cdot} (XR_i - XR_{exp,i})^{\sim}\right|}} \quad (5)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N} XR_{pre,i} - XR_{exp,i}}{N - z} \quad (6)$$

A influência das variáveis preditoras, temperatura da fonte IV e espessura das fatias de mandacaru, na difusividade mássica efetiva, foi avaliada através do método da análise de variância (ANOVA), em um nível de significância de 5%, através do STATISTICA 10.0.

ii) Propriedades termodinâmicas

A dependência do coeficiente de difusão de umidade efetivo foi avaliada a partir da relação de Arrhenius, descrita da seguinte forma:

$$D_{eff} = D_0 e^{-\frac{E_a}{RT_s}} \quad (7)$$

Tendo-se definidos D_0 como a difusividade inicial; E_a como a energia de ativação do processo de secagem; R a constante universal dos gases no valor de 8,314 kJ/mol K, e T_s a temperatura absoluta da superfície da amostra em Kelvin. Os coeficientes da equação de Arrhenius foram obtidos após a linearização da mesma, traduzida na Equação 8:

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{RT_s} \quad (8)$$

As propriedades termodinâmicas da secagem do mandacaru, variação de entalpia, Δh, variação de entropia, Δs, e variação da energia livre de Gibbs, ΔG, foram determinadas pelo método descrito por Jideani e Mpotokwana (2009, apud CORREA, P. C., 2010) :

$$\Delta h = E_a - RT_s \quad (9)$$

$$\Delta s = R\left(\ln D_0 - \ln\left(\frac{k_b}{h_p}\right) - \ln T_s\right) \quad (10)$$

$$\Delta G = \Delta h - T_s \Delta s \quad (11)$$

Onde a constante de Boltzmann, k_b, possui o valor de 1,38 x 10^{-23}J/K, enquanto que h_p, a constante de Planck, é igual a 6,626 x 10^{-34}J/s.

iii) Consumo de energia do processo

O consumo individual das resistências IV foi acompanhado ao se fazer medições de tensão e corrente ao longo dos respectivos processos. Com esses valores, tem-se a potência para todo o tempo de secagem e, portanto, tem-se a energia total do sistema. A análise de consumo energético feito foi em termos de consumo de energia total por massa de água evaporada, CEE ou consumo de energia específica, expresso pela Equação 12. A umidade alvo para a análise comparativa foi de 0,10 em base seca (b.s.).

Ao CEE foi aplicada também a análise de variância ANOVA, a fim de identificar a influência da temperatura da fonte IV e espessura do mandacaru no consumo energético do processo.

$$CEE = \frac{P_{IV} t_{Secagem}}{m_{H20\ evaporada}} \quad (12)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Características de secagem

As curvas da cinética de secagem do mandacaru, expressas em termos da razão de umidade (XR) em função do tempo, são apresentadas nas Figuras 7-12, a partir das quais pode- se comparar as características de

secagem do material com diferentes espessuras (0,01; 0,015 e 0,02 m), exposto a diferentes temperaturas da fonte IV (623, 698 e 773 K).

A partir do comportamento cinético de secagem mostrado nas Figuras 7, 8 e 9, é possível notar que as amostras com maiores espessuras necessitaram de um maior tempo de exposição às lâmpadas IV, para que toda água livre fosse removida. Nos experimentos conduzidos a 623 K, entretanto, a variação do conteúdo de umidade pouco difere ao comparar-se as secagens em espessuras distintas, no gráfico da Figura 9.

Observou-se tempos de processo mais longos, pois, em amostras mais espessas têm-se um maior caminho difusional a ser percorrido, tornando a migração até a superfície mais lenta. Nguyen e Price (2007) também registraram que quanto maior a espessura da amostra, maior o tempo de secagem para bananas fatiadas.

O aumento da temperatura da fonte infravermelho provocou a remoção da umidade do mandacaru em um menor tempo, em função da maior quantidade de calor transferida para o material, gerando uma maior energia vibracional e maior atividade entre as moléculas de água além de gerar, também, uma redução na viscosidade da água. Esses efeitos, em conjunto, favorecem a difusão das moléculas de água nos capilares (RUHANIAN e MOVAGHARBEJAD, 2006). As cinéticas de secagem que melhor evidenciam este comportamento podem ser observadas nas Figuras 10-12, onde para cada figura tem-se uma espessura fixada.

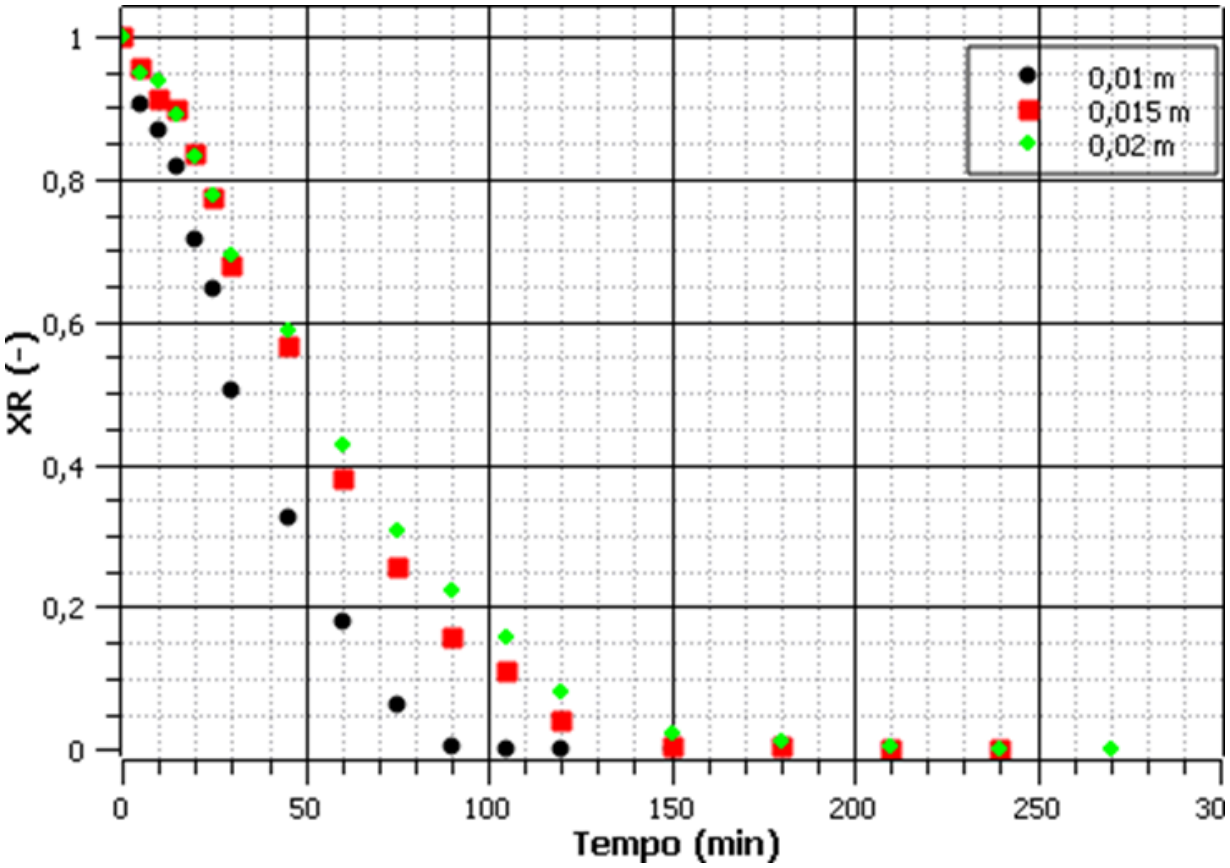


Figura 7 – Evolução do adimensional de umidade (XR) com o tempo para três espessuras de mandacaru, na faixa de temperatura de 773 K.

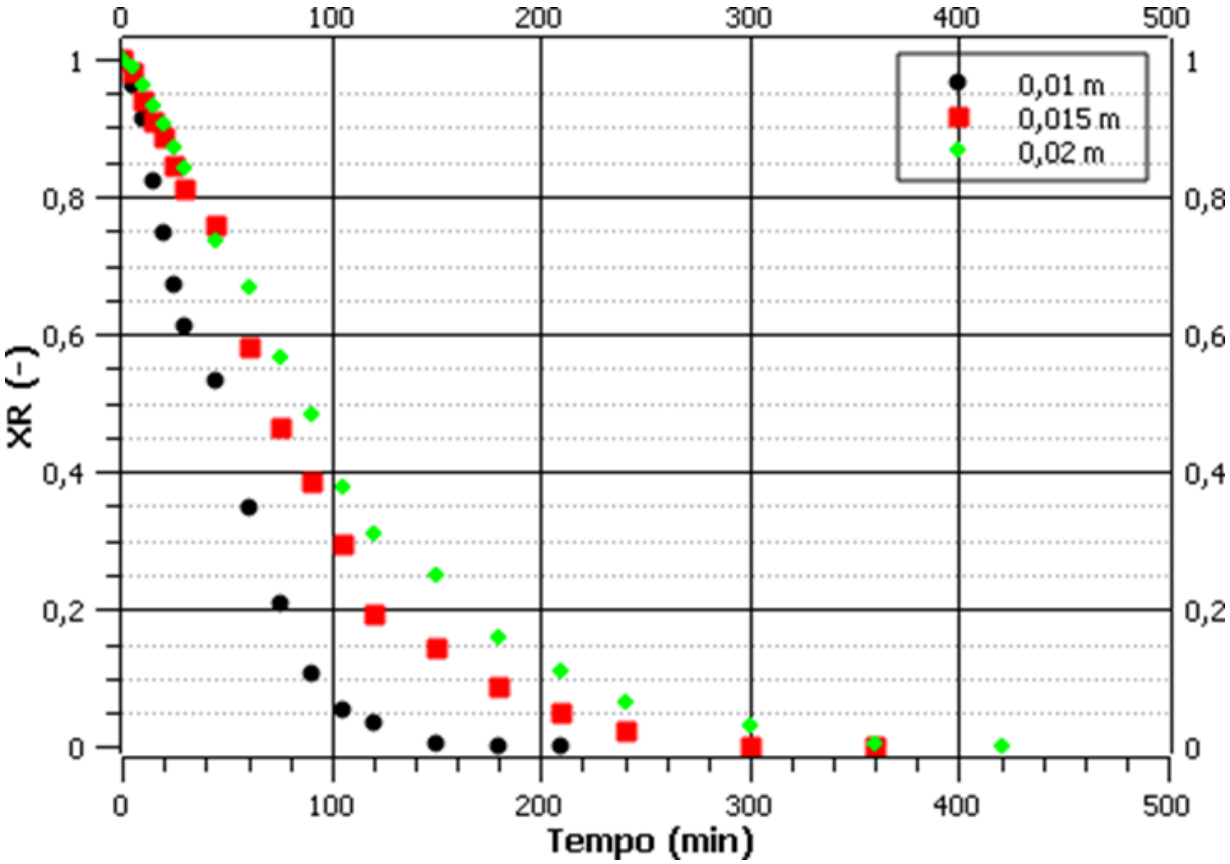


Figura 8 – Evolução do adimensional de umidade (XR) com o tempo para três espessuras de mandacaru, na faixa de temperatura de 698 K.

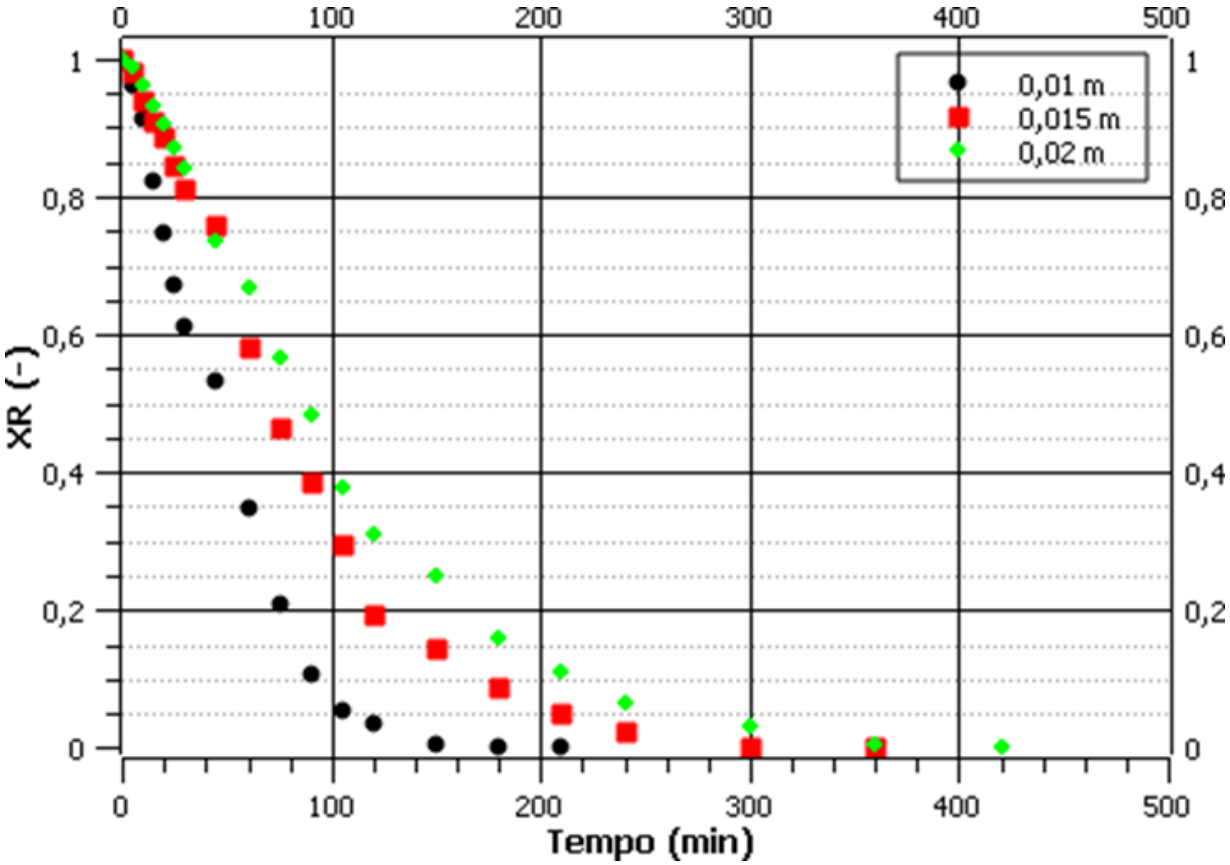


Figura 8 – Evolução do adimensional de umidade (XR) com o tempo para três espessuras de mandacaru, na faixa de temperatura de 698 K.

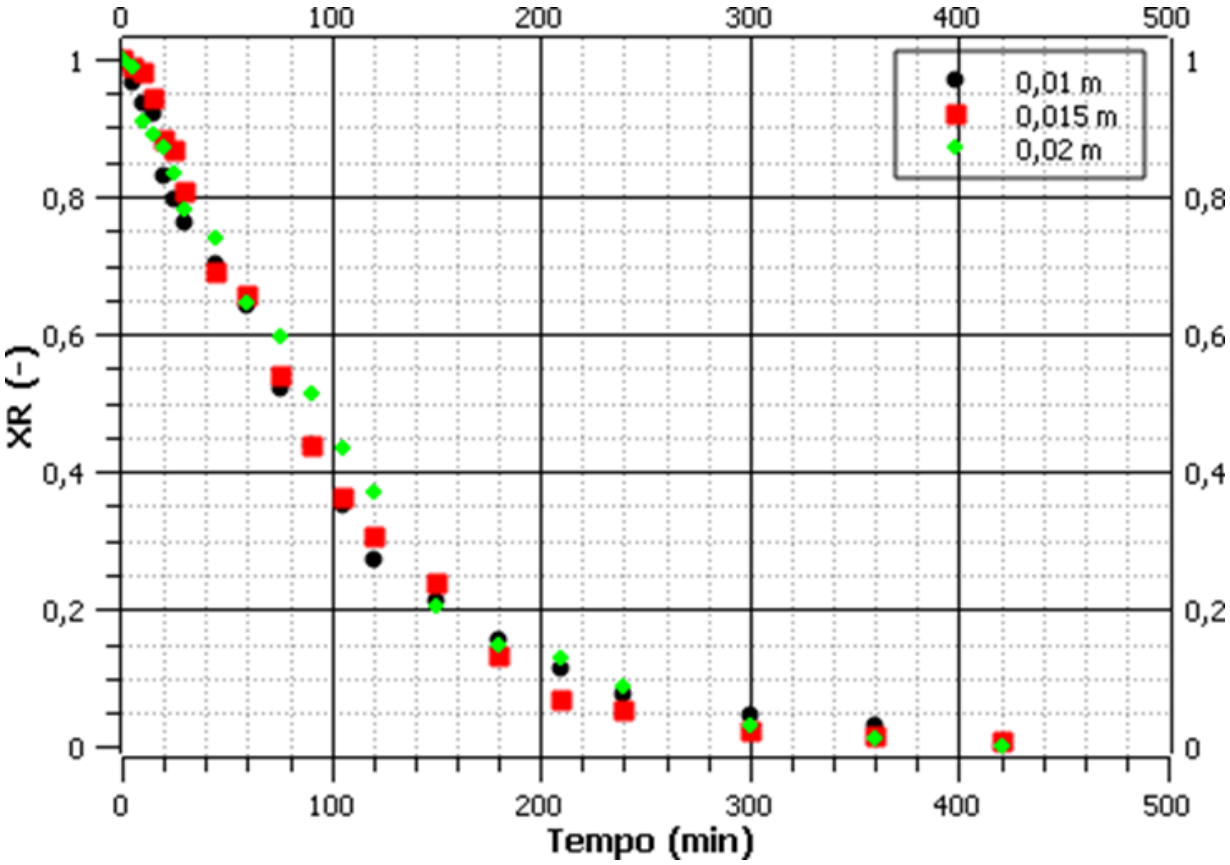


Figura 9- Evolução do adimensional de umidade (XR) com o tempo para três espessuras de mandacaru, na faixa de temperatura de 623 K.

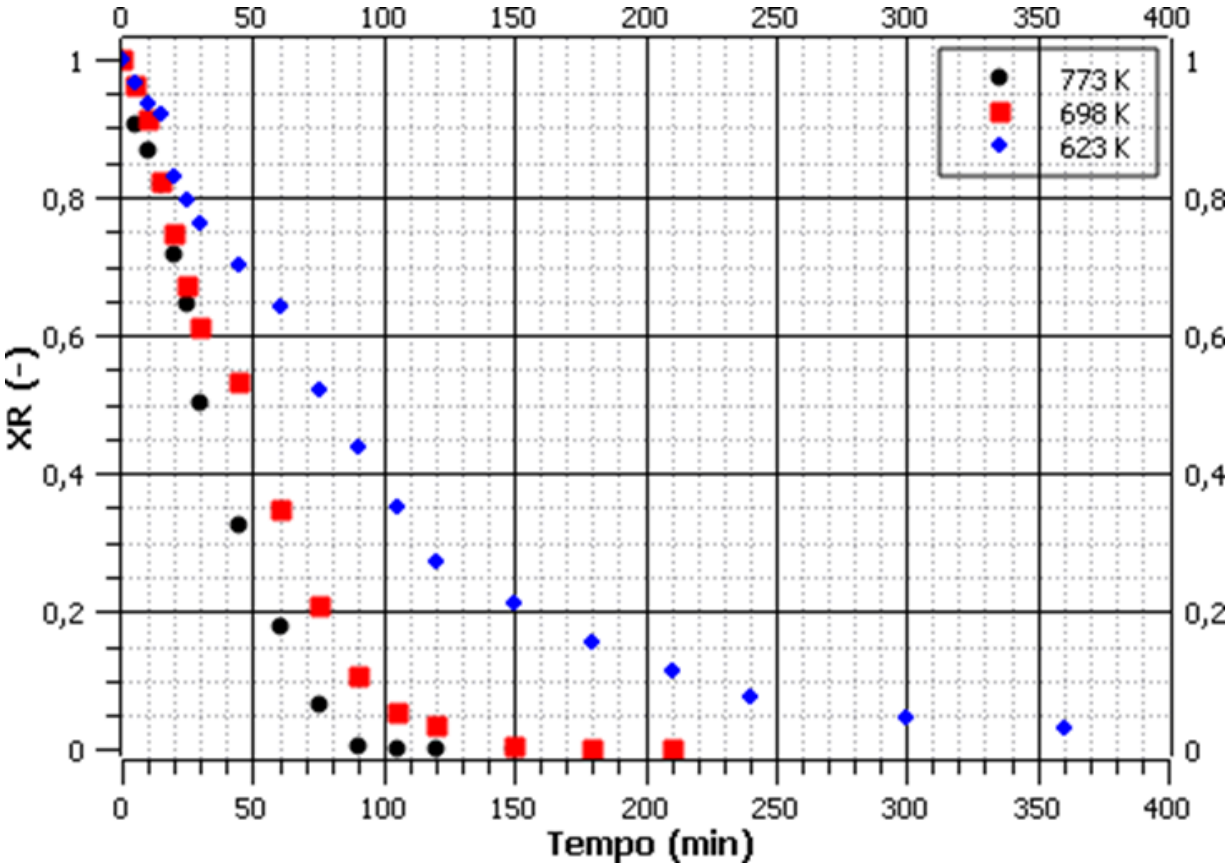


Figura 10- Evolução do adimensional de umidade (XR) com o tempo, para três temperaturas da fonte IV, na espessura fixada de 0,01 m.

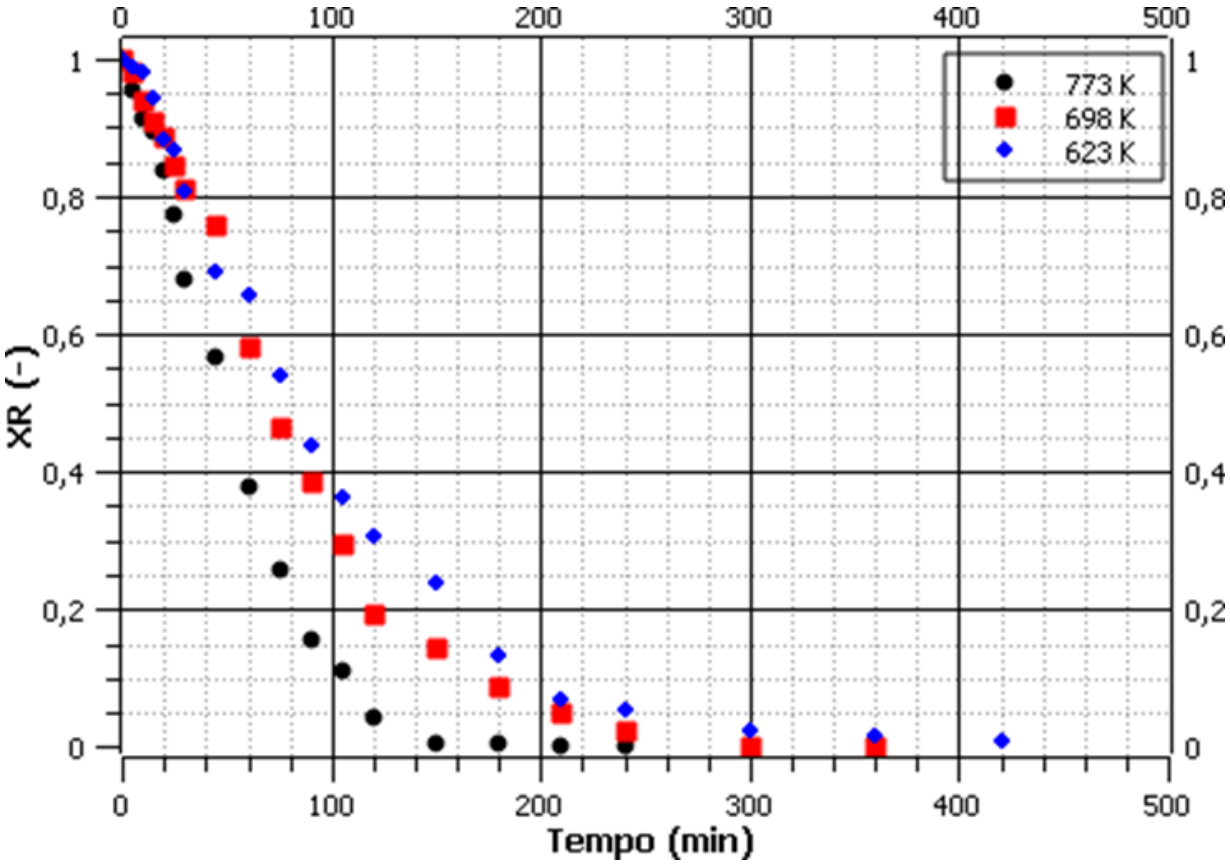


Figura 11 – Evolução do adimensional de umidade (XR) com o tempo, para três temperaturas da fonte IV, na espessura fixada de 0,015 m.

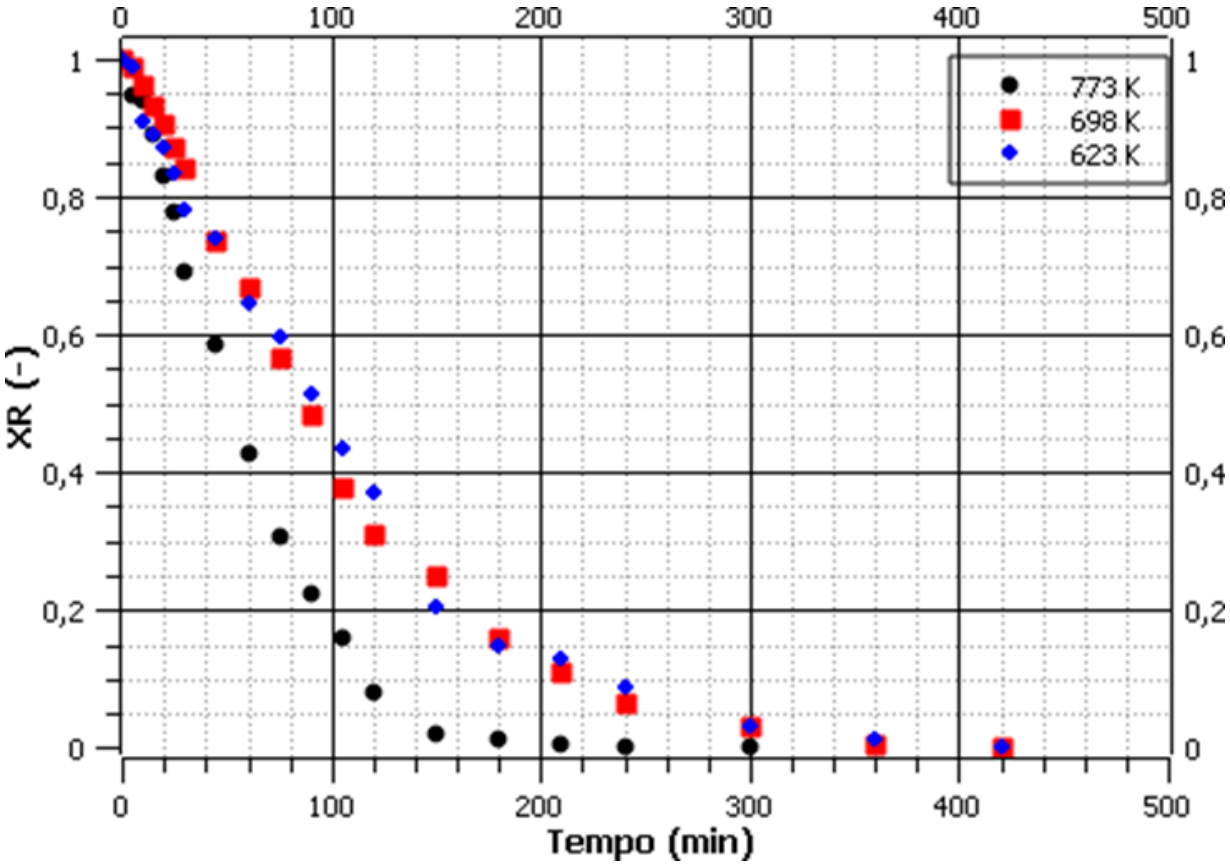


Figura 12 – Evolução do adimensional de umidade (XR) com o tempo, para três temperaturas da fonte IV, na espessura fixada de 0,02 m.

A evolução da temperatura superficial das fatias de mandacaru com o tempo se encontra disponível nas Figuras 13-18, em uma análise comparativa, ao se fixar temperatura IV ou espessura. A leitura dos gráficos contidos nessas figuras permite verificar um crescimento acentuado da temperatura superficial nos momentos iniciais das secagens, e uma aparente tendência a valores assintóticos a partir de determinado ponto do processo, mas apresentando oscilações, não sendo identificado o período a taxa constante, período 1 da curva evolutiva da temperatura do produto com o tempo, contida na Figura 3. Este comportamento assintótico após o período inicial sugere que a superfície do mandacaru foi seca, e a migração interna de umidade não mais supre a taxa de evaporação na extremidade exposta. Não havendo mais umidade superficial, o mandacaru passa a utilizar a energia eletromagnética fornecida na forma de calor sensível, tendo como consequência a elevação da sua temperatura na face externa (NETO et al., 2014).

Os valores da temperatura da superfície das amostras encontrados ao fim dos experimentos estão dispostos na Tabela 3. A temperatura na superfície da amostra apresentou relação direta com a temperatura IV, pois com o aumento da densidade de radiação emitida pela fonte, há a elevação da transferência de calor. Quanto ao efeito da espessura na temperatura, a partir dos valores dessa mesma tabela, pode-se notar diferenças, entre as amostras de maior e menor espessura, 32,5; 15 e 53,6 K, nas condições de 773, 698 e 623 K para a fonte IV. Os resultados de temperatura mais altos à espessura de 0,02 m provavelmente estão associados ao fato do maior tempo de exposição da amostra ao IV, para que fosse seca.

A diferença entre as temperaturas da fonte infravermelha e as temperaturas atingidas pelo produto ao fim do processo é notável. Isso é devido às propriedades de absortividade e refletividade do material, em que corpos escuros favorecem a absorção da radiação (INCROPERA et al., 2008). O conteúdo interno do mandacaru, entretanto, possui coloração clara. Além do efeito do tipo de material, outra razão contribuinte para essa diferença de temperaturas é a distância adotada de 18 cm da fonte IV em relação à amostra.

Tabela 3 – Valores médios de temperatura superficial atingidas pelas fatias de mandacaru ao fim do processo.

T_{IV} (K)	Espessura (m)	$T_{Superfície}$ (K)
773	0,01	$423,3 \pm 2,9$
773	0,015	$431,2 \pm 4,0$
773	0,02	$455,8 \pm 5,7$

698	0,01	413,1 ± 6,8
698	0,015	405,4 ± 4,2
698	0,02	428,1 ± 6,4
623	0,01	351,3 ± 4,8
623	0,015	398,5 ± 5,5
623	0,02	404,9 ± 3,0

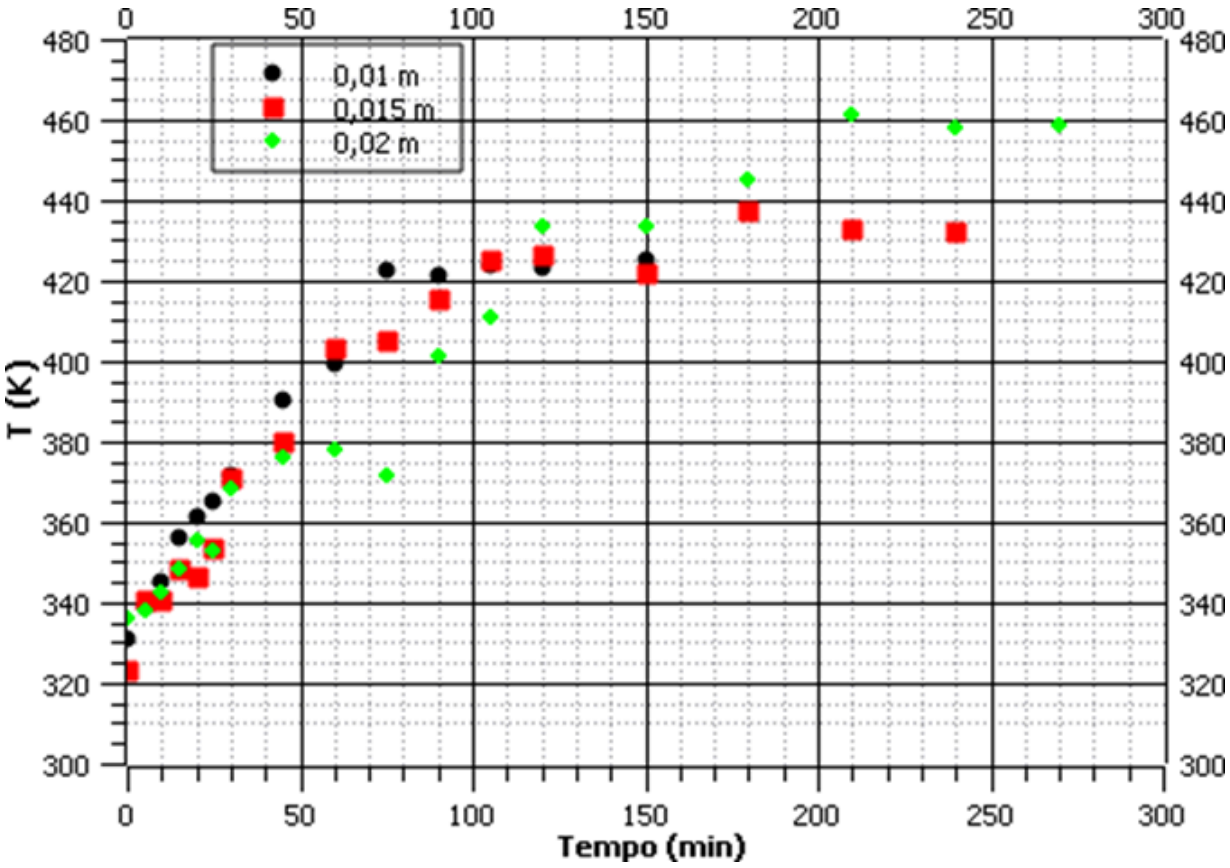


Figura 13 – Evolução da temperatura superficial com o tempo, para três espessuras de mandacaru, na temperatura da fonte IV fixada em 773 K.

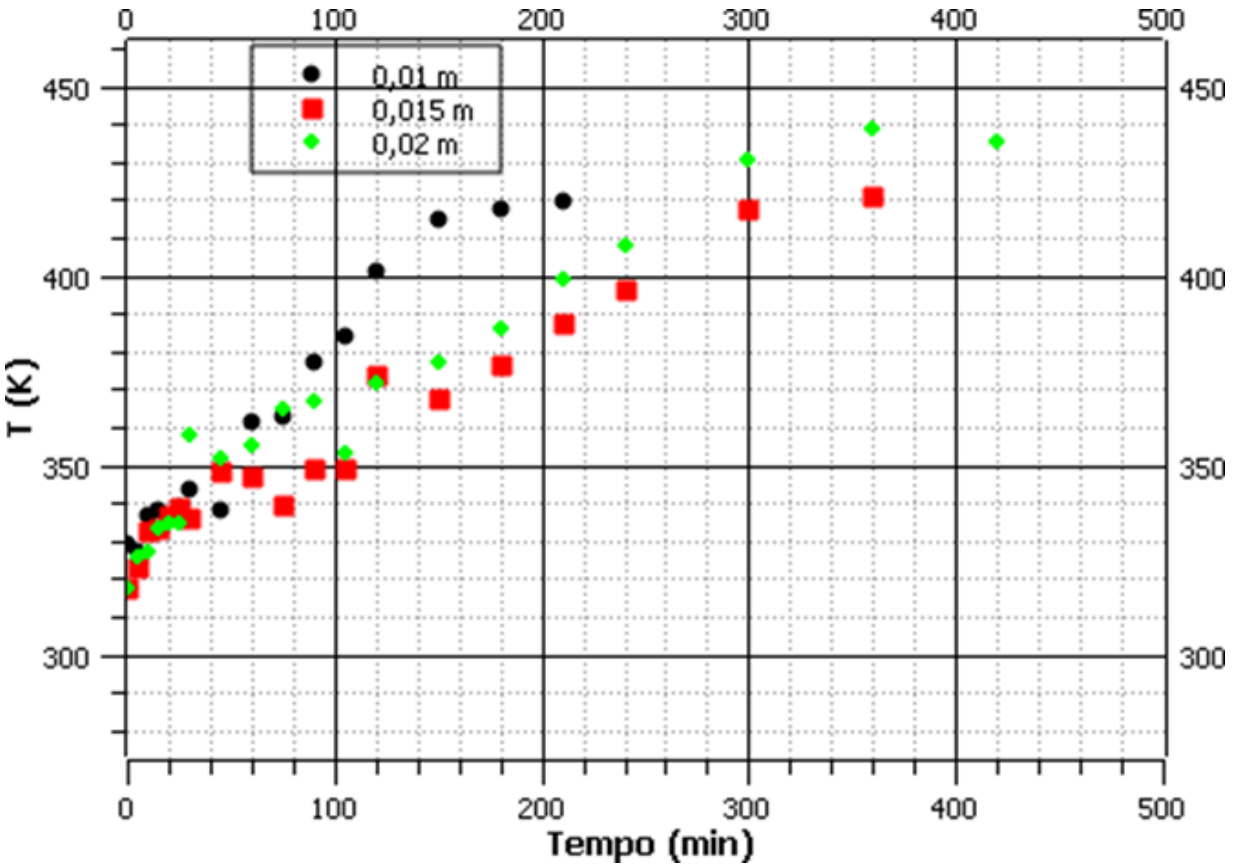


Figura 14 – Evolução da temperatura superficial com o tempo, para três espessuras de mandacaru, na temperatura da fonte IV fixada em 698 K.

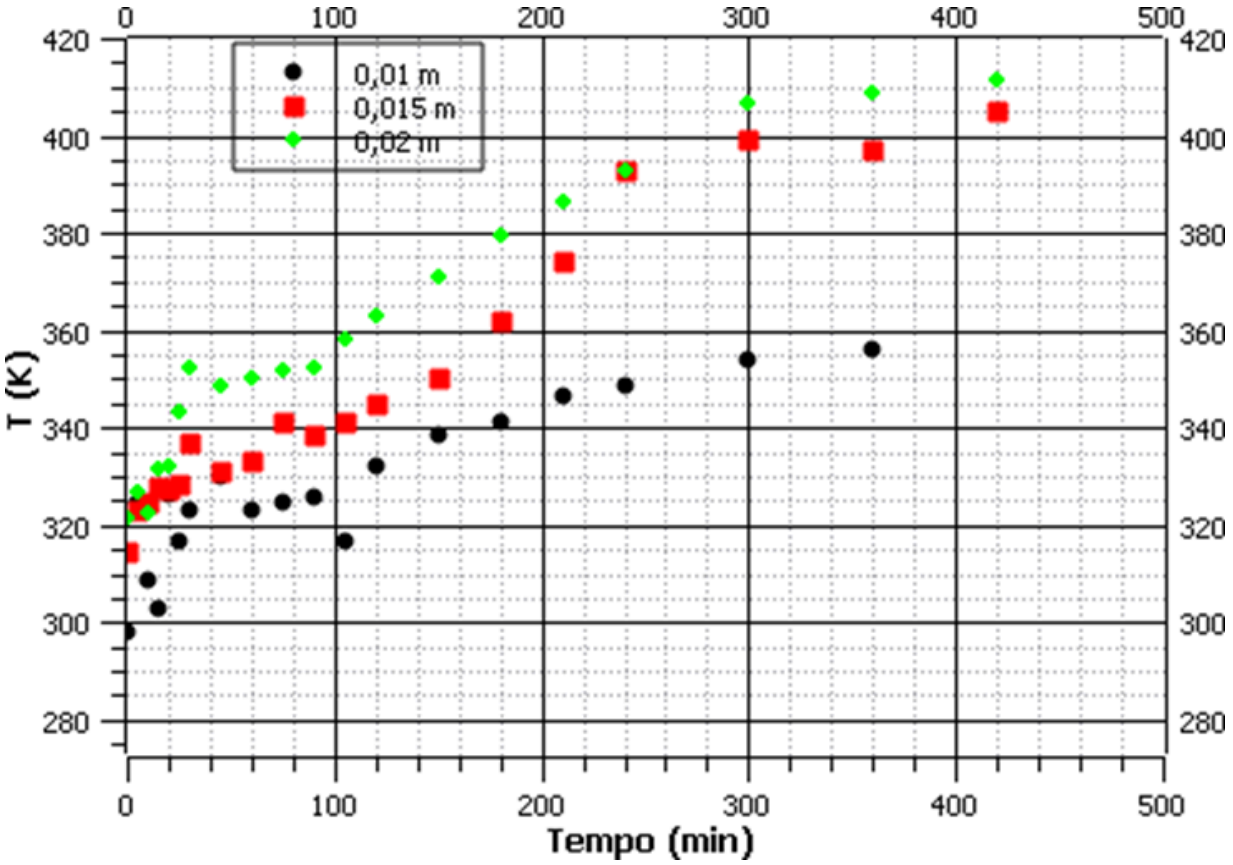


Figura 15 – Evolução da temperatura superficial com o tempo, para três espessuras de mandacaru, na temperatura da fonte IV fixada em 623 K.

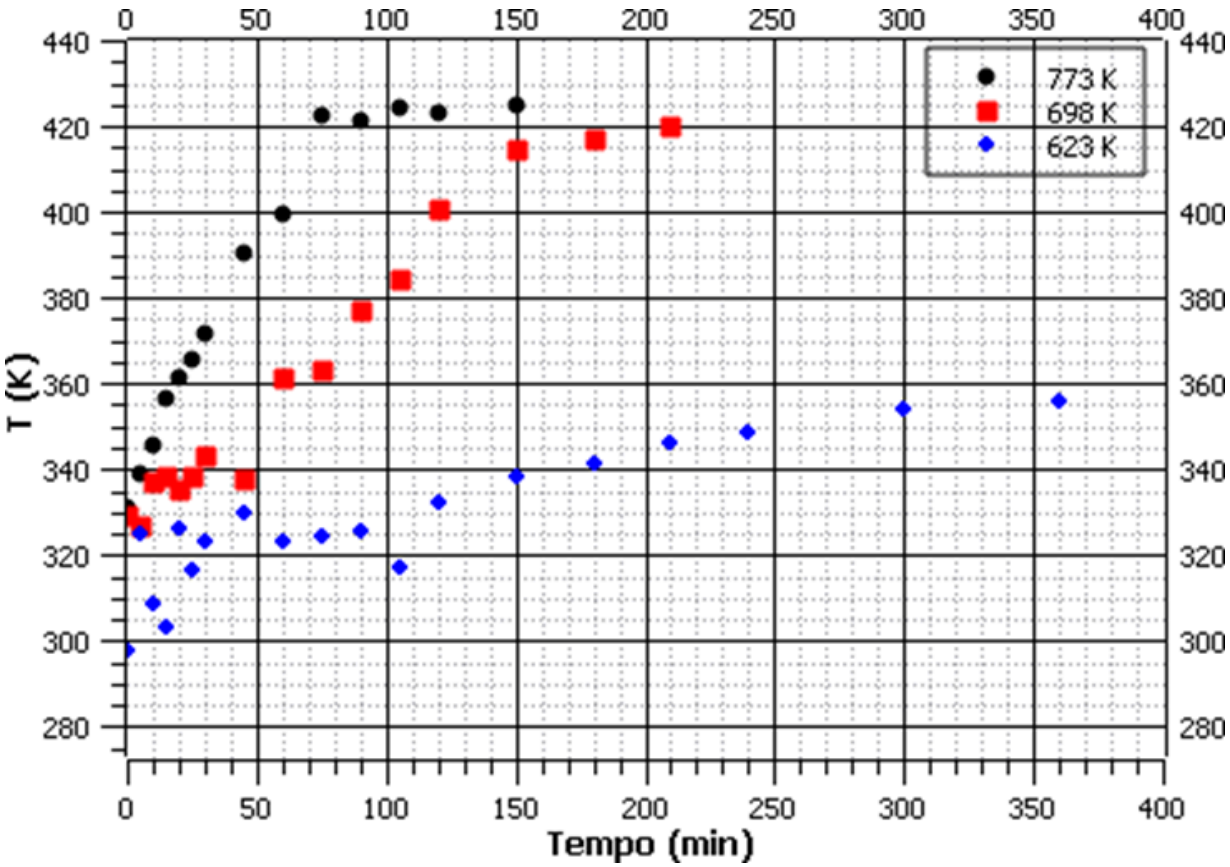


Figura 16 – Evolução da temperatura superficial com o tempo, para três temperaturas da fonte IV, na espessura fixada de 0,01 m.

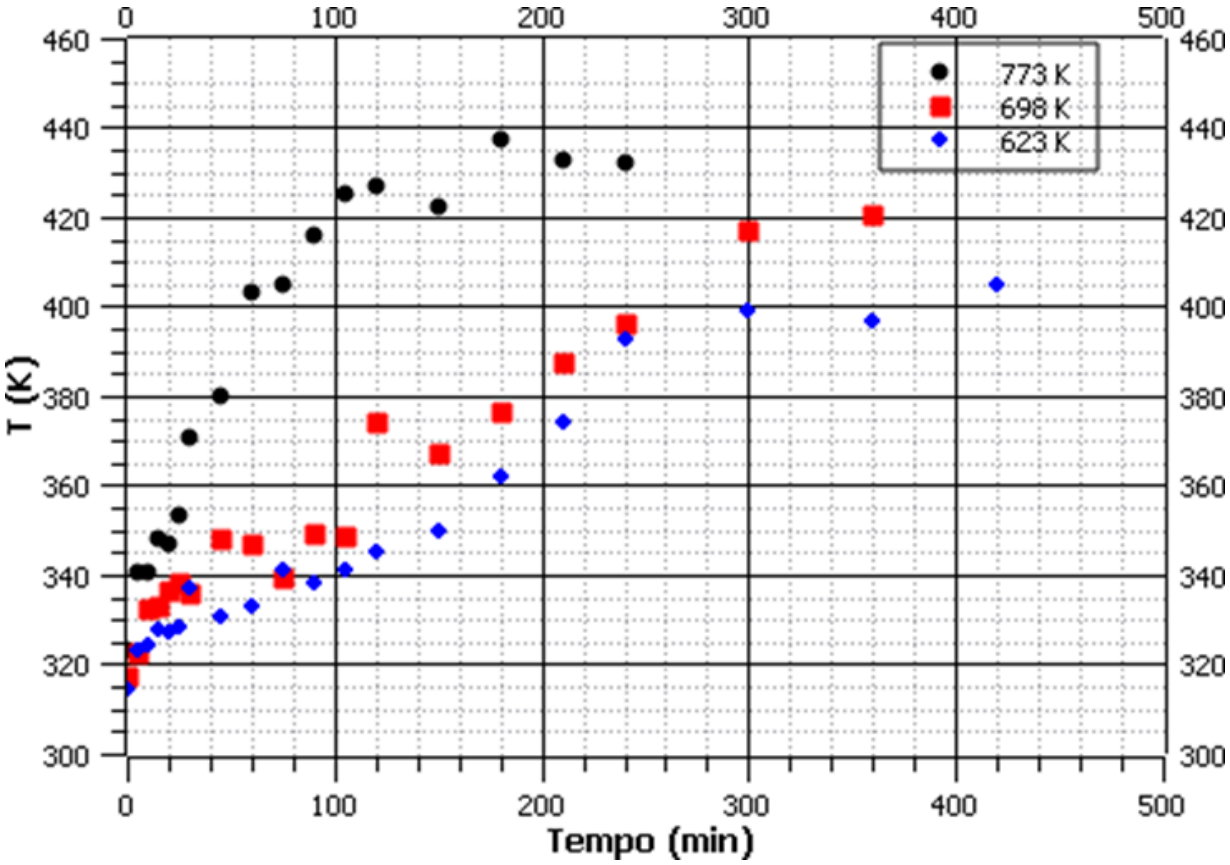


Figura 17 – Evolução da temperatura superficial com o tempo, para três temperaturas da fonte IV, na espessura fixada de 0,015 m.

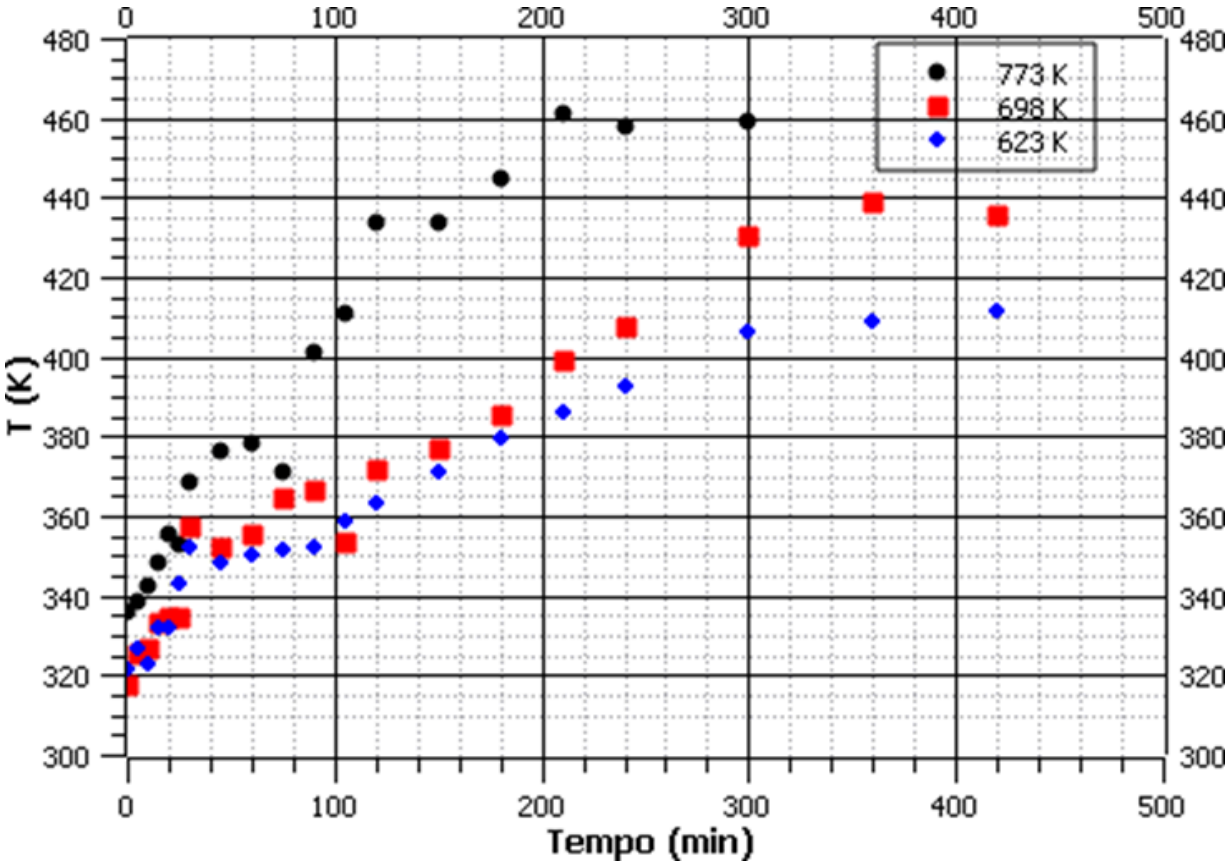


Figura 18 – Evolução da temperatura superficial com o tempo, para três temperaturas da fonte IV, na espessura fixada de 0,02 m.

Foram avaliadas ainda as taxas de secagem ao longo do processo para todos os ensaios. Seus resultados estão contidos nas Figuras 19-21, e a sua leitura permite identificar uma remoção do conteúdo de umidade de maneira mais acentuada nos primeiros 50 minutos. Esse comportamento nesta fase do processo é devido ao alto teor de umidade nas amostras, principalmente na superfície do sólido, o que permite uma maior capacidade de absorção da energia radiante na região do infravermelho responsável pela evaporação da água livre (NASCIMENTO, 2014). Nos instantes subsequentes, em direção ao fim do processo, nota-se um decréscimo da taxa se secagem, que é causado pela remoção lenta e gradual da umidade superficial, tendo como consequência uma redução na energia eletromagnética absorvida e convertida na forma de calor latente de evaporação.

O período a taxa constante não pode ser verificado para a secagem desta cactácea nas faixas de temperatura e espessura estudadas, demonstrando que a migração de umidade interna para a superfície após

atingir seu valor máximo, rapidamente passa a não ser suficiente para suprir a perda por evaporação na superfície. Ao comparar-se com a curva típica de taxa de secagem da Figura 3, nota-se que a secagem de mandacaru não possui o período 1.

Zheng et al. (2011) afirmam que a secagem de quase todos os materiais biológicos ocorre, predominantemente, em um período de taxa decrescente, tendo a difusão como mecanismo dominante para o transporte de água livre. De acordo com Nguyen e Price (2007), pode observado para alguns materiais biológicos com grandes quantidades de água livre, o período de remoção de umidade constante se a temperatura empregada não for demasiadamente alta.

Sharma et al. (2005) e Ashtiani et al. (2017) através da análise da secagem de fatias de cebola e folhas de hortelã, respectivamente, observaram comportamento similares de crescimento íngreme nas curvas de taxa de secagem no início do processo, seguido de posterior decaimento, sem a presença do período a taxa constante. Mesma tendência cinética foi constatada nos trabalhos de Gouveia et al. (2002) para secagem de caju; Reis et al. (2012) na secagem de folhas de manjericão; e Silva et al. (2009) no estudo com banana maçã.

Maiores picos de taxa de secagem foram percebidos para as amostras a 0,01 m de espessura nas temperaturas de 773 e 698 K, enquanto que para os experimentos a 623 K, as diferentes espessuras apresentaram taxas de secagens próximas. De acordo com Lima et al (2016), a diminuição da taxa de secagem com o aumento da espessura é devido à maior resistência à transferência de massa encontrada pela umidade. Foi verificado ainda que o aumento da temperatura da fonte infravermelho resultou em picos de secagem cada mais elevados, como esperado, uma vez que mais energia radiante foi fornecida à amostra.

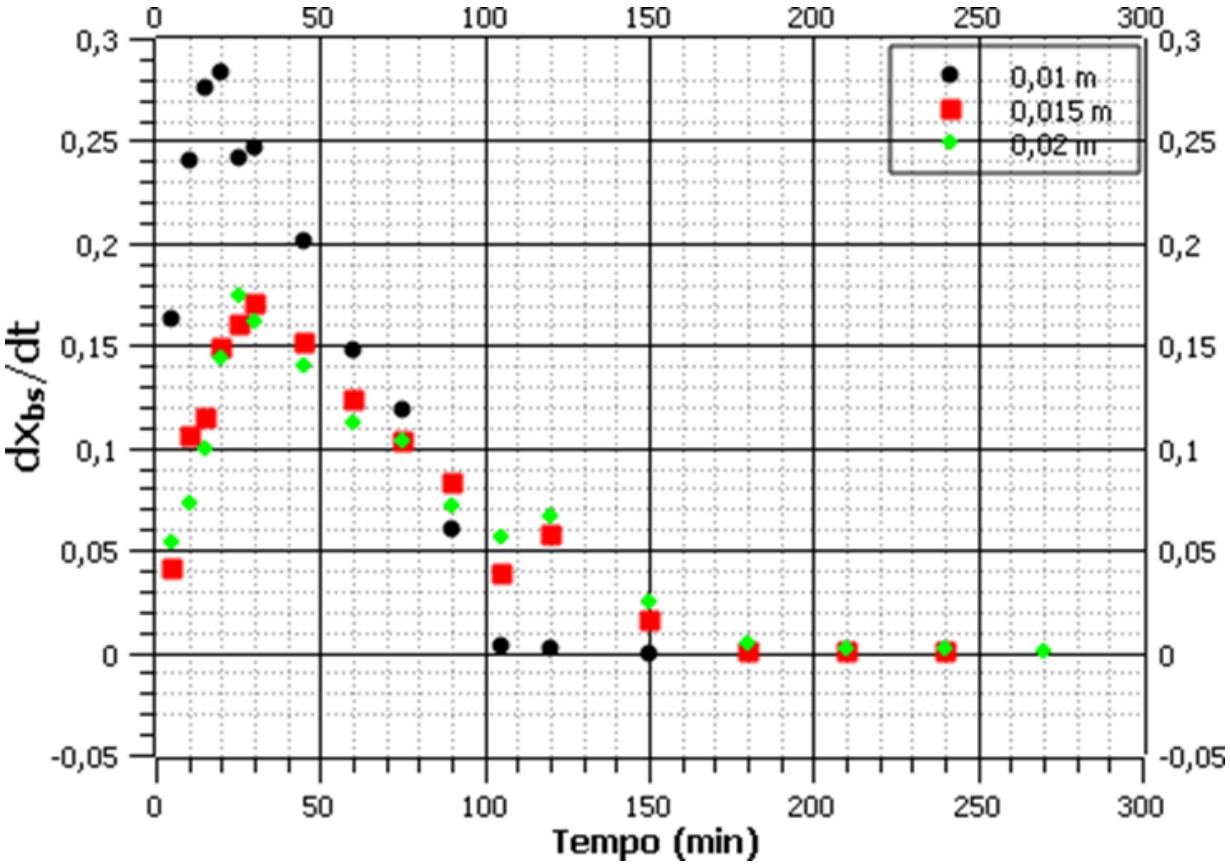


Figura 19 – Evolução da taxa de secagem com o tempo, na temperatura fixada de 773 K.

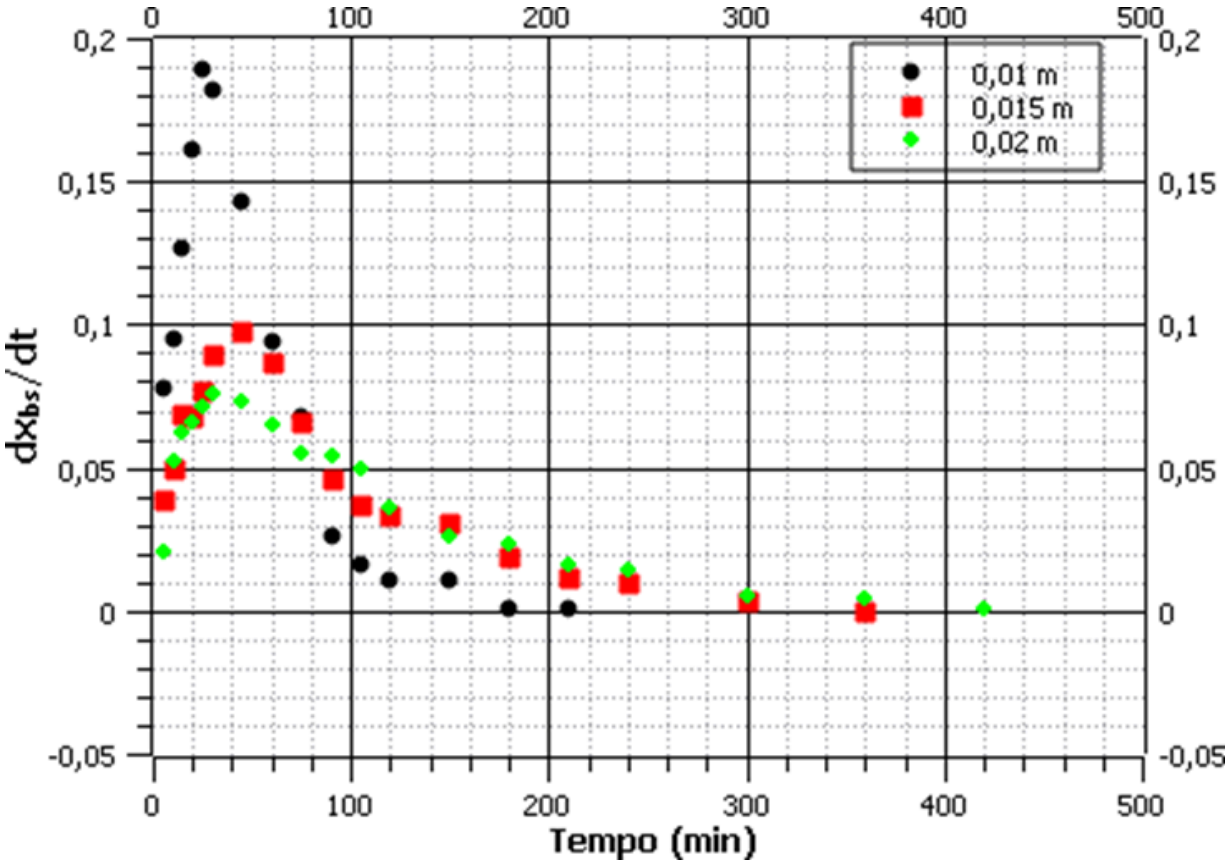


Figura 20 – Evolução da taxa de secagem com o tempo, na temperatura fixada de 698 K.

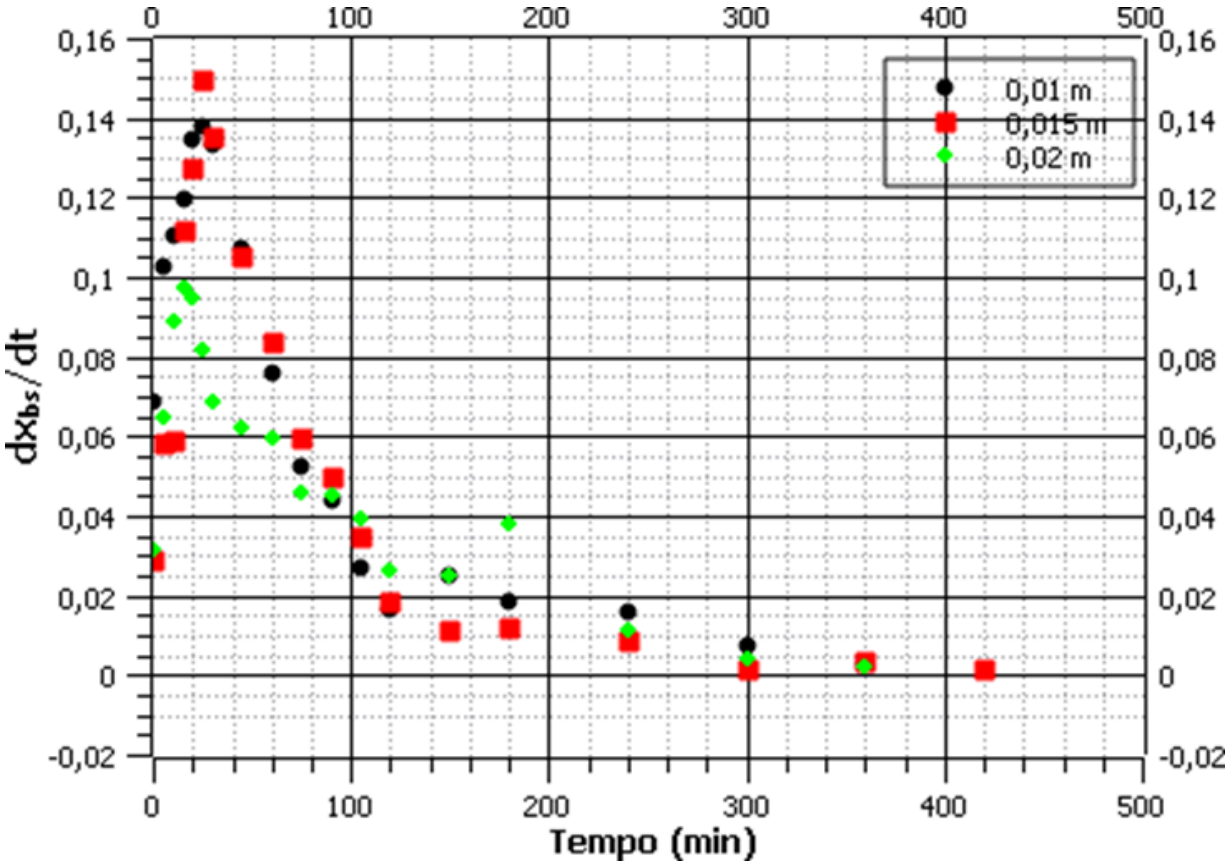


Figura 21 – Evolução da taxa de secagem com o tempo, na temperatura fixada de 623 K.

4.2 Descrição da Cinética de Secagem

Aos dados experimentais foram aplicados ajustes não-lineares, através do modelo teórico da difusão transiente, e das equações empíricas dispostas na literatura. O melhor modelo foi selecionado baseado nos maiores valores de R^2 e menor valores de χ^2, disponíveis na Tabela 4.

O modelo proposto por Midilli et al. demonstrou ser o mais representativo, pois apresentou R^2 superior e χ^2 inferior em todas as condições operacionais, exceto nas condições 3 e 6, onde, de forma respectiva, Page e Verma et al. apresentaram melhores resultados. A estimativa dos parâmetros estatísticos mostrou valores entre 0,002 a 0,085 para χ^2, enquanto que para o coeficiente de determinação, o intervalo foi de 0,961 a 0,999. A boa concordância entre os dados experimentais e dados previstos pode ser verificada a partir da Figura 22, com boa parte dos resultados obtidos localizados na reta de 45°.

Tabela 4 – Resultados estatísticos obtidos a partir das equações não-lineares de secagem.

Modelo	773K e 0,01 m		773K e 0,015 m		773K e 0,02 m	
	χ^2	R^2	χ^2	R^2	χ^2	R^2
2ª Lei de Fick Modificada	0,057	0,971	0,055	0,978	0,057	0,980
Henderson & Pabis	0,057	0,971	0,055	0,978	0,039	0,985
Logarítmico	0,033	0,983	0,041	0,984	0,027	0,990
Midilli et al.	0,005	0,997	0,004	0,998	0,050	0,981
Newton	0,077	0,961	0,086	0,966	0,064	0,975
Page	0,007	0,997	0,004	0,998	0,003	0,999
Verma et al.	0,042	0,979	0,040	0,984	0,004	0,998
Wang & Singh	0,017	0,991	0,037	0,985	0,025	0,990
Modelo	698K e 0,01 m		698K e 0,015 m		698K e 0,02 m	
	χ^2	R^2	χ^2	R^2	χ^2	R^2
2ª Lei de Fick Modificada	0,038	0,983	0,044	0,983	0,024	0,991
Henderson & Pabis	0,038	0,983	0,044	0,983	0,024	0,991
Logarítmico	0,025	0,989	0,032	0,988	0,015	0,994
Midilli et al.	0,011	0,995	0,006	0,998	0,002	0,999
Newton	0,056	0,974	0,071	0,973	0,046	0,983
Page	0,012	0,995	0,007	0,998	0,002	0,999
Verma et al.	0,056	0,974	0,071	0,973	0,002	0,999
Wang & Singh	0,016	0,993	0,033	0,987	0,021	0,992
Modelo	623K e 0,01 m		623K e 0,015 m		623K e 0,02 m	
	χ^2	R^2	χ^2	R^2	χ^2	R^2
2ª Lei de Fick Modificada	0,014	0,994	0,023	0,991	0,027	0,989
Henderson & Pabis	0,014	0,994	0,023	0,991	0,027	0,989
Logarítmico	0,012	0,994	0,017	0,994	0,017	0,993
Midilli et al.	0,008	0,997	0,005	0,998	0,010	0,996
Newton	0,019	0,991	0,046	0,983	0,033	0,987
Page	0,008	0,996	0,005	0,998	0,013	0,995
Verma et al.	0,008	0,996	0,046	0,983	0,011	0,996
Wang & Singh	0,020	0,991	0,027	0,990	0,018	0,993

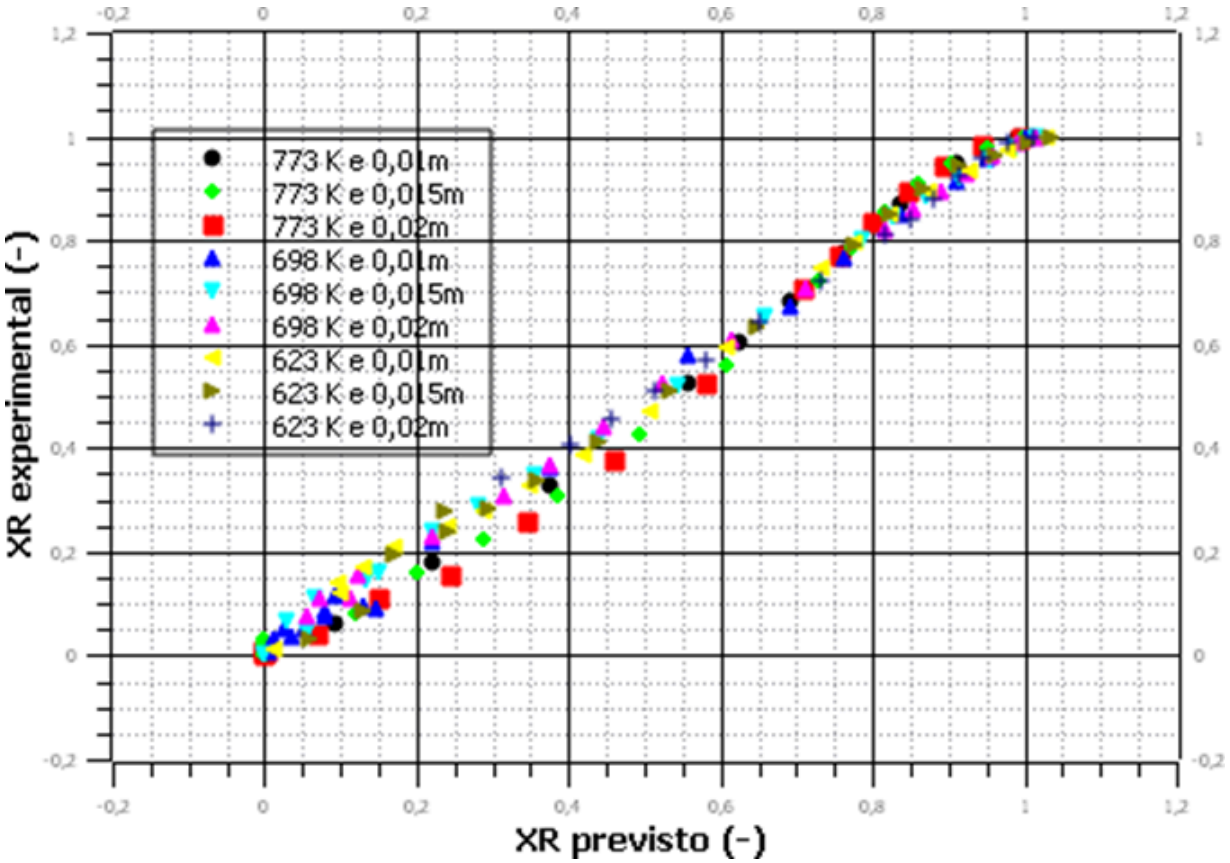


Figura 22 – Adimensional de umidade experimental em função dos resultados previstos pela equação de Midilli et al em diferentes condições operacionais.

Desde a sua publicação em 2002, Midilli et al. vem ganhando destaque na escolha para modelagem e simulação de processos de secagem de produtos agrícolas, por sua alta capacidade de predição de resultados. Reis et al. (2012), Doymaz et al. (2015), Togrul (2006) e Martinazzo et al. (2007) são alguns dos autores que devido a seus resultados, elegeram este modelo em questão como o mais adequado para as cinéticas de secagem de seus produtos.

Os resultados estatísticos de ajustes da 2ª Lei de Fick que se mostraram inferiores às equações empíricas e semi empíricas, podem ter sido ocasionados devido à simplificação feita na equação teórica de Fick com o truncamento no primeiro termo da série, e ao emprego deste modelo não só ao período da taxa decrescente, que é o momento da secagem em que a difusão de umidade representa todos os mecanismos de transferência de água, mas a toda faixa experimental.

4.3 Difusividade Mássica Efetiva

Para cada condição de temperatura e espessura, foi obtido um valor de difusividade mássica efetiva, estimados a partir do ajuste da Equação 3 aos dados de secagem. Seus resultados estão listados na Tabela 5. A difusividade efetiva teve um aumento com o aumento da temperatura, como previsto pela teoria.

Tabela 5 – Valores para difusividade mássica efetiva nas respectivas condições operacionais.

T_{IV} (K)	Espessura (m)	D_{eff} (m²/s)
773	0,01	1,79 x 10^{-8}
773	0,015	2,73x 10^{-8}
773	0,02	4,38 x 10^{-8}
698	0,01	1,35 x 10^{-8}
698	0,015	1,77 x 10^{-8}
698	0,02	2,55 x 10^{-8}
623	0,01	6,66 x 10^{-9}
623	0,015	1,53 x 10^{-8}
623	0,02	2,40 x 10^{-8}

A difusividade mássica apresentou também aumento com o aumento da espessura das fatias de mandacaru. Nguyen e Price (2007) reportam dois efeitos que podem aumentar a remoção de umidade em fatias mais grossas: difusão lateral e endurecimento das placas finas.

Foi assumido pelos autores a transferência de massa unidirecional para a transferência de massa. Porém, diante dos resultados do ajuste de

difusividade efetiva, eles defendem que essa hipótese se mostrou válida apenas para as fatias de bananas de 0,01m de espessura, uma vez que, a depender das dimensões da placa plana, a difusão ocorrerá em mais de uma direção. Desse modo, a espessura de 0,02 m das amostras estudadas foi valor suficiente para apresentar certo grau de difusão pelas laterais.

O outro efeito observado foi o de endurecimento da superfície das fatias de 0,01 m bananas mais rapidamente que aquelas com 0,02 m de espessura, devido a perda da distribuição uniforme de umidade no interior do meio. Esse efeito, segundo os autores, desacelerou a taxa de secagem nas fatias de menor espessura.

Para o mandacaru, aqui objeto de estudo, deve-se levar em consideração que a cutícula que reveste a planta possui características impermeabilizantes a fim de diminuir a sua transpiração. À vista disso, o efeito mais provável para os resultados de D_{eff} das amostras mais grossas, superiores àqueles das amostras mais finas, é o do endurecimento do produto devido à remoção da umidade superficial, uma vez que a cutícula lateral presente nas fatias impede a passagem de água.

Os resultados de difusividade efetiva de umidade do *Cereus jamacaru* variaram entre $6,66 \times 10^{-9}$ e $4,38 \times 10^{-8}$ m^2/s. Esses valores limítrofes estão associados aos experimentos com temperatura da fonte a 623K incidindo radiação sobre uma fatia de 0,01 m de espessura; e 773 K com a amostra de espessura de 0,02 m. Em termos proporcionais, tem-se um aumento de cerca de sete vezes o valor da difusividade efetiva ao se comparar as duas condições.

Nguyen e Price (2007) encontraram valores para a D_{eff} da banana entre 3,2 e $7,8 \times 10^{-10} m^2/s$, para as fatias com 0,01 m de espessura, enquanto que para as amostras de 0,02 m, a difusividade foi avaliada entre 10,8 e 22,7 10^{-10} m^2/s. Os testes foram conduzidos dentro da faixa de temperatura entre 323 e 343 K.

Celma et al. (2008) na avaliação da secagem IV de camadas finas de azeitonas, encontrou difusividades mássicas em ordens de grandeza semelhantes às daqui expostas para o mandacaru. Santos (2018), entretanto, na secagem da casca do fruto do mandacaru, teve como resultados do ajuste da lei de Fick, difusividades de 9,17 x 10^{-11} m^2/s para a temperatura de 323 K; 1,42 x 10^{-10} m^2/s para 333 K; e 2,39 x 10^{-10} m^2/s para 343 K. O fruto apresentou, portanto, uma ação difusional inferior à planta que o gera.

A fim de evidenciar as condições que mais influenciaram no processo de secagem, foi feita uma análise estatística dos resultados experimentais. Como variáveis independentes foram selecionadas a temperatura da fonte IV e a espessura da fatia de mandacaru, e foram verificados os seus efeitos sobre a difusividade mássica efetiva, variável resposta.

A Tabela 6 apresenta a análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5%, que produziu no ajuste um coeficiente de determinação, R^2, igual a 0,961. A partir dos resultados contidos nessa tabela, é possível inferir que os fatores que produzem efeito significativo na difusividade efetiva correspondem aos termos lineares da temperatura e espessura.

O diagrama de Pareto contido na Figura 23 evidencia os resultados da ANOVA. Os efeitos que mais influenciaram na variável resposta são colocados em ordem decrescente, onde a linha vertical vermelha representa um limite, que os distingue daqueles que não são significativos para o processo. Essa linha corresponde ao nível de significância de 5%. A partir do diagrama é possível verificar uma maior influência da espessura na difusividade mássica efetiva. Diante disso, é possível afirmar que a resistência à migração da água livre tem uma maior influência na difusividade, frente à variação de temperatura da fonte IV, para esse processo. Todavia, a variação de 75 K das lâmpadas infravermelho não produzem mesma variação, em módulo, na superfície

do mandacaru, fator esse que pode contribuir para uma minimização dos efeitos da temperatura da fonte.

Tabela 6 – Análise de Variância (ANOVA) dos fatores, temperatura da fonte IV e espessura de mandacaru, na difusividade mássica efetiva.

Fator	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	p
(1) Temperatura (L)	0,000000	1	0,000000	26,13656	0,014481
Temperatura (Q)	0,000000	1	0,000000	2,15578	0,238343
(2) Espessura (L)	0,000000	1	0,000000	42,92542	0,007230
Espessura (Q)	0,000000	1	0,000000	0,55171	0,511495
1L : 2L	0,000000	1	0,000000	1,54357	0,302354
Erro	0,000000	3	0,000000		
Total	0,000000	8			

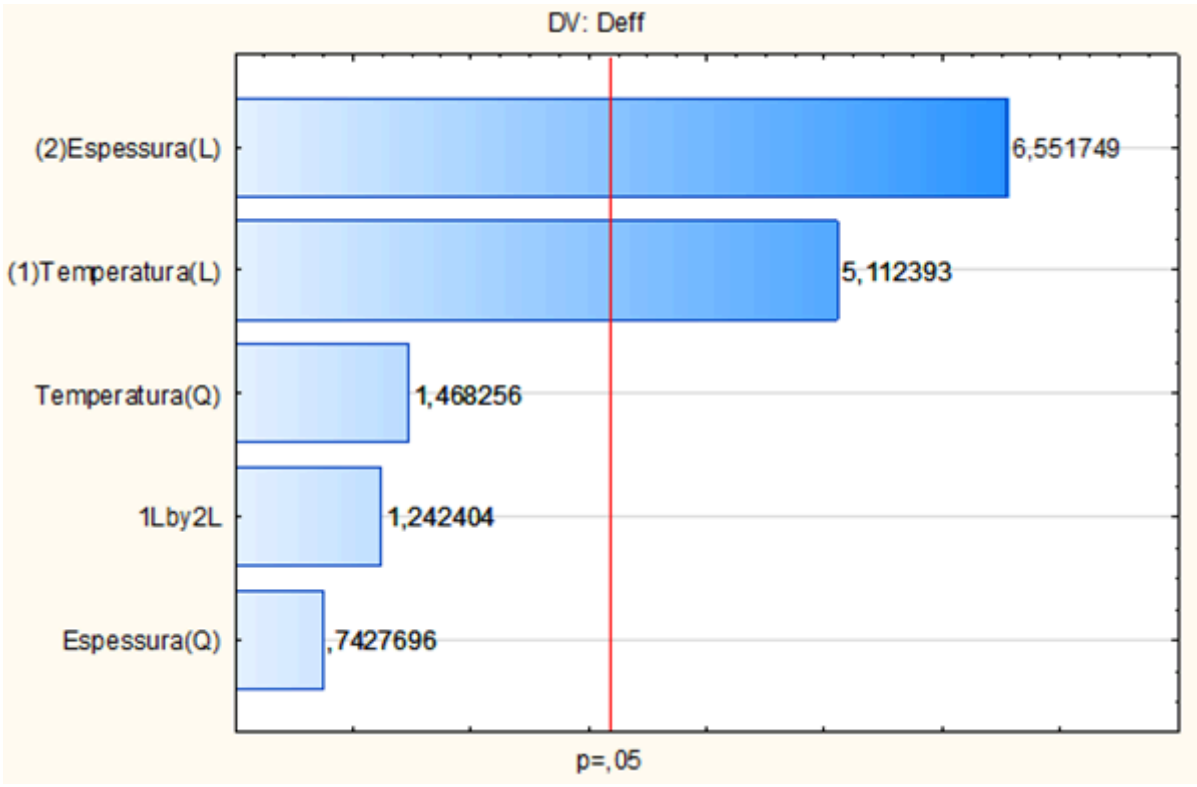


Figura 23 – Diagrama de Pareto para a difusividade mássica efetiva do mandacaru.

Os valores de difusividade mássica efetiva foram correlacionados com a espessura (L) e a temperatura (T) e, usando-se a regressão múltipla determinou-se um modelo polinomial, Equação 13, que exprime a dependência com as duas variáveis independentes.

$$D_{eff} = 3{,}08515 \times 10^{-7} - 8{,}75927 \times 10^{-10}T - 4{,}30456 \times 10^{-6}L \qquad (13)$$

Da interação entre as três incógnitas foi possível ainda produzir, com auxílio do software STATISTICA, superfícies de reposta tri e bidimensionais, representadas nas Figuras 24 e 25. As superfícies de respostas reafirmam a influência das variáveis independentes de forma diretamente proporcional na difusividade efetiva. Tem-se a zona vermelha como a região de maior influência sobre a difusividade mássica, portanto região ótima, pois é onde se tem os maiores valores de D_{eff}, enquanto que as zonas verdes representam o baixo impacto das duas variáveis independentes.

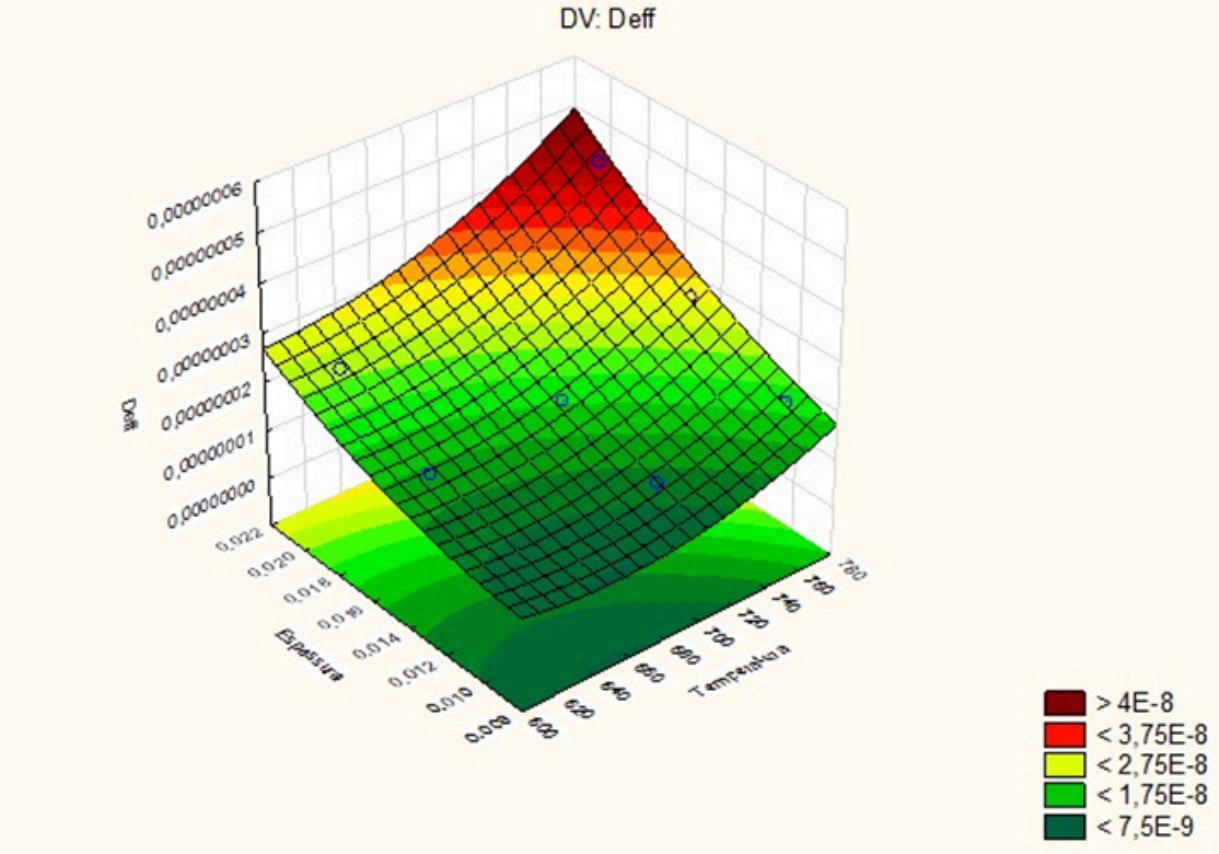


Figura 24 – Superfície de resposta tridimensional para a difusividade efetiva de umidade em função da temperatura da fonte IV e da espessura do mandacaru.

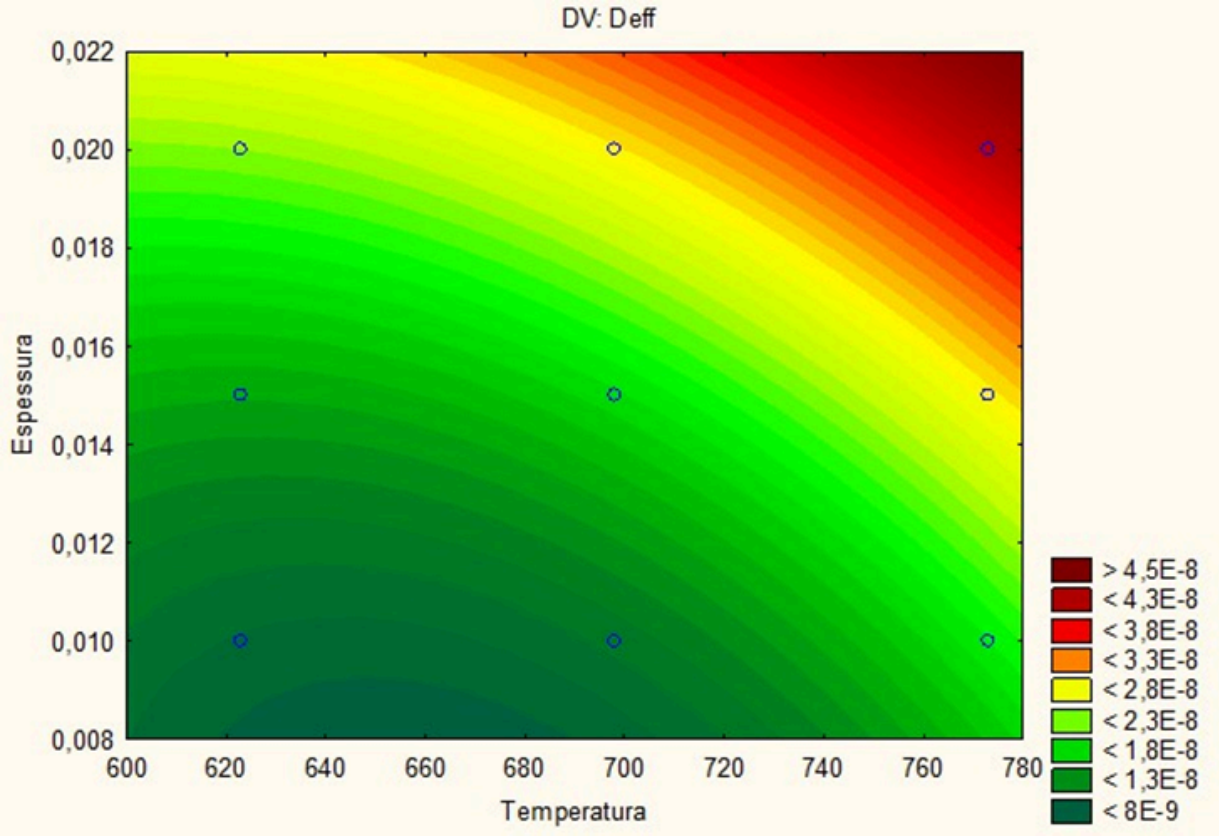


Figura 25 – Superfície de resposta bidimensional para a difusividade efetiva de umidade em função da temperatura da fonte IV e da espessura do mandacaru.

4.4 Parâmetros Termodinâmicos do Processo de Secagem

A partir das difusividades de umidade determinadas, gerou-se o gráfico da Figura 26, que traz a representação de Arrhenius na forma linearizada, Equação 8, relacionando esse coeficiente com as temperaturas empregadas no estudo.

Valores médios de D_{eff} foram adotados em cada temperatura. Como resultado, foi obtido a energia de ativação, E_a , no valor de 16,96 kJ/mol, com R^2 igual a 0,886 e χ^2 igual a 0,026, obtidos no ajuste. O baixo valor para o coeficiente de determinação pode estar associado à propagação de erros ao adotar-se valores médios para temperatura superficial da amostra.

A casca do fruto de mandacaru possui o valor da E_a igual a 44,05 kJ/mol, de acordo com Santos (2018). Esse resultado justifica a planta apresentar valores de difusividade superiores em relação a seu fruto, uma vez que a

energia de ativação é considerada uma barreira a ser atravessada para que o processo de difusão ocorra no produto (KASHANINEJAD et al., 2007).

De acordo com Zogzas et al. (1996) a energia de ativação para produtos agrícolas pode ser encontrada na faixa entre 12,7 a 110 kJ/mol. A energia de ativação do mandacaru aqui determinada é ainda inferior àquelas encontradas para azeitonas, 21,30 kJ/mol (CELMA et al, 2008); folhas de manjericão, 70,79 kJ/mol (REIS et al., 2012); e cenoura, 22,43 kJ/mol (TOGRUL, 2006). Por outro lado, autores como Faria et al. (2012) com seu estudo com sementes de crambe, e Correa et al. (2007) com a secagem de feijão, mostraram que esses dois materiais possuem difusividades maiores que a do mandacaru aqui manejado, uma vez que suas E_a foram de 4,97 e 10,08 kJ/mol, respectivamente.

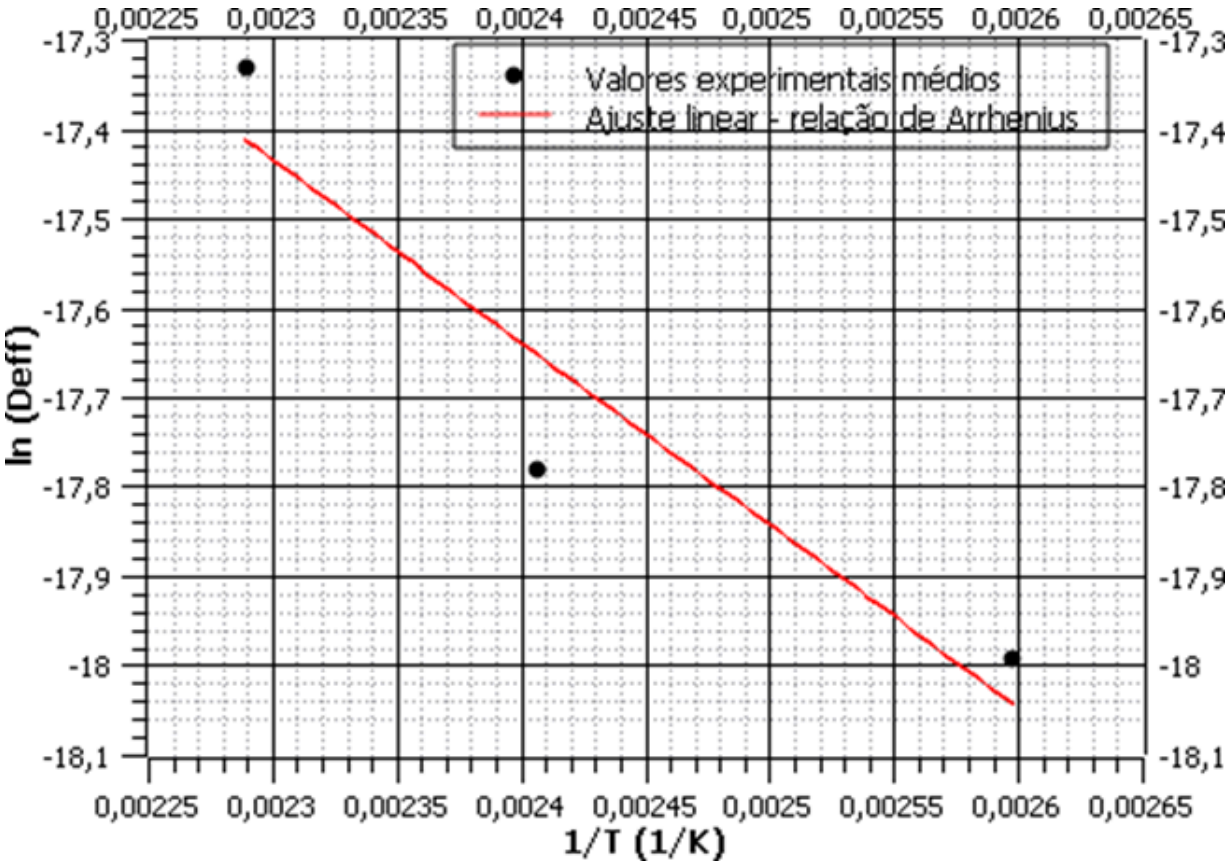


Figura 26 – Representação da dependência da difusividade mássica efetiva do mandacaru com a temperatura, traduzida na equação de Arrhenius linearizada.

Os resultados da linearização permitiram também determinar propriedades termodinâmicas como entalpia, entropia e energia livre de Gibbs, com auxílio das Equações 9, 10 e 11. Na Tabela 7 estão contidos os valores dessas propriedades.

Tabela 7 – Propriedades termodinâmicas do processo de secagem de mandacaru.

$\bar{T}_g$ (K)	Δh (kJ/mol)	Δs (kJ/mol K)	ΔG (kJ/mol)
436,77	13,33	-0,37013	174,99
415,53	13,51	-0,36972	167,14
384,9	13,76	-0,36908	155,82

A entalpia apresentou menores valores nos experimentos conduzidos a temperaturas mais elevadas. Isso se deu por conta do efeito térmico causado pela fonte IV, que ao ter aumentada a sua temperatura, produzirá um aumento na pressão parcial de vapor de água no produto. A energia necessária para retirar a água das amostras é composta pela entalpia de vaporização da água livre e entalpia de vaporização da água no produto (GONELI et al., 2010). O aumento da temperatura da fonte gera uma redução na entalpia de vaporização, resultando em uma menor entalpia do processo difusional da água durante a secagem. Como consequência, tem-se o aumento na velocidade da difusão da água.

Havendo uma transformação em um sistema, alterações na entalpia e entropia geralmente poderão ser identificadas de maneira compensatória, em que quanto mais forte for a interação molecular entre os compostos, conceito relativo à entalpia, menor será a liberdade nos arranjos e disposições das partículas e, portanto, maior a ordem do sistema, que é quantificado pela propriedade entropia (MARCINKOWSKI, 2006). A entropia é uma grandeza que está relacionada proporcionalmente com a quantidade de sítios de sorção disponíveis em um dado nível energético do material biológico (MANDABA et al., 1996).

A sua diminuição com o aumento da temperatura, evidenciada na Tabela 7, está associada à quebra molecular interna e retração de poros durante o processo de secagem, tendo como consequência, a diminuição de sítios ativos para a ligação da água (OLIVEIRA et al., 2009). Moreira et al. (2008) argumenta que os valores negativos podem estar atribuídos à existência de adsorção química e ou modificações estruturais do adsorvente.

O comportamento da energia livre de Gibbs é influenciado pelas propriedades termodinâmicas entalpia e entropia, de forma que quando um sistema apresenta entropia negativa e entalpia positiva, a energia livre de Gibbs será necessariamente positiva, indicativo de um processo não espontâneo (MARCINKOWSKI, 2006). A partir da Tabela 7, nota-se que essa propriedade possui relação direta com a temperatura. Com ela, portanto, é possível quantificar o trabalho necessário para tornar os locais de sorção disponíveis (NKOLO MEZE'E et al., 2008).

As amostras, quando ainda em colheita, encontravam-se incialmente em um ambiente com maior umidade relativa. Ao serem submetidas ao processo de secagem foram expostas a uma região de menor umidade, até que o equilíbrio fosse atingido. Diante disso, os valores positivos são esperados, uma vez que representam a não-espontaneidade do processo de secagem, processo este que exigiu a adição de energia proveniente do meio para transferi-la ao produto a fim de que ocorresse a transformação.

O comportamento dessas três variáveis contidas na Tabela 7 também foi descrito por Martins et al. (2015), que verificou a diminuição das variações de entropia e entalpia com o aumento da temperatura, enquanto que a variação de Gibbs sofreu aumento. Seus valores variaram entre 78,54 e 78,79 kJ/mol para entalpia; -0,1966 e -0,1958 kJ/mol K para entropia; e 140,1081 e 145,9942 kJ/mol para energia livre de Gibbs.

Corrêa J. L. et al. (2010) foram outros autores que observaram os mesmos comportamentos para entalpia, entropia e energia livre de Gibbs com as temperaturas de 308, 318 e 328 K na secagem do café. A variação da

entalpia apresentou valores entre 35,66 e 35,83 kJ/mol. Para a entropia, houve uma variação entre -0,14272 e -0,14220 kJ/mol K. Já para a energia livre de Gibbs, os valores ficaram entre 79,65 e 82,50 kJ/mol.

Para a secagem de fatias de acuri, Santos et al. (2019) verificou valores compreendidos entre 14,63971 e 14,88913 kJ/mol para o Δh. Já para a variação de Gibbs foram apresentados resultados próximos às das fatias de mandacaru, variando entre -0,37472 e -0,37401 kJ/mol K. Para entropia foram encontradas na faixa de 139,49 e 150,72 kJ/mol. Esses resultados foram avaliados nas temperaturas de 333, 343, 353 e 363 K.

4.5 Consumo de Energia Específica

A Tabela 8 traz o comparativo dos dados de consumo de energia específico (CEE) para que fosse atingido 0,1 de umidade em base seca no mandacaru, em cada uma das nove condições operacionais. De maneira geral, os menores consumos estão associados às maiores temperaturas empregadas para a fonte IV e, quando fixada uma temperatura, tem-se que os menores valores de CEE correspondem às condições com espessuras mais finas das amostras. A exceção à essa afirmativa reside nas condições a 773 K e 0,01, e 623 K e 0,02 m.

Tabela 8 – Dados do consumo energético por unidade de massa de água removida e tempos de processo.

Condição Operacional	T_{IV}	Espessura (m)	CEE(kWh/kg)
1	773	0,01	72,57
2	773	0,015	45,47
3	773	0,02	54,95
4	698	0,01	49,48
5	698	0,015	61,10
6	698	0,02	62,35
7	623	0,01	78,45
8	623	0,015	83,60
9	623	0,02	47,80

Junior (2017) ao analisar o CEE da secagem via infravermelho de bagaço de cana-de- açúcar, também constatou a redução do consumo energético em temperaturas mais elevadas. A essa característica do processo ele associou o fato de que apesar de ter sido requerida maior potência da fonte IV, o tempo de secagem sofreu uma redução considerável.

O autor conduziu experimentos a 573, 673 e 773 K submetendo as amostras à radiação infravermelha de maneira intermitente, com velocidades rotacionais do equipamento de 0; 2,5; 3,5 e 5,0 rpm. Dentro da faixa de operação, foram encontrados valores de consumo energético específico entre 62 e 147 kWh/kg de água evaporada. Segundo Junior (2017), pouco foi a influência das velocidades da esteira transportadora no consumo energético do processo, sendo o termo linear da temperatura o fator preponderante.

Lima (2017) também determinou o CEE para a secagem de seu produto de interesse, a banana passa. Em seu trabalho foram comparados os desempenhos de um secador elétrico, um secador solar com exposição indireta, e a secagem solar da banana seguida da secagem no equipamento elétrico. A secagem elétrica apresentou um consumo de energia específica igual a 379,33 kWh/kg de água, conduzida a 318 K, e 225,54 kWh/kg a 328K. O secador solar usado individualmente apresentou o menor consumo observado, 45,83 kWh/kg na mesma temperatura. A secagem mista a 318 K, no entanto, teve um CEE de 295,87 kWh/kg de água.

Analisando-se a equação 12, tem-se uma relação entre potência elétrica do equipamento, tempo de processo e massa de água evaporada, que devem ser balanceados para se obter valores ótimos de CEE. A temperaturas mais elevadas, tem-se maiores valores de tensão e corrente elétrica. Na condição 1, tem-se que a potência requerida e o tempo de duração da secagem foram demasiadamente altos para a quantidade de massa de água removida, e por isso, quando comparada às condições 4 e

7, de mesma espessura, mas de TIV inferiores, tem-se um maior consumo energético específico. O valor de CEE para a condição de número 9, inferior àqueles determinados paras as condições 3 e 6, de mesma espessura, foi resultado do efeito do emprego de menor potência elétrica para evaporar quantidades de água semelhantes.

Observando a condição 2, condição de menor consumo de energia específica, tem-se uma redução de cerca de 45,61% em relação à de maior consumo, condição 8. A condição 7 apresenta cerca de 6,16%, o menor valor de redução frente a todas as outras condições operacionais.

Através da análise de variância ANOVA, e do diagrama de Pareto, verificou-se que apenas o termo linear da temperatura exerce influência significativa sobre os valores de CEE, de forma que o aumento da temperatura reduz o consumo de energia específica. As superfícies de respostas bi e tridimensionais permitiram ainda observar a relação funcional estre as três variáveis, nas quais é apresentado um comportamento do tipo sela na vizinhança da temperatura de 600 K. Não foi possível obter-se uma equação polinomial descritiva a partir do software STATISTICA para exprimir tal relação entre as variáveis. Os resultados mencionados estão dispostos na Tabela 9 e Figuras 27-29, com coeficiente de determinação igual a 0,920.

Tabela 9 – Análise de Variância (ANOVA) dos fatores, temperatura da fonte IV e espessura de mandacaru, no consumo de energia específica do processo.

Fator	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	p
(1) Temperatura (L)	1244,160	1	1244,160	30,43720	0,011728
Temperatura (Q)	75,973	1	75,973	1,85862	0,266081
(2) Espessura (L)	33,323	1	33,323	0,81522	0,433133
Espessura (Q)	12,070	1	12,070	0,29529	0,624628
1L : 2L	42,445	1	42,445	1,03838	0,383216
Erro	122,629	3	40,876		
Total	1530,601	8			

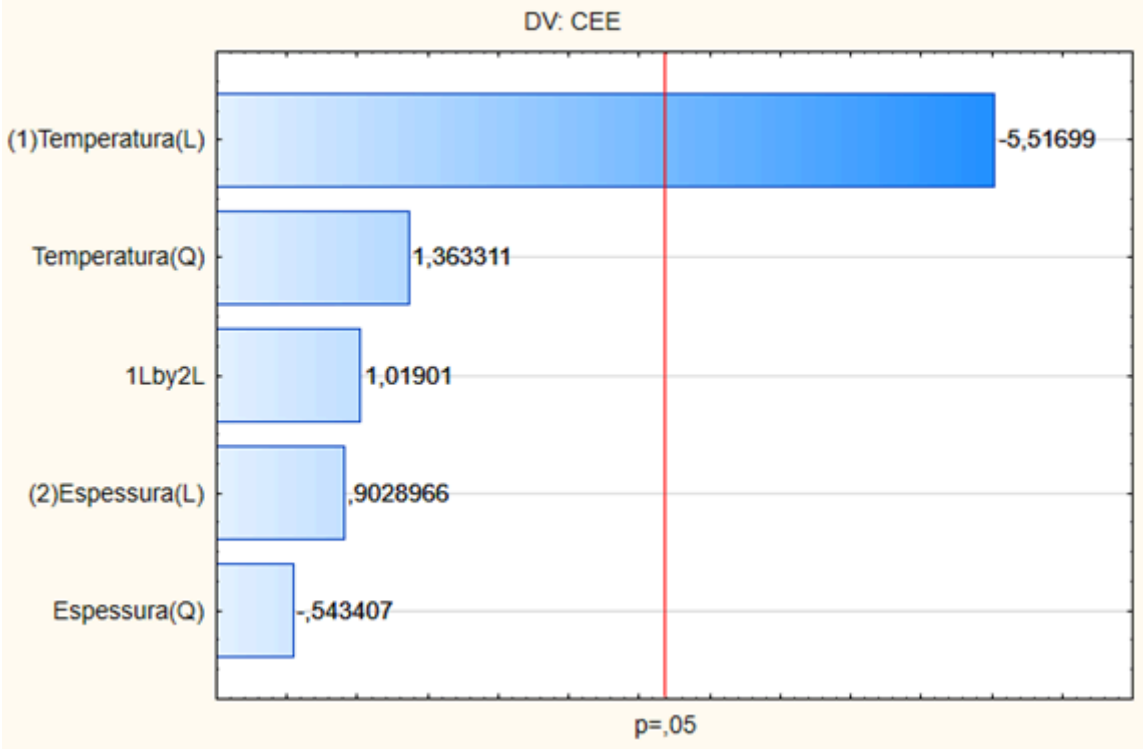


Figura 27 – Diagrama de Pareto para o consumo energético específico (CEE) do mandacaru.

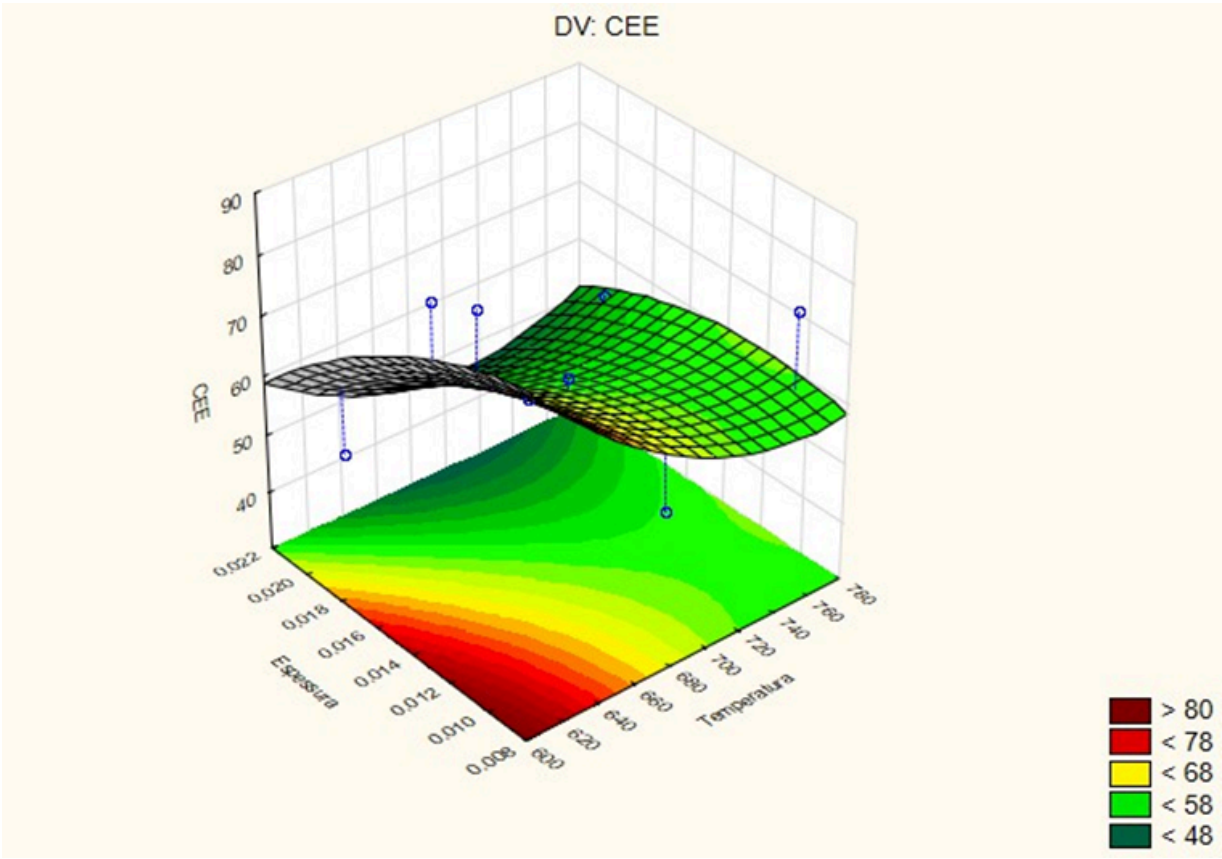


Figura 28 – Superfície de resposta tridimensional para o consumo de energia específica (CEE) de umidade em função da temperatura da fonte IV e da espessura do mandacaru.

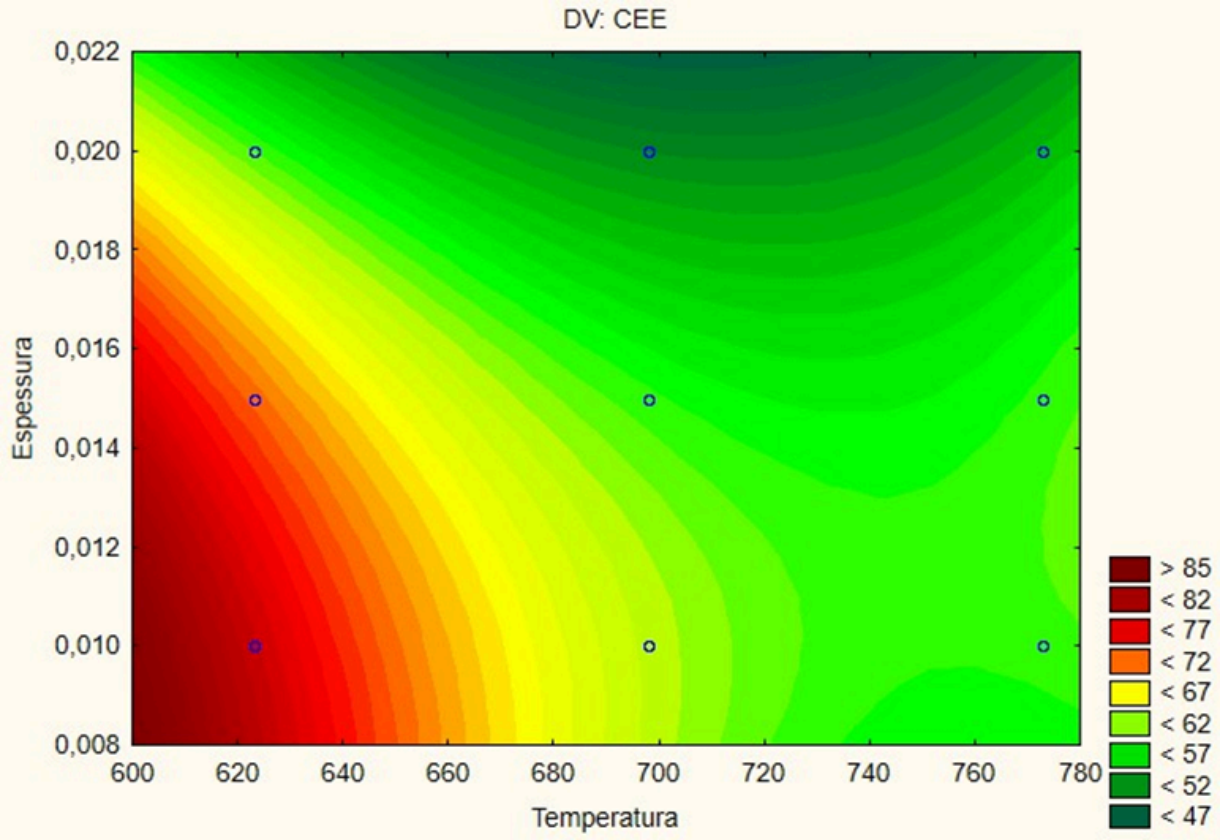


Figura 29 – Superfície de resposta bidimensional para o consumo de energia específica (CEE) de umidade em função da temperatura da fonte IV e da espessura do mandacaru.

5. CONCLUSÃO

Diante da relevância que a operação unitária secagem possui nos processos produtivos do setor agroindustrial, para que sejam obtidos produtos agrícolas com maior valor agregado, o estudo da técnica de remoção de umidade através da incidência de radiação infravermelho apresentado nesse trabalho, fornece informações úteis para a aplicação da secagem com mandacaru, que poderão ser utilizadas para o dimensionamento de novos secadores, além da criação de condições mais favoráveis para o desenvolvimento da técnica.

Foram conduzidos experimentos submetendo as fatias de mandacaru de 0,010; 0,015 e 0,020 m de espessura a 773, 698 e 623 K. A intensificação da transferência de massa na secagem IV de fatias da cactácea foi obtida ao se empregar maiores temperaturas da fonte e utilizar menores espessuras da amostra. Temperaturas da fonte mais elevadas contribuem para uma redução da viscosidade da água no interior do meio, além de aumentar a

energia vibracional e gerar uma maior atividade entre as moléculas de água que, em conjunto, favorecem a migração de umidade através dos capilares. O aumento da espessura, no entanto, resulta em um aumento da resistência ao transporte de água livre para a superfície.

Os dados cinéticos foram ajustados com a 2ª lei de Fick modificada e com outras sete equações empíricas e semiempíricas. O modelo matemático de Midilli et al. foi o que apresentou a maior adequação aos dados cinéticos experimentais dentre todos os comparados, com altos valores de R^2 e baixos valores de χ^2. Através da lei da difusão de Fick, a difusividade mássica efetiva foi determinada para cada condição operacional, com valores entre 6,66 x 10^{-9} e 4,38 x 10^{-8} m^2/s. Os valores limítrofes estão associados, de maneira respectiva, às condições conduzidas a 773 K e 0,02 m, e 623 K e 0,01 m.

A partir das difusividades e das condições de processo foi possível aplicar a análise estatística ANOVA, além da construção do diagrama de Pareto e superfícies de resposta, a fim de evidenciar as dependências com a temperatura da fonte IV e espessura da amostra. Os resultados evidenciaram a alta influência dos termos lineares da temperatura e espessura na difusividade efetiva de umidade, sendo a espessura a variável com maior influência. Esse comportamento provavelmente está associado ao maior impacto dos efeitos resistivos à transferência de massa, ao ter-se a espessura aumentada, frente ao favorecimento da difusão com a elevação da temperatura da fonte IV, uma vez que, apesar da variação de 75 K na fonte, não foi notada mesma variação na temperatura superficial das fatias e, dessa forma, o valor máximo do gradiente de temperatura resultante da elevação de 75 K não pode ser explorado pelo produto. A difusividade mássica como função da temperatura da fonte e espessura da amostra foi descrita ainda na forma de uma equação polinomial.

Os parâmetros termodinâmicos contribuíram para a interpretação da secagem. A energia de ativação permitiu identificar qual seria a energia

mínima necessária para que o processo difusional no produto pudesse ocorrer, sendo seu valor igual a 16,96 kJ/mol. A variação de entalpia quantificou a energia a ser removida do sistema na forma de calor de vaporização. Seus valores ficaram compreendidos entre 13,33 e 13,76 kJ/mol. A entropia apresentou uma redução com o aumento da fonte IV, devido à diminuição de sítios ativos para a ligação da água. Essa grandeza apresentou valores entre -0,37013 e -0,36908 kJ/mol K. A energia livre de Gibbs permitiu constatar a não-espontaneidade do processo de remoção da água do mandacaru. Seus valores foram obtidos entre 155,82 e 174,99 kJ/mol.

O consumo energético específico demonstrou ser influenciado significativamente apenas do termo linear da temperatura da fonte infravermelho, de forma inversamente proporcional. Apesar do aumento da potência da fonte de radiação IV, houve redução do CEE por conta da contribuição dos efeitos térmicos na difusividade da amostra, tendo como consequência uma secagem até a umidade 0,1 b.s. em um menor tempo. Das nove condições analisadas, a de menor consumo foi conduzida a 773 K e 0,015 m de espessura, apresentando uma redução de 45,61% quando comparada com a de maior consumo a 623 K e 0,015m.

Os resultados aqui expostos apresentaram consonância com a literatura. No entanto, é válido novas investigações em condições operacionais distintas, uma vez que as espessuras aqui apresentaram 0,005 m de diferença, e as temperaturas da fonte IV, 75 K. Essa indicação é para a constatação de que não há pontos de máximo e/ou mínimos locais e/ou globais distintos dos aqui apresentados nas superfícies de resposta.

Outra alternativa seria adicionar ao estudo novas variáveis independentes para avaliar o seu efeito na difusividade mássica efetiva, como por exemplo, a distância da fonte IV em relação a amostra. Além disso, poderá ser buscada a otimização da técnica aqui descrita, através do emprego da rotação do equipamento para criar uma exposição às lâmpadas IV de forma intermitente, o que permite a redistribuição da umidade, ou até

através de pré-tratamentos como a desidratação prévia através do princípio da osmose ou com ondas ultrassônicas incididas na amostra, para que microcanais possam ser formados com a finalidade de aumentar a taxa de migração da água livre.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil: Parte II – Fontes renováveis**. Aneel: 2ª edição, 2016.

AKPINAR, E. K.; BICER, Y. Modelling of the drying of eggplants in thin-layers. **International Journal of Food Science and Technology**, v.40, n.3, p.1-9, 2005.

AKTAS, M.; SEVIK, S.; AKTEKELI, B. **Development of heat pump and infrared convective dryer and performance analysis for stale bread drying**. Energy conversion and Management, v. 133, 2016.

ANDRADE, C.T.S.; MARQUES, J.G.W; ZAPPI, D.C. Utilização medicinal de cactáceas por sertanejos baianos. **Rev. Bras**. Pl. Med., Botucatu, v.8, n.3, p.36-42, 2006.

ASHTIANI, S-H. M; SALARIKIA, A; GOLZARIAN, M. R; Analyzing drying characteristics and modeling of thin layers of peppermint leaves under hot-air and infrared treatments. **Information Processing In Agriculture**, v.4, p. 128-139, 2017.

AZAM, S. M. R.; ZHANG, M.; LAW, C. L.; MUJUMDAR, A. S. Effects of drying methods on quality attributes of peach (*Prunus pérsica*) leather. **Drying Technology, An International Journal**, vol 37, Issue 3: Special issue dedicated to selected papers from ADC. 2019.

BERBERT, P. A.; QUEIROZ, D. M.; SILVA, J. S.; PINHEIRO FILHO, J. B. Simulation of coffe drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.60, p.167-73, 1995.

BROD, F.P.R., ALONSO, L.F.T., PARK, K.J. **Secagem de produtos agrícolas**. XI SEMEAGRI Semana de Engenharia Agrícola da Unicamp. Campinas: Agrológica Empresa Júnior de Eng. Agrícola.1999.

CACURO, T. A.; WALDMAN, W. R. Cinzas da Queima de Biomassa: Aplicações e Potencialidades. **Revista Virtual de Química**, vol 7, 2015.

CAVALCANTI, N. B.; RESENDE, G. M. Plantas nativas da caatinga utilizadas pelos pequenos agricultores para alimentação dos animais na seca. In.: CONGRESSO NORDESTINO DE PRODUÇÃO ANIMAL, 3. Campina Grande. **Anais**... Campina Grande, PE: Sociedade Nordestina de Produção Animal. 2004. CD-ROM.

CARMO, T.N.; LUCAS, F.C.A.; LOBATO, G.J.M.; GURGEL,E.S.C.Plantas medicinais e ritualísticas comercializadas na feira da 25 de setembro, Belém, Pará. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer -Goiânia, v.11 n.21; p. 2015

CAVALCANTI, B. N.; RESENDE, G. M. Consumo do mandacaru (Cereus jamacaru p. dc.) por caprinos na época da seca no semi-árido de Pernambuco. **Revista Caatinga**, v. 19, n. 4, p. 402-408, 2006.

CELMA, A. R.; ROJAS, S.; LOPEZ-RODRIGUEZ, F. Mathematical modelling of thin-layer infrared drying of wet olive husk. **Chemical Enginerring and Processing: Process Intensification**. Vol 47, Issues 9-10, p 1810-1818. Setembro, 2008.

CORREA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A. P.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de Secagem do feijão (Phaseolus vulgaris L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, v.27, p.501-510, 2007.

CORREA, J. L. G.; PEREIRA, L. M.; VIEIRA, G. S.; HUBINGER, M. D. Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas.

Journal of Food Engineering, v.96, n. 4, p.498–50. 2010. Revista Ceres, Viçosa, vol. 57, n° 5, p. 595-601, setembrom/outubro, 2010.

CORREA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BOTELHO, F. M.; GONELI, A. L. D.; CARVALHO, F. M. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (Coffea arábica L.) durante o processo de secagem.

COSTA, K. J. B. **Utilização do mandacaru (Cereus jamacaru) como biomassa adsorvente de gasolina presente em corpos d'água**. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2014.

CRANK, J. (1975), **Mathematics of Diffusion**, 2 nd edn., Oxford University Press, London.

ÇENGEL, Y.A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e Massa – Uma abordagem Integrada**.4 ed. Brasil:Amgh Editora, 2012.

DANTAS, J. I. M.; OLIVEIRA, M. G. B. Versatilidade no uso medicina de mandacaru (*Cereus jamacaru*). **Diversitas Journal**. Volume 4, Número 2, pp: 884-892. Agosto, 2019.

DAVET, A.. **Estudo Fitoquímico e Biológico do Cacto – Cereus Jamacaru De Candolle, Cactaceae**. 2005. Tese (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba.

DOYMAZ, I.; KIPCAK, A. S.; PISKIN, S. Characteristics of Thing-layer infrared drying of green beans. **Czech J. Food Sci**., 33: 83-90. 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISAS AGROPECUÁRIAS. **Documento 276** – Embrapa Cerrados, Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento; Princípios de secagem dos alimentos. Planaltina –DF, 2010.

EMBRAPA – Empresa Brasileira De Pesquisas Agropecuárias. Documento: **Germinação de Sementes de Cactáceas In Vitro**. Fortaleza: EMBRAPA, dezembro, 2011.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. [on line]. Disponível na internet via www url: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2489392/prosa-rural— plantio-de-mandacaru-para-alimentacao-animal. Acesso em 06 de fevereiro de 2021.

EVANGELISTA J. **Princípios de tecnologia de alimentos**. São Paulo: Atheneu, 1984.

FARIA, R. Q.; TEIXEIRA, I. R.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R.; RESENDE, O. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 16, nº 5, Campina Grande, maio, 2012.

FERRAZ. **Entendendo o processo de secagem**. [on line]. Disponível na internet via www url: <http://www.ferrazmaquinas.com.br/conteudo/entendendo-o-processo-da-secagem-luiz- gomide.html>. Acesso em 02/02/2021.

GARDUSI, F. MENDES, L. G., NOGUEIRA, G. D. R., SILVA, D. I. S., BARROZO, M. A. S.. **Secagem da casca da mexerica por irradiação infravermelha e comparação dos compostos bioativos desta in natura e após a secagem**. X Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Vol 1, num. 1. dezembro, 2014.

GAVA, A. J. **Princípios de tecnologia de alimentos**. São Paulo: Nobel, 1984. 284 f.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H.; BOTELHO, F.M. Water desorption and thermodynamic properties of okra seeds. Transactions of the ASAE, 53:191-197. 2010.

GOUVEIA, P.G.J; MOURA, R.S.F.; ALMEIDA, F.A.C.; OLIVEIRA, A.M.V.O.; SILVA, M.M. Avaliação da cinética de secagem de caju mediante um planejamento experimental. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.3, p.471-474, 2002.

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

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory. T. Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agriculture Engineering Research**, v.6, n.3 p.1 69- 1 74, 1961.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P; BERGMAN, T. L. LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**; tradução e revisão técnica Eduardo Mach Queiroz, Fernando Luiz Pellegrini Pessoa – Rio de Janeiro: LTC, 2008.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz. v. 1: Métodos químicos e físicos para análise de alimentos**, 4. ed. São Paulo: IMESP, 2005. p. 98-99.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE, ICMBio (Brasil). **Plano de ação Nacional para a conservação das cactáceas: Séries Espécies Ameaçadas nº 24**. Brasília: ICMBio, 2011.

JUNIOR, J. A. S. **Desenvolvimento de um secador tipo esteira circular assistido por aquecimento infravermelho para a secagem de bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2017.

KASHANINEJAD, M. et al. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v.78, n.1, p.98-108, 2007.

LECHTANSKA, J. M.; SZADZINSKA, J.; KOWALSKI, S.J. **Microwave- and infrared-** assisted convective drying of green pepper: Quality and energy considerations, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, v. 98, 2015.

LIMA, E. E.; ROSSANA, FIGUEIREDO, M. S.; QUEIROZ, A. J. M.; Cinética de secagem de polpa de facheiro. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.9, n. 1, p. 1 7-28, 2007.

LIMA, J.L.S. DE. **Plantas forrageiras das caatingas – usos e potencialidades**. Petrolina, EMBRAPA-CPATSA, PNE, RBGKEW, 37p, 1996.

LIMA, R. C. F.; PEIXOTO, E. Z. H; SARAIVA, S. H. Cinética de secagem do mamão formosa em secador de leito fixo. V Semana de Engenharia Química, UFES, 2016.

LIMA, W. S. **Análises de sistemas de secagem: solar, elétrico e misto na produção de banana passa**. Tese de Doutorado – Curso de Doutorado em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – Paraíba, março de 2017.

LOPES, J. A. **O mandacaru e sua utilização como material expressivo e alternativo renovável no design e na arte**. 2016. 114 f. Dissertação (Mestrado em Artes Visuais) – Programa de pós graduação em Artes Visuais, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil, 2016.

LUCENA, C.M.; COSTA, G.G.S.; CARVALHO, T.K.N.; GERRA, N.M.; QUIRINO, Z.G.M.;

LUCENA, R.F.P. Uso e conhecimento de cactáceas no município de sãomamede (Paraíba, Nordeste do Brasil). **Revista de Biologia e Farmácia**,2012

LUCENA, T. K. P.; SOUZA, R. N. S.; TAVARES, D. L.; SILVA, A. A. D. Sabores De Nossa Terra: Uma Abordagem Ecológica E Nutricional De Mandacaru

(Cereus Jamacaru) E De Palma Forageira (Opuntia Ficus-Indica) Em Âmbito Escolar. I *Congresso Internacional Da Diversidade Do Semiárido – CONIDIS.* Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2016.

L'OCCITANE – L'OCCITANE AU BRÉSIL. Mandacaru. [on line]. Disponível na internet via www url: <https://br.loccitaneaubresil.com/collection/mandacaru/>. Acesso em: 14/02/2021.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. Enthalpy-entropy compensation models for sorption and browning of garlic. **Journal of Food Engineering**, v. 28, n. 2, p. 109- 119, 1996.

MARCINKOWSKI, E. A. **Estudo da cinética de secagem, curvas de sorção e predição de propriedades termodinâmicas da proteína texturizada de soja**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

MARTINAZZO, A. P.; CORREA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. C. M. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engeharia Agrícola e Ambiental**, vol. 11, nº 3. Campina Grande, junho, 2007.

MARTINS, E. A. S.; LAGE, E. Z.; GONELI, A. L. D.; FILHO, C. P. H.; LOPES, J. G. Cinética de secagem de folhas de timbó (Serjania marginata Casar). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 19, nº 3, p 238-244, Campina Grande, 2015.

McCABE, W.L., SMITH, J.C., HARRIOT, T.P. (1993), **Unit Operations of Chemical Engineering**, 5th edition. McGraw-Hill International Editions.

MEIADO, M. V.; ALBUQUERQUE, L. S. C.; ROCHA, E. A.; ROJAS-ARÉCHIGA M.; LEAL, I. R. **Seed germination responses of Cereus jamacaru D.C. ssp.**

jamacaru (Cactaceae) to environmental factors. Plant Species Biology, v. 25, n. 2, p. 120-128, 2010.

MIDILLI, A.; Kucuk, H.; Vapar, Z. **A new model for single-layer drying. Drying Technology**, v.20, n.7, p.1503-1513, 2002.

MIURA, A. K.; FORMAGGIO, A. R.; SHUIMABUKURO, Y. E.; ANJOS, S. D.; LUIZ, A. J. B. Avaliação de áreas potenciais ao cultivo de biomassa para produção de energia e uma contribuição de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas. **Engenharia Agrícola**, vol. 31, nº 3, Jaboticabal, junho de 2011.

MOREIRA R.; CHENLO, F.; TORRES, M.D.; VALLEJO, N. Thermodynamic analysis of experimental sorption isotherms of loquat and quince fruits. **Journal of Food Engineering**, 88:514-521. 2008.

MORESCHI, J. C. **Relação água-madeira e sua secagem**. Apostila 2ª edição: Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR. Novembro, 2014.

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

NASCIMENTO, V. R. G.; BIAGI, J. D.; OLIVEIRA, R. A. Modelagem matemática da secagem convectiva com radiação infravermelha de grãos de *Moringa oleifera*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol 19, nº 7, Campina Grande. Julho, 2015.

NASCIMENTO, V. R. G. **Secagem convectiva e com radiação infravermelha de grãos de *Moringa oleifera Lam***. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, Campinas – São Paulo, 2014.

NETO, A. M. B.; LIMA, J. O.; MARQUES, L. G.; PRADO, M. M. Secagem infravermelho de caroços de açaí para a obtenção de biomassa. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Florianópolis, Santa Catarina, 2014.

NGUYEN, M.H.; PRICE, W.E. Air-drying of banana: Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. **Journal of Food Engineering**, v.79, n.1, p.200-207, 2007.

NOBREGA, F. A.; SOUSA, F. R. R.; FILHO, J. R. L. P.; ALMEIDA, M. S.; ALMEIDA, A. P. A. Desenvolvimento de um sistema de potabilização de água utilizando sementes de umbu e extrato de mandacaru. *II Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido – CONIDIS*, 2017.

NOWAK, D.; LEWICKI, P. P. Infrared drying of apple slices. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**. Vol 5, Issue 3, p 353-360, setembro, 2004.

OLIVEIRA, W.P.; FREITAS, L.A.P.; FREIRE, J.T. Secagem de Produtos Farmacêuticos (IN PRESS). In: Freire, J.T.; Silveira, A.M. (Org.). **Fenômenos de transporte em sistemas particulados: fundamentos e aplicações**. São Carlos – SP: Suprema, 2009, p. 307-343.

OLIVEIRA, F.I.P. **Estudo do processo de produção de jambo desidratado sob aplicação de ultra-som**. 2010, 91f. Dissertação (mestrado), Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

OLIVEIRA, F. I. P. **Influência do pré-tratamento ultrassom e desidratação osmótica na secagem, cor, textura e enzimas do mamão formosa**. Tese de doutorado – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

O'CALLAGHAN, J. R.; MENZIES, D. J.; BAILEY, P. H. Digital simulation of agricultural dryer performance. **Journal of Agricultural Engineering**

Research, v.16, n.3, p. 223-244. 1971.

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**. Indiana: Purdue University, 1949. M. Sc. Thesis.

PINTO, M. P. **Desenvolvimento do sorvete à base de polpa de mandacaru e xiquexique**. 2017. 46 f. TCC (Graduação) – Curso de Tecnologia em Gastronomia, Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Piauí – Campus Teresina Zona Sul, Teresina, 2017.

RATTI, C.; MUJUMDAR, A. S. Simulation of packed bed drying of food stufs with airflow reversal. **Journal of Food Engineering.** v. 26, p. 259-271. 1995.

REIS, C. DOS R.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R.; SERVULO, A. C. O.; SOUZA, A. B. M. Cinética de secagem de folhas de manjericão (Ocimum basilicum L.) via infravermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol 16, no12. Print version ISSN 1415-4366. Campina Grande, dezembro, 2012.

REMADE. **Madeiras: Manejo – Secagem**. Disponível em: <http://www.remade.com.br/madeiras/14/manejo/secagem>. Acesso em: 26/04/2020.

RIADH, M. H.; AHMAD, S. A. B.; MARHABAN, M. H.; SOH, A. C. Infrared Heating in Food Drying: An Overview. Drying Technology, An International Journal, vol 33, Issue 3, 2015.

RUHANIAN, S.; MOVAGHARNEJAD, K. **Mathematical modeling and experimental analysis of potato thin-layer drying in an infrared-convective dryer**. Engineering in Agriculture, Environmentand Food. v. 9, p. 84-91, 2016.

SANDU, C. **Infrared Radiative Drying in Food Engineering: A process Analysis. Biotechnology Progress**. v. 2, n. 3,1986.

SANTOS, I. A. **Compostos fenólicos totais e atividade antioxidante da casca do fruto do mandacaru (*Cereus jamacaru*) em pó obtido em secador de leito fixo**. Dissertação – Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande – Campus Campina Grande, Paraíba, 2018.

SANTOS, D. C., LEITE, D. D. F., LISBÔA, J. F., FERREIRA, J. P. L., SANTOS, F. S., LIMA, T. L. B., Figueiredo, R. M. F., & Costa, T. N. (2019). Modelling and thermodynamic properties of the drying of acuri slices. **Brazilian Journal of Food Technology**, *22*, e2018031. https://doi.org/10.1590/1981-6723.03118

SILVA, A. S.; MELO, K. S.; ALVES, N. M. C.; GOMES, J. P. Cinética de secagem em cada fina da banana maça em secador de leito fixo. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, vol 9, nº 2 – 2º semestre, 2009.

SILVA, J. G .M; LIMA,G. F. C.; AGUIAR, E. M.; MELO, A. A. S.; RÊGO, M. M. T. Cactáceas nativas associadas a fenos de flor de seda e sabiá na alimentação de borregos. **Revista Caatinga**, v. 23, n. 3, p. 123-129, 2010.

SILVA, C.G.; MARINHO, M.G.V.; LUCENA, M.F.A.; COSTA, J.G.M. Levantamento etnobotânico de plantasmedicinais em área de Caatinga na comunidade do Sítio Nazaré, município de Milagres, Ceará, Brasil. **Rev. Bras**. Pl. Med., Campinas, v.17, n.1, p.133-142, 2015.

SILVA, P. B.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S.. **Dehydration of acerola residue in a new designed Rotary dryer: Effect of process variables on main bioactive compounds. Food and Bioproducts Processing**, v. 98, p. 62- 70, 2016.

SILVA, M. P.; SALVADOR, A. T.; SGORLON, J. G.; GOMES, M. C. S.; MENEZES, M. L. Determinação da difusividade efetiva e da energia de ativação de sementes de uva bordô. *Congresso Braileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica*. UFSCar, São Carlos, SP. 16-19 jul. 2017.

SILVA, L. M. Q. **Avaliação do potencial de cactáceas para aplicações em processos biotecnológicos**. Trabalho de conclusão de curso – Engenharia de biotecnologia e bioprocessos da Universidade Federal de Campina Grande. Sumé – Paraíba, 2019.

SKJOLDEBRAND, C. **Cooking by infrared radiation. In: Proceedings from Progress in Food Preparation Process**. Swedish Institute for Food and Biotechnology, Gothenburg, p. 157-173. 1986.

TAYLOR, N.; ZAPPI, D. **Cacti of eastern Brazil**. Kew: Royal Botanic Gardens, 2004.

TEIXEIRA, S.A.; MELO, J.I.M. **Plantas medicinais utilizadas no município de Jupi, Pernambuco**, Brasil. Iheringia, Sér. Bot., Porto Alegre, v. 61, n. 1-2, p. 5-11, jan./dez. 2006.

TOGRUL, H. Suitable drying model for infrared drying of carrot. **Journal of Food Enginerring**. Vol 77, Issue 3, p 610-619. Dezembro, 2006.

TOGRUL I.T., PEHLIVAN D. (2004): Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. **Journal of Food Engineering**, 65: 413–425.

WALLACE, R. S. **Molecular systematic study of the Cactaceae: using chloroplast DNA variation to elucidate cactus phylogeny**. Bradleya,v.13, p. 1-12, 1995.

WANG, J.; SHENG, K. Far-infrared and microwave drying of peach. **LWT – Food Science and Technology**. Vol 39, Issue 3, p 247-255. Abril, 2006.

WANG, Q.; LI, S.; HAN, X.; NI, Y.; ZHAO, D.; HAO, J. Quality evaluation and drying kinetics of shitake mushrooms dried by hot air, infrared and intermitente microwave-assisted drying methods. **LWT**, vol 107, p 236-242, junho, 2019.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. **Transactions of the ASAE**, v.78, n.6, p.6505, 1978.

WILLIAMS-GARDNER, A. Industrial **Drying. Chemical and Process Engineering Series, I.L**. Hepner (series ed.), London: Leonard Hill. 1971.

ZARA, R. F. THOMAZINI, M. H. LENZ, G. F. Estudo da eficiência de polímero natural extraído do cacto mandacaru (*Cereus jamacaru*) como auxiliar nos processos de coagulação e floculação no tratamento de água. **Revista de Estudos ambientais**. 2012.

ZHENG, D. J.; CHENG, Y. Q.; LIU, H. J.; LI, L. T. Investigation of EHD-enhanced water evaporation and novel empirical model, **International Journal Food Engineering,** v. 7, n. 2, 2011.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, v.14, p.2225- 2253, 1996. http://dx.doi.org/10.1080/07373939608917205.

Currículo do autor

← Post anterior

livre. Leia gratuitamente todos os artigos e publique o seu também clicando aqui.



(11) 98597-3405
e-Mail: contato@revistaft.com.br
ISSN: 1678-0817
CNPJ: 48.728.404/0001-22

FI= 5.397 (muito alto)
Fator de impacto é um método bibliométrico para avaliar a importância de periódicos científicos em suas respectivas áreas. Uma medida que reflete o número médio de citações de artigos científicos publicados em determinado periódico, criado por Eugene Garfield, em que os de maior FI são considerados

Dr. João Marcelo Gigliotti.
Editor Científico:
Dr. Oston de Lacerda Mendes
Orientadoras:
Dra. Hevellyn Andrade Monteiro
Dra. Chimene Kuhn Nobre

Revisores:
Lista atualizada periodicamente em revistaft.com.br/expediente Venha fazer parte de nosso time de revisores também!

mais
importantes.

Copyright © Revista ft Ltda. 1996 - 2024

Rua José Linhares, 134 - Leblon | Rio de Janeiro-RJ | Brasil