

UNIVERSIDADE TÉCNOLOGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ALIMENTOS E ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

JAMAL BASAM HARATI

**ESTUDO DA SECAGEM DO RESÍDUO DO LIMÃO TAHITI (*Citrus latifolia*
TANAKA)**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2021

JAMAL BASAM HARATI

**ESTUDO DA SECAGEM DO RESÍDUO DO LIMÃO TAHITI (*Citrus latifolia*
TANAKA)**

Trabalho de conclusão de curso de graduação,
apresentado à disciplina de Trabalho de
Conclusão de Curso II, do Curso Engenharia
de Alimentos, do Departamento Acadêmico de
Alimentos e Engenharia Química (DAAEQ) –
da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná –
UTFPR, como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro de
Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Bogdan Demczuk
Junior

CAMPO MOURÃO

2021

TERMO DE APROVAÇÃO

ESTUDO DA SECAGEM DO RESÍDUO DO LIMÃO TAHITI (*Citrus latifolia* TANAKA)

por

Jamal Basam Harati

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado no dia 3 de maio de 2021 como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Bogdan Demczuk Jr

Mirela Vanin dos Santos Lima

Fábio Henrique Poliseli Scopel

Nota: O documento original e assinado pela banca examinadora encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia de Alimentos da UTFPR campus Campo Mourão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me guiado até aqui, com toda sua proteção e bênção. Aos meus pais, Basam Harati e Khouloud Youssef Sayed e meu irmão, Tarek Harati, por todo suporte, auxílio, conselhos e sermões, pois sem eles eu não estaria aqui.

Aos meus amigos que fiz em Campo Mourão que conviveram comigo durante todo este período. Onde passamos bons e maus momentos sem nunca perder a alegria, principalmente ao Julio Jose Mokarzel Biffi, Giovanna Yasmin Mokarzel Biffi, Jonata Massao Ueda, João Paulo Passarini e Iran Bassi.

Ao meu orientador Professor Dr. Bogdan Demczuk Junior, pela paciência, dedicação, profissionalismo e confiança que tornou a elaboração deste estudo possível e também uma construção de uma amizade sólida, meus sinceros agradecimentos. Não esquecendo o Professor Lucas Ricken Garcia do Departamento de Engenharia Eletrônica (DAELN) que colaborou e disponibilizou o aparato para análise da difusividade térmica no presente trabalho.

Aos professores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná *Campus* Campo Mourão, agradeço pela contribuição para minha formação acadêmica. Agradeço a todos que de uma maneira ou de outra contribuíram para que minha caminhada fosse possível. Obrigado.

RESUMO

Nos últimos anos, o Brasil ampliou sua produção de frutas cítricas, em específico a plantação do limão tahiti (*Citrus latifolia* Tanaka), por possuir um potencial econômico, em quesitos industriais para produção de sucos concentrados ou exportação para Europa. Uma alternativa para os resíduos gerados pela indústria, seria a secagem desses coprodutos e incorporação em alimentos processados. Por este motivo, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a influência da secagem convectiva no resíduo do limão tahiti. A secagem foi realizada sob diferentes temperaturas (60, 70, 80, 90 °C). Foram avaliadas as curvas de secagem do resíduo do limão tahiti, a modelagem matemática dos dados obtidos, além do cálculo dos parâmetros termodinâmicos associados ao processo. Para cada condição de secagem, também foi determinada a difusividade térmica do resíduo do limão tahiti. Com base nos parâmetros estatísticos, o modelo de Page foi o que melhor descreveu a cinética de secagem das amostras para todas as condições avaliadas, dentre os modelos testados. A dependência da temperatura durante a secagem foi representada pela equação de Arrhenius, com energia de ativação de 30,86 kJ.mol⁻¹. As variações de entalpia (ΔH) e entropia (ΔS) foram menores em temperaturas de secagem mais altas, enquanto a variação na energia livre de Gibbs (ΔG) aumentou com a temperatura. Os valores de difusividade térmica foram maiores à medida que se usaram temperaturas de secagem mais altas, apresentando valores de ordem 10⁻¹⁰ a 10⁻⁹ m².s⁻¹.

Palavras-chave: limão tahiti; modelagem matemática; secagem; difusividade térmica; parâmetros termodinâmicos.

ABSTRACT

In recent years, Brazil has expanded its production of citrus fruits, specifically the planting of tahiti lemon (*Citrus latifolia* Tanaka), as it has an economic potential, in industrial terms for the production of concentrated juices or exports to Europe. An alternative to the waste generated by the industry, would be drying these by-products and incorporating them into processed foods or proposing a destination that is not just disposal. For this reason, the objective of the present work was to evaluate the influence of convective drying in tahiti lemon residue. The drying was carried out under different temperatures (60, 70, 80, 90 °C), and then evaluated drying curves for the residue of the Tahiti lemon, a mathematical modeling of the collected data, in addition to the calculation of the thermodynamic parameters associated with the process. For each drying condition, the thermal diffusivity of the Tahiti lemon residue is also provided. Based on the statistical parameters, the Page model was the one that best explain the drying kinetics of all the evaluated conditions, among the tested models. The temperature dependence during drying was represented by the Arrhenius equation, with activation energy of 30.86 kJ.mol⁻¹. The enthalpy variations (ΔH) and entropy (ΔS) lower at higher drying temperatures, while the variation in Gibbs free energy (ΔG) was increased with temperature. The values of thermal diffusivity were higher as the highest drying temperatures were used, with the values of order 10⁻¹⁰ to 10⁻⁹ m².s⁻¹.

Keywords: thaiti lemon; mathematical modelling; drying; thermal diffusivity; thermodynamic parameters.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	10
2.	OBJETIVOS.....	12
2.1	Objetivo geral	12
2.2	Objetivos específicos.....	12
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1	Origem.....	13
3.2	Produção.....	14
3.3	Resíduos.....	15
3.4	Secagem.....	16
3.5	Cinética de Secagem.....	18
3.6	Propriedades Termodinâmicas.....	18
3.6.1	Entalpia.....	19
3.6.2	Entropia.....	19
3.6.3	Energia livre de Gibbs.....	19
3.7	Difusividade Térmica	19
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
4.1	Materiais	21
4.2	Métodos.....	21
4.2.1	Secagem convectiva.....	21
4.2.1.1	Modelagem da Cinética de Secagem.....	21
4.2.1.2	Parâmetros Termodinâmicos.....	22
4.2.2	Difusividade Térmica.....	23
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5.1	Secagem convectiva.....	27
5.2	Parâmetros Termodinâmicos.....	28
5.3	Difusividade térmica.....	30
6.	CONCLUSÃO.....	32
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aparato para determinação de difusividade térmica.....	24
Figura 2 – Interface gráfica computacional de aquisição dos dados para o cálculo da difusividade térmica.....	24
Figura 3 - Curva de secagem do bagaço do limão tahiti.....	26
Figura 4- Inclinação da curva da Equação de Arrhenius.....	28
Figura 5 - Interface do programa computacional para monitoramento de cada temperatura.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos matemáticos utilizados para ajustar os dados de secagem do resíduo do limão tahiti.....	22
Tabela 2 – Coeficientes das Equações de Page, Henderson-Pabis e Newton para cada temperatura de secagem.....	27
Tabela 3 – Propriedades termodinâmicas obtidas na secagem do limão tahiti em diferentes temperaturas.....	29

1 INTRODUÇÃO

Existem diferentes hipóteses sobre a origem dos *Citrus*, mas em geral acredita-se que tenham surgido nas regiões tropicais e subtropicais do sudeste da Ásia e depois se espalharam para os outros continentes. A taxonomia e filogenia dos *Citrus* são complicadas e controversas, principalmente por conta das altas mutações e ampla dispersão de cultivo durante a história (CONTINELLA, 2000). Existem duas classificações do gênero *Citrus*, a Swingle composta por 16 espécies e a Tanaka, que contém 162 espécies, sendo nesta última onde o limão tahiti (*Citrus latifolia* Tanaka) se enquadra (EMBRAPA, 2005).

O Brasil é o segundo maior produtor de limão tahiti e em 2017, essa fruta foi a quarta mais exportada (CEPEA, 2018). Segundo Figueredo (2005), a exploração comercial do limão tahiti tem sido relativamente recente, porém é um dos frutos cítricos que apresenta maior importância comercial no país, pois o mercado não se restringe ao consumo interno. A União Europeia se destaca sendo a maior importadora do limão tahiti brasileiro.

Grande parte dos alimentos de origem agrícola é desperdiçada no Brasil, sendo que essas perdas ocorrem durante toda cadeia produtiva (RORIZ, 2012). As indústrias produtoras de sucos concentrados são responsáveis por boa parte desses resíduos, que a princípio são cascas e sementes provenientes dessa produção (PEREIRA *et al.*, 2009).

Uma opção sustentável e econômica é a criação de novos produtos a partir de resíduos de frutas, pois minimiza a produção de lixo orgânico e seria uma nova fonte de renda (SILVA e RAMOS, 2009). Uma alternativa é a desidratação do resíduo incorporando-o em produtos processados, como bolos, iogurtes, sorvetes, biscoitos entre outros (SOUZA *et al.*, 2010) ou para a obtenção e purificação de outros ingredientes e aditivos, como é o caso da pectina, um polissacarídeo abundante nesse tipo de material.

Sabarez (2016) afirma que a secagem ou desidratação, é uma das operações unitárias mais importantes na fabricação de alimentos, principalmente quando é tratada como método de preservação. Esse processo consiste em reduzir a quantidade de umidade da matriz alimentar, até que desacelerem ou inibam atividades microbianas, enzimáticas e deterioração do produto. A secagem age na remoção de

água de uma matéria prima úmida, induzindo a mudança de fase de líquido para vapor, através da aplicação de calor. É um processo intensivo em energia, no qual pode-se levar a alterações acentuadas de atributos qualitativos, devido à exposição a períodos prolongados a altas temperaturas.

A modelagem para simulação do comportamento de cada alimento durante a secagem é importante no desenvolvimento e aprimoramento de equipamentos. Para isso, utilizam-se modelos matemáticos que possam representar aproximadamente a perda de água durante o tempo do processo (BERBERT *et al.*, 1995).

Santos *et al.* (2019), afirmam que os processos de secagem de produtos de origem agrícola podem ser descritos por modelos teóricos, matemáticos, semiteóricos e empíricos. Dentre os modelos teóricos mais utilizados no processo de secagem, os que se baseiam na segunda Lei de Fick, permitem a determinação das principais propriedades termodinâmicas envolvidas na desidratação, como a entalpia, entropia e energia livre de Gibbs (ARAÚJO *et al.*, 2017).

Além da simulação, segundo Oliveira *et al.* (2011), o conhecimento das propriedades termodinâmicas nas etapas de secagem de produtos agrícolas fornece informações úteis para projetar secadores, calcular a energia requerida na etapa, avaliar a microestrutura dos alimentos e para estudos sobre as propriedades da água na superfície dos alimentos. Durante o processo de sorção, analisando a mudança de entalpia do alimento, pode ser fornecida uma medida de variação de energia que ocorre na interação das moléculas de água com o produto. A entropia está associada com a ligação ou repulsão das moléculas de água no sistema, associada a relação de espaço água-produto. Já mudanças na energia livre de Gibbs durante a troca de água entre o produto e a vizinhança são associadas à energia requerida para transferir moléculas de água do estado vapor para uma superfície sólida ou vice-versa (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

Diante o exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar como a secagem por convecção forçada influencia nas características do resíduo do limão tahiti e nos parâmetros do processo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Avaliar a influência da secagem convectiva no resíduo do limão tahiti.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar a secagem convectiva do resíduo do limão tahiti em diferentes temperaturas;
- Avaliar as curvas de secagem do resíduo do limão tahiti e realizar a modelagem matemática dos dados obtidos;
- Calcular os parâmetros termodinâmicos associados ao processo;
- Calcular a difusividade térmica do resíduo seco do limão tahiti;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Origem

Existem diferentes hipóteses sobre a origem de *Citrus*, em geral acredita-se que tenham se originado nas regiões tropicais e subtropicais do sudeste da Ásia e depois se espalharam para os outros continentes. Na época das Cruzadas foram levados à Europa e chegaram ao Brasil através dos Portugueses no século XVI. A taxonomia e a filogenia dos *Citrus* são complicadas e controversas, principalmente devido a compatibilidade entre elas, por conta das altas mutações e ampla dispersão de cultivo durante a história (CONTINELLA, 2000). Existem duas classificações do gênero *Citrus*, a Swingle, que compreende 16 espécies, e a Tanaka, que estabeleceu um sistema mais moderno, incluindo 162 espécies, pertencentes à divisão *Magnoliophyta*, subdivisão *Magnoliophytina*, classe *Magnoliopsida*, subclasse *Rosidae*, ordem *Sapindales* subordem *Geranineae*, família *Rutaceae*, subfamília *Aurantioideae*, tribo *Citreae*, subtribo *Citrineae* (EMBRAPA, 2005).

Suas árvores são de porte médio e atingem cerca de quatro metros de altura, a copa é densa e de formato normalmente arredondado. As folhas são aromáticas, assim como as flores, pequenas e brancas, muito procuradas pelas abelhas melíferas e matéria-prima da água de flor de laranjeira. Os frutos, além de ricos em vitamina C, possuem ainda vitaminas A e complexo B, além de sais minerais, principalmente cálcio, potássio, sódio, fósforo e ferro (RAFIQ *et al.*, 2018).

Conforme a Embrapa (2005), os híbridos da família *Rutaceae*, representados na sua maioria por laranjas (*Citrus sinensis*), tangerinas (*Citrus reticulata* e *Citrus deliciosa*), limões (*Citrus limon*), limas ácidas como o Tahiti (*Citrus latifolia*) e o Galego (*Citrus aurantiifolia*), e doces como a lima da Pérsia (*Citrus limettioides*), pomelo (*Citrus paradisi*), cidra (*Citrus medica*), laranja azeda (*Citrus aurantium*) e toranjas (*Citrus grandis*).

O limão Siciliano apresenta frutos ovalados, grandes com casca grossa e amarela. É bastante aromático e possui acidez moderada, o que o faz ter grande apreciação na cozinha. A lima ácida Tahiti tem frutos levemente ovalados, casca verde não apresenta sementes, sendo também utilizada na culinária. O limão cravo possui boa adaptação em solos arenosos e ligeiramente ácidos, sendo resistente à seca e qualificado como porta-enxerto (REBEQUI *et al.*, 2009).

3.2 Produção

O Brasil detém cerca de 12% a 14% da produção mundial de frutas, considerada entre os cinco maiores produtores. Se considerar apenas o limão tahiti, o Brasil é o segundo maior produtor. Até 2016, o limão tahiti era a terceira fruta mais exportada pelo Brasil em receita, mas em 2017 perdeu sua posição para a uva (CEPEA, 2018).

O plantio do limão abrange cerca de 50 mil hectares no Brasil, sendo que a região sudeste possui a maior área plantada, em torno de 34 mil hectares, com rendimento médio de 23,4 toneladas por hectare, como descrito pela EMBRAPA (2011). No ano de 2016, a produtividade do limão tahiti no solo brasileiro estava em 27 toneladas por hectare, ficando atrás apenas da Argentina (CEPEA, 2018).

A lima ácida "Tahiti" (*Citrus latifolia* Tanaka) é, dentre as espécies cítricas, a que requer maior atenção, devido a sua precocidade em rendimento econômico, apresentando em geral uma produção significativa a partir do terceiro ano, mas apenas a partir do quinto ano a rentabilidade possui valores significativos (FNP, 2007).

Deve-se levar em conta que os rendimentos dos pomares comerciais variam de acordo com sua fase produtiva. A cultivar oferece uma produção minimamente significativa na sua primeira florada, que ocorre no terceiro ano, onde rende em média 17 kg/planta, podendo chegar até a 177 kg/planta ao atingir o sétimo ano. Ao se tratar de uma planta altamente produtiva, mesmo possuindo sua precocidade, fica evidente a importância comercial do fruto (COELHO, 1993).

Segundo Figueredo (2005), a exploração comercial do limão tahiti tem sido relativamente recente, porém é um dos frutos cítricos que apresenta maior importância comercial no país. Esse mercado vem sendo ampliado, não se restringindo apenas para o mercado interno, pois a União Europeia é o principal destino do limão tahiti brasileiro, e o estado de São Paulo é considerado o principal exportador (CEPEA, 2018). Essa fruta possui boa aceitação, embora tenha uma característica de casca verde, enquanto o limão siciliano, que é a variedade mais comum no exterior, possui casca amarela (PIRES *et al.*, 2011) Esta característica não impede que a Europa seja importadora de 50% do total das exportações brasileira dessa fruta, no entanto, o México vem ganhando espaço como principal concorrente, pois é isento de tarifas de exportação à Europa, enquanto o Brasil tem recolhimento de 12,8%. (CEPEA, 2018).

3.3 Resíduos

No Brasil, grande parte dos alimentos de origem agrícola é desperdiçada, sendo que essas perdas ocorrem em toda cadeia produtiva. Roriz (2012), diz que as perdas na colheita chegam a 10%. Nas etapas seguintes, como transporte e industrialização, os valores podem chegar a 50%. O desperdício continua até o preparo do alimento, onde aproximadamente 10% são descartados.

As indústrias produtoras de sucos de frutas são responsáveis por boa parte da geração de toneladas de resíduos agroindustriais. A princípio, os maiores resíduos são cascas e sementes provenientes dessa produção (PEREIRA *et al.*, 2009).

Todos esses resíduos são gerados por conta de uma rigorosa e necessária seleção das frutas, seja na etapa inicial, onde as frutas não devem apresentar sujeiras, estar livres de fungos, bactérias e parasitas e substâncias que não façam parte da sua composição natural ou na etapa de descascamento, corte e despulpamento ou extração. Mesmo sendo biodegradáveis, ainda assim é necessário um tempo mínimo para que ocorra sua decomposição, representando um potencial de poluição ambiental (JERÔNIMO, 2012).

Jerônimo (2012) cita que o descarte de água provenientes da lavagem industrial diretamente na rede de esgoto, sem que haja um tratamento prévio, também corresponde a uma poluição ambiental gerando pela indústria produtora de suco, pois esses efluentes são compostos por altas concentração de cloro, resíduos inorgânicos insolúveis e matéria orgânica. A depreciação dos solos, devido ao grande acúmulo dos resíduos tem-se formado um local propício para a proliferação de vetores como mosquitos, ratos e baratas, as quais podem causar danos à saúde e bem-estar humano (ARAGÃO, 2010).

A criação de novos produtos utilizando os resíduos de frutas pode ser uma opção sustentável e econômica, pois minimizariam a produção de lixo orgânico e teria uma nova fonte de renda (SILVA e RAMOS, 2009). Uma alternativa para o aproveitamento dos resíduos do processamento dessas frutas, é a desidratação para incorporação em produtos processados, como bolos, biscoitos, iogurte, sorvetes entre outros (SOUZA *et al.*, 2010). A desidratação além de estender a vida de prateleira do produto, diminuir o volume e peso, é importante para concentrar os nutrientes que compõem o alimento (JORGE, 2014).

3.4 Secagem

A preservação de materiais alimentares por meio do processo de secagem, tem sido realizada desde os primeiros registros históricos da civilização humana. A história da secagem é longa, a partir de 20.000 a.C. No final do século XVIII, os franceses desenvolveram com sucesso uma unidade para secagem, para desidratar frutas e vegetais a uma temperatura controlada. Eram fatiados legumes e frutas, secos por ar quente à uma temperatura de 40 °C, prensados e selados em papel alumínio. No entanto esse processo durou somente até o início do século XX, até que a secagem mecânica finalmente começou a substituir a secagem ao sol, particularmente no final da Segunda Guerra Mundial (HAYASHI, 1989).

O desenvolvimento de novos métodos na época, incluindo secagem por pulverização, secagem em leito fluidizado, secagem a vácuo e liofilização foi um esforço significativo para a melhoria desses métodos até os dias atuais. Além disso, novos requisitos de secagem aparecem para novos produtos. Isso continua a impulsionar esforços adicionais para desenvolver técnicas de secagem novas e inovadoras (CHEN e HUANG, 2008).

Sabarez (2016) afirma que a secagem ou desidratação, é uma das operações unitárias mais importante na fabricação de alimentos, principalmente quando é tratada como método de preservação. Esse processo consiste em reduzir a quantidade de umidade da matriz alimentar até que desacelerem ou inibam atividades microbianas, enzimáticas e deterioração do produto.

A secagem age na remoção de água de uma matéria-prima úmida, induzindo a mudança de fase da água de um sólido ou líquido para a fase vapor através da aplicação de calor, exceto no caso da desidratação osmótica, quando a água é removida sem mudança de fase, pela difusão de água líquida de alimentos sólidos através da diferença de uma pressão osmótica. A desidratação é um processo intensivo em energia, no qual pode-se levar a alterações acentuadas no quesito de atributos qualitativos, devido à exposição a longos períodos de secagem em altas temperaturas (SABAREZ, 2016).

Esse processo é complexo, envolvendo mecanismos transitórios acoplados de transferência de calor, massa e em alguns momentos acompanhados de transformações físicas, químicas e mudança de fase (SABAREZ, 2012; SABAREZ, 2014).

O grande desafio é remover a água do material da maneira mais eficiente, com a melhor qualidade do produto e menor impacto no meio ambiente, menores custos de operação e menores danos à matriz alimentícia. Os problemas envolvidos são diversos, como as diferenças de propriedades físico-químicas de vários materiais alimentares, podendo necessitar de secagem em diferentes escalas e com diferentes especificações de qualidade (MUJUMDAR e WU, 2010).

A modelagem para simulação do comportamento de cada alimento durante a secagem é importante no desenvolvimento e aprimoramento de equipamentos e para isso utilizam-se modelos matemáticos que possam representar aproximadamente a perda de água durante o tempo do processo em função da espessura de camadas dos materiais (BERBERT *et al.*, 1995). O conhecimento das propriedades termodinâmicas é importante para as etapas da secagem para produtos agrícolas, pois com base nelas é possível estudar as propriedades da água adsorvida em cada processo, avaliar as microestruturas dos alimentos e estudar os fenômenos físicos e químicos na superfície deles (OLIVEIRA *et al.*, 2011).

Santos *et al.*, (2019) afirmam que nos produtos agrícolas, a secagem pode ser descrita por modelos teóricos, matemáticos, semiteóricos e empíricos. Para os modelos teóricos, há consideração da transferência de calor e de massa na interface produto-ar de secagem e no interior do produto. Porém quando a resistência convectiva é desprezível comparada com a resistência difusiva, é considerada a transferência somente no interior do produto, denominada difusão. Já Faria *et al.* (2012) afirmam que os modelos semiteóricos e empíricos consideram apenas a resistência externa à temperatura e umidade relativa do ar. Dentre os modelos teóricos mais utilizados no processo de secagem, o da difusão é o mais estudado (ARAÚJO *et al.*, 2017). Considerando-se esse modelo como mecanismo principal, a difusão é baseada na segunda Lei de Fick, que estabelece uma relação entre as taxas de variação temporal e espacial da concentração de água, por meio do coeficiente de difusão (LISBÔA *et al.*, 2015).

A partir do uso do modelo da difusão, é possível determinar as principais propriedades termodinâmicas envolvidas na desidratação, como a entalpia, entropia e energia livre de Gibbs (ARAÚJO *et al.*, 2017). Durante o processo de sorção, analisando a mudança de entalpia do produto, pode ser fornecida uma medida de variação de energia que ocorre na interação das moléculas de água com o produto. A entropia está associada com a ligação ou repulsão das moléculas de água no sistema,

associada a relação de espaço água-produto (De OLIVEIRA *et al.*, 2015).

3.5 Cinética de Secagem

A taxa de secagem é determinada por diversos fatores, tais como pressão de vapor d'água no material e no ar de secagem, temperatura, velocidade do ar, velocidade de difusão da água no material, espessura e superfície exposta ao processo de secagem (STRUMILLO e KUDRA, 1986). Para se obter dados relacionados aos teores de umidade do material e ao tempo de secagem, são necessários ensaios experimentais, com o material na forma apropriada, com condições de processos pré-estabelecidas, verificando-se a influência das condições externas do processo de secagem (COSTA, 1999).

A partir dos dados obtidos nos experimentos, é possível construir curvas de secagem que são representadas graficamente, com o teor de umidade em função do tempo (MOCHI, 2005).

3.6 Propriedades Termodinâmicas

O conhecimento das parcelas de energia associadas à evaporação da água nos produtos agrícolas é de extrema importância, pois fornece informações dos constituintes do produto e desta forma, pode ser relacionado com o processo de secagem e armazenamento (GHODAKE *et al.*, 2007).

3.6.1 Entalpia

A entalpia representa o calor liberado ou absorvido pelo alimento. As mudanças de entalpias fornecem uma medida de variação de energia quando ocorre uma interação entre as moléculas de água com os constituintes do produto durante o processo de secagem (RODOVALHO *et al.*, 2015).

3.6.2 Entropia

A entropia é descrita como uma função de estado, associada ao grau de ordem ou desordem das moléculas de água no sistema. Em processos de desidratação, que envolvem a retirada da água, a tendência é o aumento da desordem e da entropia associada ao sistema (BENEDETTI, 2010).

3.6.3 Energia livre de Gibbs

A energia livre de Gibbs indica o quanto a água está ligada ao produto, além de fornecer um critério de avaliação sobre a remoção desse fluído. A espontaneidade do processo de secagem está diretamente relacionada com os valores de energia livre de Gibbs, ou seja, se os valores forem negativos o processo é caracterizado como espontâneo, mas se os valores forem positivos o processo torna-se não-espontâneo (TELIS *et al.*, 2000). Essa energia é considerada como uma medida do trabalho realizado pelo sistema para que o processo de secagem aconteça.

3.7 Difusividade Térmica

O significado físico de difusividade térmica está associado à difusão de calor dentro de um produto enquanto ocorre variação de temperatura no decorrer do tempo. Um alto valor de difusividade térmica indica uma rápida transferência de calor dentro do produto e pouco tempo para o calor sair do mesmo, levando mais tempo para atingir o novo estado de equilíbrio. (SARRIA E HONÓRIO, 2004).

Conforme Rahman (1995), o principal intuito do estudo da difusividade térmica no processamento de alimentos é na estimativa dos tempos de processamento, como secagem, refrigeração, congelamento, cozimento e fritura.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Os limões foram adquiridos em um mercado local de Campo Mourão (Paraná), lavados e descascados manualmente com o auxílio de facas. Após a extração do suco em um extrator doméstico, as cascas e o bagaço foram congelados em *freezer* a uma temperatura de -18 °C. Antes da secagem, o resíduo foi triturado em processador doméstico.

4.2 Métodos

4.2.1 Secagem convectiva

Para a realização da secagem do resíduo do limão tahiti, foi utilizada uma estufa de secagem (Cienlab) com circulação forçada de ar (2 m.s^{-1}), conforme Spoladore *et al.*, (2014). Os experimentos de secagem foram realizados em duplicata, a 4 temperaturas diferentes (60, 70, 80 e 90 °C).

As amostras foram distribuídas sobre bandejas retangulares de maneira uniforme, posicionadas dentro da estufa e de forma que o lado de maior tamanho da bandeja ficasse em uma posição perpendicular ao fluxo de ar.

Durante os primeiros 30 minutos de secagem, a massa do conjunto (bandeja + amostra) foi medida a cada 5 minutos. A partir dos 30 minutos, foram realizadas medidas a cada 10 minutos. A partir de 1 hora, a medida ocorreu a cada 20 minutos e a partir de 2 horas a cada 30 minutos, até que não houvesse variação significativa da massa.

4.2.1.1 Modelagem da Cinética de Secagem

A variação da umidade ao longo do processo foi representada pelos modelos matemáticos de Page (Equação 1), Henderson-Pabis (Equação 2) e Newton (Equação 3), conforme Morais *et al.* (2013) (Tabela 1). Os autores justificam o uso dos modelos devido ao comportamento exponencial da cinética de secagem.

Tabela 1 – Modelos matemáticos utilizados para ajustar os dados de secagem do resíduo do limão tahiti.

Nome do modelo	Modelo	Equação
Page	$RU = \exp(-Kt^n)$	(1)
Henderson-Pabis	$RU = a \exp(-Kt)$	(2)
Newton	$RU = \exp(-Kt)$	(3)

FONTE: MORAIS *et al.* (2013).

NOTA: RU = razão entre as umidades (adimensional); a, k, n = constantes das equações; t = tempo (min).

Para verificar a qualidade do ajuste de cada modelo matemático, foi realizada análise de regressão não-linear, através do método de Gauss-Newton, utilizando o programa computacional STATISTICA 7.0. A seleção dos modelos ocorreu de acordo com o coeficiente de determinação (R^2) e do erro percentual (P), calculado conforme a Equação 4, onde Y e \hat{Y} são valores de umidade de equilíbrio experimental e calculados pelo modelo, respectivamente. E N é o número de dados experimentais. Um modelo é considerado aceitável se o valor de P for menor que 10% e se apresentar alto valor de R^2 (LEWICKI, 2008).

$$P(\%) = \frac{100}{N} \sum \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (4)$$

4.2.1.2 Parâmetros Termodinâmicos

A energia de ativação para cada temperatura de secagem foi calculada a partir da equação de Arrhenius (Equação 5), que relaciona a energia de ativação com a velocidade com que a reação ocorre e permite obter as propriedades termodinâmicas envolvidas no processo. As variações de entalpia (Equação 6), entropia (Equação 7) e energia livre de Gibbs (Equação 8) foram calculadas conforme Jideani e Mpotokwana (2009).

$$k = A_0 \exp(-E_a/RT) \quad (5)$$

$$\Delta H = E_a - RT \quad (6)$$

$$\Delta S = R[\ln A_0 - \ln(k_B/h_P) - \ln T] \quad (7)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (8)$$

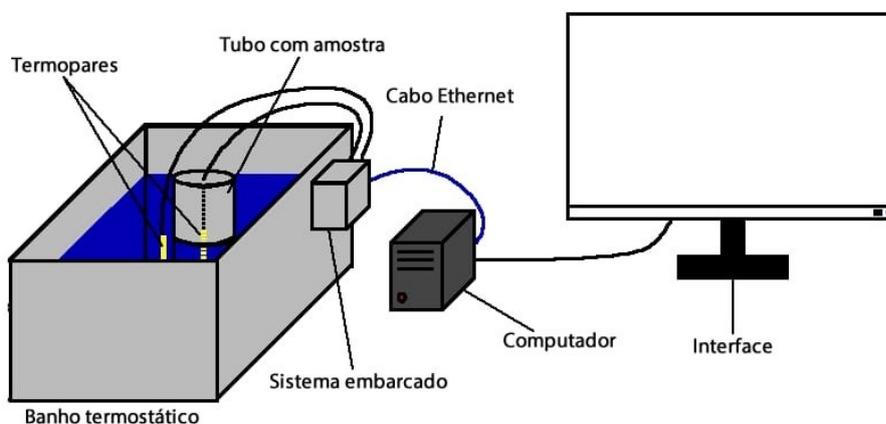
O valor da constante k utilizado foi obtido do modelo que apresentou melhor ajuste. A_0 representa o fator pré-exponencial (s^{-1}). E_a é a energia de ativação ($J.mol^{-1}$), R é a constante universal dos gases ($J.mol^{-1}.K^{-1}$), T , a temperatura (K), ΔH , a variação de entalpia ($J.mol^{-1}$), ΔS é a variação de entropia ($J.mol^{-1} K^{-1}$) e ΔG é a variação de energia livre de Gibbs ($J.mol^{-1}$). k_B representa a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} J.K^{-1}$) e h_P a constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34} J.s$). (JIDEANI e MPOTOKWANA 2009).

4.2.2 Difusividade Térmica

As cascas de limão thaiti secas em cada temperatura (60, 70, 80 e 90 °C), foram trituradas em moinho de facas, obtendo uma granulometria esférica e pequena, comparando-se a um farelo de aveia, tiveram seus valores de difusividade térmica determinados. Foi utilizada uma adaptação do método proposto por Dickerson (1965), e baseado no trabalho Moura, França e Leal (2003). O sistema de medição consiste em um equipamento de aquisição de dados e interface gráfica, composto por uma placa *Raspberry Pi 3B*, Termopares tipo-K e conversores MAX-6675 e foi desenvolvido em parceria com o Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN) da UTFPR de Campo Mourão.

Utilizou-se um cilindro de alumínio, com 2,35 cm de raio e 15 cm de altura, fechado na extremidade inferior. Foram instalados ao cilindro dois termopares acoplados, sendo um na superfície externa, para tomadas de temperatura nesta posição, e outro tipo agulha, no plano central da amostra que preencheu o cilindro por completo. O aparato (cilindro+termopares) contendo a amostra de casca de limão foi totalmente mergulhado em banho térmico, inicialmente com água a 10 °C (Figura 1). Após equilíbrio térmico entre a superfície do cilindro, o interior da amostra e a água do banho, foi acionado o aquecimento e interrompido quando a temperatura interna da amostra atingiu 70 °C. Durante o processo de aquecimento, medidas de temperatura foram registradas automaticamente a cada 5 segundos.

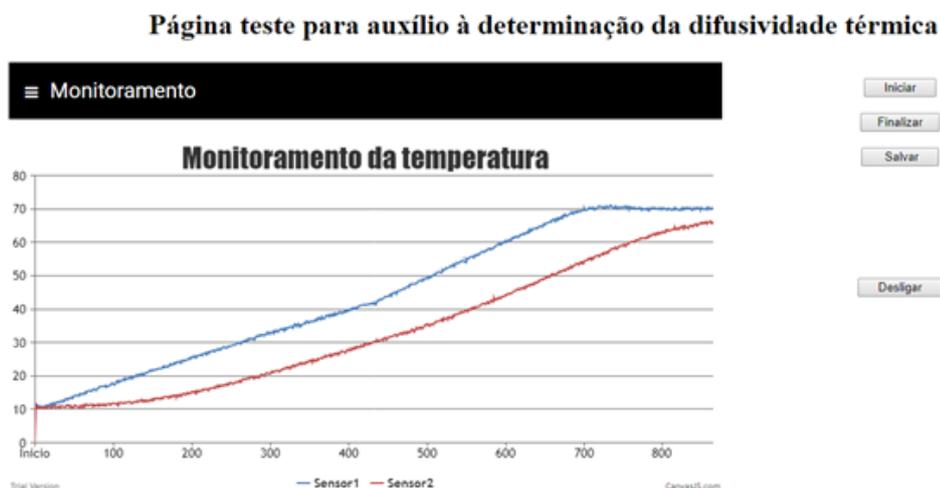
Figura 1 - Aparato para determinação de difusividade térmica.



Fonte: MOURA; FRANÇA; LEAL, (2003).

A interface gráfica (Figura 2) para monitoramento da temperatura foi desenvolvida utilizando linguagem *HTML*, com uma página composta com a ferramenta de plotagem de gráficos *CanvasJS*, e funcionalidades de comando “Iniciar”, “Finalizar”, “Salvar” e “Desligar” em linguagem *PHP*.

Figura 2 – Interface gráfica computacional de aquisição dos dados para o cálculo da difusividade térmica.



Fonte: Autoria própria.

NOTA: Sensor 1 = superfície externa; Sensor 2 = centro da amostra.

Os valores de tempo e temperatura foram registrados na forma de tabela em um banco de dados. Além de possibilitarem monitorar a taxa de elevação de temperatura do banho térmico, os dados foram usados para acompanhamento dos perfis de evolução das temperaturas externa e interna. A difusividade térmica foi calculada pela Equação 9 (MOURA; FRANÇA; LEAL, 2003), onde “ α ” é a difusividade

térmica ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), “A” representa taxa de aumento de temperatura do banho ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$), “R” é o raio do tubo (m) e “ $T_{\text{ext}} - T_{\text{int}}$ ” expressa a diferença entre temperatura externa e interna do tubo ($^{\circ}\text{C}$).

$$\alpha = \frac{A.R^2}{4.(T_{\text{ext}} - T_{\text{int}})} \quad (9)$$

O valor de A foi obtido a partir da fase constante de aumento da temperatura do banho. O valor da diferença de temperatura externa e interna diminuiu à medida que a temperatura do banho aumentou. Com os valores medidos, a difusividade térmica foi obtida a partir da média dos valores calculados na faixa estudada. Para cada amostra de casca de limão seca analisada, o experimento foi realizado em duplicata. O aparato de medição foi previamente validado no trabalho de Leal (2017).

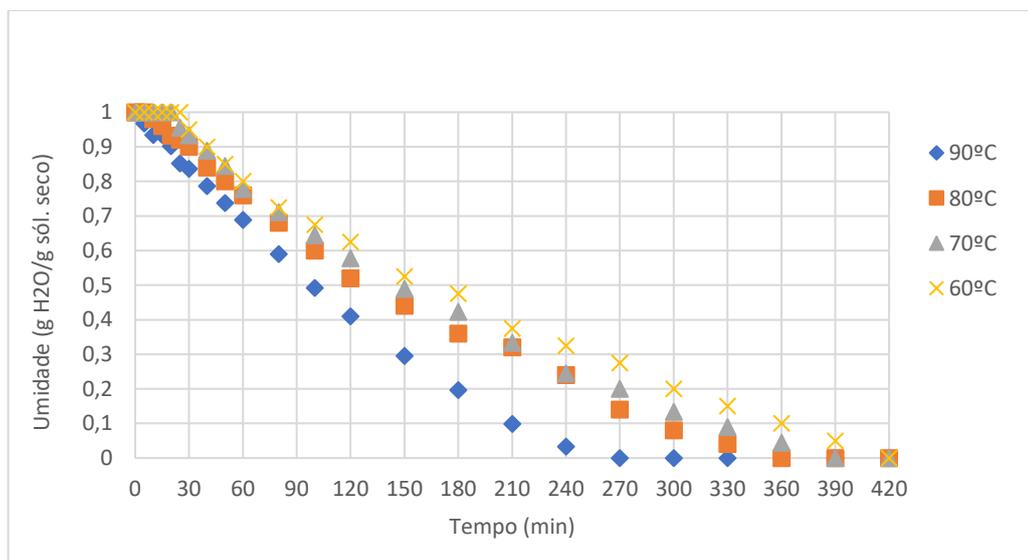
5. RESULTADO E DISCUSSÃO

5.1 Secagem convectiva

Com a realização da secagem convectiva do bagaço do limão tahiti nas temperaturas 60, 70, 80, 90 °C, foi possível obter as curvas de secagem experimental e utilizar os modelos empíricos encontrados na literatura para análise dos dados, conforme Morais *et al.*, (2003).

O processo foi representado pelas curvas típicas de secagem (Figura 3), que são reproduções gráficas dos dados de umidade média do material (g de água/g de sólido seco), em função do tempo (minutos) obtidos experimentalmente. Dessa forma, a cinética de secagem relaciona a mudança do conteúdo médio de umidade do material ao longo do tempo de processo.

Figura 3 - Curva de secagem do bagaço do limão tahiti.



Fonte: Autoria própria.

A partir do gráfico, é possível observar a ocorrência de três diferentes períodos de secagem, sendo o período inicial, período à taxa constante e o período à taxa decrescente (STRUMILLO e KUDRA, 1986). A secagem a 90 °C obteve o período inicial a caracterizado pelos primeiros 20 minutos, enquanto para 80 °C, até aos 25 minutos e para 70 °C e 60 °C até 30 minutos. O período à taxa constante ocorreu a partir dos 20 minutos para 90 °C até aproximadamente 150 minutos, já para 80 °C foi caracterizado até aproximadamente 170 minutos, enquanto para 70 e 60 °C até aproximadamente

240 minutos. O período à taxa decrescente ocorreu até o tempo de equilíbrio, onde a secagem para 60 °C durou até 420 minutos enquanto para 90 °C durou 270 minutos até seu tempo final.

Garcia et al. (2004), afirmaram que a velocidade da secagem depende da temperatura e do fluxo de ar. Como o fluxo de ar foi constante ao longo da secagem, é possível fazer uma relação entre o tempo de exposição com a temperatura, visto que o tempo de secagem para temperatura de 90 °C foi menor em comparação as outras temperaturas e aumentou à medida que diminuiu a temperatura de secagem.

Devido ao comportamento exponencial da cinética de secagem, foram utilizados os modelos matemáticos de Page, Henderson-Pabis e Newton. Conforme Madamba et al. (1996), o coeficiente de determinação (R^2), não é considerado isoladamente um bom critério para seleção de modelos não lineares. Os autores justificam que também dever ser considerados os valores de erro médio relativo (P). Na Tabela 2, encontram-se os coeficientes das Equações de Page, Henderson-Pabis e Newton respectivamente, para cada temperatura de secagem.

Tabela 2 – Parâmetros e coeficientes para as equações de Page, Henderson-Pabis e Newton na análise dos dados de secagem de casca de limão thaiti a diferentes temperaturas.

Page				
Temperatura	R^2	Erro (%)	K	n
90°C	0,996	1,504%	0,0014	1,367
80°C	0,994	1,830%	0,0010	1,335
70°C	0,995	1,495%	0,0006	1,411
60°C	0,993	2,445%	0,0006	1,384
Henderson-Pabis				
Temperatura	R^2	Erro (%)	K	a
90°C	0,982	6,229%	0,0088	1,064
80°C	0,982	5,577%	0,0065	1,069
70°C	0,981	5,950%	0,0059	1,092
60°C	0,980	6,923%	0,0053	1,091
Newton				
Temperatura	R^2	Erro (%)	K	-
90°C	0,976	8,275%	0,0081	-
80°C	0,973	8,340%	0,0059	-
70°C	0,964	11,192%	0,0053	-
60°C	0,965	12,366%	0,0048	-

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que os coeficientes de determinação e os parâmetros da equação de Page são maiores (mais próximo de 1), quando comparados com os demais. Dessa forma, pode-se afirmar que o modelo de Page descreve melhor as curvas de secagem.

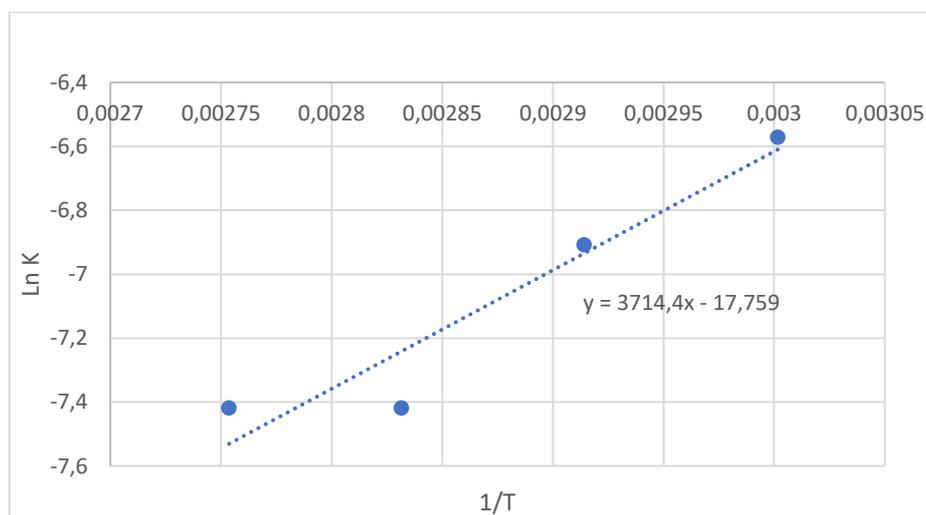
Tal comportamento é comprovado pelo menor erro porcentual (P). Por este motivo, será possível a utilização do modelo de Page para a determinação dos parâmetros termodinâmicos para a secagem na faixa de temperatura estudada. Os resultados obtidos pelo modelo de Page tiveram uma margem de erro médio relativo (P) entre 1,5 a 2,4%, e o coeficiente de determinação (R^2) esteve acima de 0,99 em todas as temperaturas estudadas.

Sanjinez-Argadoña et al. (2010), realizaram a secagem de tomates em secador de bandejas na temperatura de 70°C e com a velocidade do ar de 0,5 m.s⁻¹ e também obtiveram resultados satisfatórios pelo modelo de Page, com um R^2 de 0,999 e erro médio relativo de 1,34%.

5.2 Parâmetros Termodinâmicos

Pela inclinação da curva da Equação de Arrhenius, juntamente com a velocidade específica da reação (k) encontrada pelo modelo de Page, a energia de ativação foi encontrada para secagem do limão tahiti, conforme a Figura 4.

Figura 4- Inclinação da curva da Equação de Arrhenius.



Fonte: Autoria própria.

Com o termo de inclinação da reta pela Equação de Arrhenius linearizada, como demonstrado na Equação 10, encontrou-se o valor de 3714,4. e esse termo refere-se a $A = -E_a/R$. Portanto, o valor da energia de ativação encontrado foi 30,86 kJ.mol⁻¹.

$$\ln k = \frac{-Ea}{R} \frac{1}{T} \quad (10)$$

Dessa forma, verifica-se que o valor se encontra dentro da faixa de variação para produtos agrícolas, conforme especificado por Zogzas et al. (1996), que afirmam que os valores devem estar situados entre 12,70 a 110 kJ.mol⁻¹. Já Sehwat et al. (2018) encontraram a energia de ativação para a secagem de mangas em cubos no valor de 29,05 kJ.mol⁻¹ nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C.

A partir da energia de ativação foi possível encontrar os valores para entalpia, entropia e energia livre Gibbs para secagem do bagaço do limão tahiti em diferentes temperaturas conforme a Tabela 3. Os valores referentes à variação de entalpia (ΔH) foram positivos, portanto, são reações endotérmicas, isto é, houve necessidade de energia na forma de calor para que o processo ocorresse (COSTA et al., 2016). Observa-se que com o aumento da temperatura do ar de secagem, resulta em uma diminuição da entalpia (ΔH). Isso indica que em situações de maiores temperaturas, há uma menor demanda de energia térmica para promover a secagem do bagaço do limão tahiti. Esse comportamento foi relatado na secagem de outros produtos agrícolas, como de Silva et al. (2016) e Cagnin et al. (2017) que trabalharam com secagem dos frutos de pimenta Cabacinha e desidratação de alho, respectivamente.

Tabela 3 - Propriedades termodinâmicas obtidas na secagem do limão tahiti em diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	ΔH (kJ.mol ⁻¹)	ΔS (kJ.mol ⁻¹ K ⁻¹)	ΔG (kJ.mol ⁻¹)
60	28,098	-3,933x10 ⁻¹	159,122
70	28,015	-3,935x10 ⁻¹	163,056
80	27,932	-3,938x10 ⁻¹	166,993
90	27,849	-3,940x10 ⁻¹	170,932

Fonte: Autoria própria.

Tal comportamento pode ser explicado pela entalpia (ΔH) estar relacionada com a energia necessária para remover a água ligada à matéria seca durante o processo de secagem (RESENDE et al., 2018).

Os valores para variação de entropia (ΔS) ficaram entre -3,933x10⁻¹ e -3,940x10⁻¹ kJ.mol⁻¹K⁻¹, sendo possível constatar que a entropia diminui à medida que a temperatura foi aumentada. Esse processo ocorre durante a secagem por conta da diminuição do teor de água. Dessa forma, o movimento das moléculas de água fica menor. (CORRÊA et al., 2011). Santos et al. (2019) encontraram valores de entropia

para polpa de patauá entre $-3,130 \times 10^{-1}$ a $-3,135 \times 10^{-1}$ $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$, assim como Oliveira et al. (2015), onde ao determinar as propriedades termodinâmicas na secagem de morangos para as temperaturas de 40, 50 e 60 °C, encontraram valores para entropia (ΔS) de $-2,383$, $-2,386$ e $-2,388 \times 10^{-1}$ $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$, respectivamente.

A energia livre de Gibbs (ΔG) evidencia que a secagem é um processo não-espontâneo, pois se encontra com valores positivos. Dessa forma, pode-se concluir que é necessário o fornecimento de energia térmica proveniente do ar para que ocorra a redução do teor de água (ALVES e RODOVALHO, 2016).

O bagaço do limão tahiti apresentou valores de energia livre de Gibbs (ΔG) entre 159,12 e 170,93 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. Santos e Morais (2015), estudaram parâmetros termodinâmicos da casca da laranja desidratada, e o valor obtido foi de 161,62 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ para uma secagem a 110 °C.

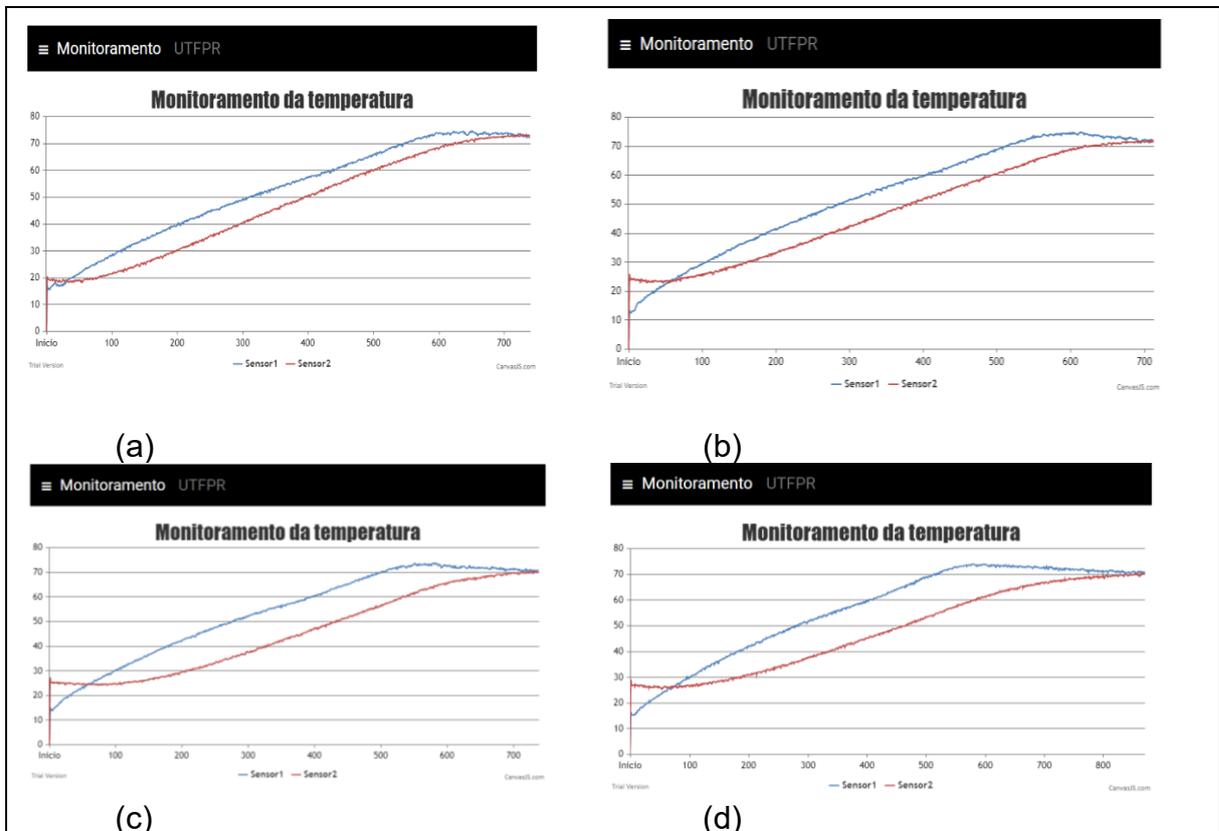
5.3 Difusividade térmica

Com base nos experimentos, o monitoramento das temperaturas para determinação da difusividade térmica das cascas de limão tahiti apresentou os comportamentos que podem ser analisados na Figura 5.

Pode-se observar que com o aumento de temperatura do banho térmico, a diferença de temperatura entre o Sensor 1 (externo) e o Sensor 2 (interno), tende a diminuir.

Os valores encontrados de difusividade térmica para o bagaço do limão tahiti para as temperaturas 60, 70, 80 e 90 °C, foram de $4,855 \times 10^{-10}$, $4,376 \times 10^{-09}$, $3,968 \times 10^{-09}$ e $3,653 \times 10^{-09}$ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente. De acordo com Madamba (2003), os valores de difusividade para alimentos encontram-se na faixa de 10^{-11} a 10^{-09} $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Dessa forma, comprova-se que os valores encontrados experimentalmente encontram-se dentro da faixa estabelecida em literatura.

Figura 5 - Interface do programa computacional para monitoramento de cada temperatura.



Fonte: Autoria própria.

NOTA: cascas secas a 90 °C (a); 80 °C (b); 70 °C (c); 60 °C (d); Sensor 1 (externo) e Sensor 2 (interno).

Percebeu-se que as amostras apresentaram quando analisadas amostras secas a condições mais severas, o valor da difusividade térmica foi maior. Pelo fato da velocidade de secagem das cascas no tratamento a 90 °C ter sido maior, acredita-se que podem ter ocorrido maiores alterações estruturais na matriz sólida. E isso também refletiu na forma como o calor difunde através dela. Tal comportamento é evidenciado visualmente pelas diferenças de temperaturas externas e internas dos tratamentos, de acordo com a Figura 5.

No estudo de Fiorentin et al. (2011), os autores calcularam a difusividade térmica do bagaço da laranja para as seguintes temperaturas de 33, 41, 50, 66, 80 e $92 \pm 1^\circ\text{C}$ e os valores encontrados foram de $9,247 \times 10^{-10}$, $9,730 \times 10^{-10}$, $1,48 \times 10^{-9}$, $2,113 \times 10^{-9}$, $2,432 \times 10^{-9}$, $2,918 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectivamente.

6. CONCLUSÃO

Apesar de ser uma das operações unitárias mais antigas na conservação de alimentos, a secagem ainda representa uma das técnicas frequentemente utilizadas, desde agroindústrias até grandes unidades processadoras.

Neste trabalho, foi possível avaliar como as condições de secagem do resíduo do limão tahiti estão relacionadas aos parâmetros termodinâmicos e termofísicos.

O tempo de processo é reduzido com o aumento da temperatura do ar de secagem. O modelo de Page foi selecionado para representar o processo, por apresentar um erro porcentual abaixo dos 10% e um R^2 acima de 0,99. A entalpia e a entropia diminuíram enquanto a energia livre de Gibbs foi maior com o aumento da temperatura de secagem, indicando um processo endergônico não espontâneo. O bagaço do limão tahiti seco a diferentes temperaturas apresentou uma difusividade térmica na ordem 10^{-10} a $10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, que aumentou à medida que se usou uma temperatura de secagem maior. Através da equação de Arrhenius, encontrou-se uma energia de ativação $30,86 \text{ kJ.mol}^{-1}$ para o processo.

REFERÊNCIAS

- ALVES, J. J. L.; RODOVALHO, R. S. Cinética de secagem em camada de espuma da polpa de abacate CV 'Quintal' (*Persea Americana Mill*). **Revista Agrotecnologia**, v. 7, n. 1, p. 86-98, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.12971/2179-5959/agrotecnologia.v7n1p86-98>. Acesso em: 12 abr. 2021.
- ANDRADE, M. S. **Propriedades termofísicas de polpas de frutas tropicais: jaca (*Artocarpus Heterophilus Lamk.*) e umbu (*Spondias Tuberosa Arr. Cam.*)** Itapetinga – BA: UESB, 65 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos e Processo). 2008. Disponível em: http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=124803. Acesso em: 12 abr. 2021.
- ARAGÃO, A. S. L. **Utilização de coprodutos da fruticultura do Vale do São Francisco na alimentação de ruminante**. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, p. 65, 2010. Disponível em: <http://www.univasf.edu.br/~tcc/000001/000001ED.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2021.
- ARAÚJO, J. L.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIREDO, R. M. F. Propriedades termofísicas da polpa do cupuaçú com diferentes teores de sólidos. **Ciência Agrotécnica**. Lavras, v. 28, n. 1, p. 126-134, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cagro/a/4JbD9YnPPjMSs9wN4wHx7FS/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 12 abr. 2021.
- BENEDETTI, P. C. D. **Caqui em pó: Influência de aditivos e do método de secagem**. São Jose do Rio Preto. Universidade Estadual Paulista, p.129. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências de Alimentos), 2010. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/10197>. Acesso em: 12 abr. 2021.
- BERBERT, P. A.; QUEIROZ, D. M.; SILVA, J. S.; PINHEIRO FILHO, J. B. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 60, n. 3, p. 167-173, 1995. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021863485710104>. Acesso em: 12 abr. 2021.
- CAGNIN, C.; LIMA, M. S.; SILVA, R. M.; SILVA, M. A. P.; PLÁCIDO, G. R.; FREITAS, B. S. M.; OLIVEIRA, D. E. C. Garlic: Kinetic drying and thermodynamic properties. **Bioscience Journal**, v. 33, n. 4, p. 905-913, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/BJ-v33n4a2017-36886>. Acesso em: 12 abr. 2021.
- CEPEA - Centro de estudos avançados em Economia Aplicada. **Cenário Econômico para Lima Ácida Tahiti em SP**. 2018. Disponível em: <https://cepea.esalq.usp.br/br/diarias-de-mercado/citros-cepea-precos-da-lima-acida-tahiti-recuam-com-forca.aspx>. Acesso em: 12 abr. 2021.
- COELHO, Y. S. Limão tahiti para exportação: Aspectos técnicos de produção. Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária, Secretaria de Desenvolvimento Rural, Programa de Apoio À Produção e Exportação de Frutas, Hortaliças, Flores e Plantas Ornamentais. Brasília. **Serie Publicações Técnicas FRUPEX**. p. 35. 1993. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/185566/1/Lima-acida-para-exportacao-aspectos.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2021.

CONTINELLA, L. M. G. Citrus Phylogeny And Genetic Original. **Elsevier**, p. 1155–1166, 2000. Disponível em: https://www.citrusgenomedb.org/bio_data/3164. Acesso em: 05 mai. 2021.

CORRÊA, P. C., OLIVEIRA, G. H. H., BOTELHO, F. M., GONELI, A. L. D., & CARVALHO, F. M. (2010). Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**. v.57, n. 5, p. 595-601. (2010). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2010000500005>. Acesso em: 12 abr. 2021.

CORRÊA, P. C.; BOTELHO, F. M.; OLIVEIRA, G. H. H.; GONELI, A. L. D.; RESENDE, O.; CAMPOS, S. C. Mathematical modeling of the drying process of corn ears. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 1, 575-581, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asagr/a/m9XHCnkYnZvWMfgG4tTddWm/?lang=en>. Acesso em: 05 mai. 2021.

COSTA, C. F.; CORRÊA, P. C.; VANEGAS, J. D. B.; BAPTESTINI, F. M.; CAMPOS, R. C.; FERNANDES, L. S. Mathematical modeling and determination of thermodynamic properties of jabuticaba peel during the drying process. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. (6, p. 576-580. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/18071929/agriambi.v20n6p576-580>, 2016. Acesso em: 12 abr. 2021.

COSTA, C. M. L. **Influência das condições de secagem no rendimento e na composição do óleo essencial de pimenta longa (*Piper hispidinervium* C. DC.)**. DEQ/UFPa. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Belém-PA, 1999.

DICKERSON, R. W. An apparatus for measurements of Thermal Diffusivity of Foods, **Food Technology**, v. 19, n. 5, p. 198-204, 1965.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA, Mandioca e Fruticultura, Ministério da Agricultura e Abastecimento. **Produção brasileira de limão em 2011**. 2011. Disponível em: <https://www.embrapa.br/mandioca-e-fruticultura>. Acesso em: 05 mai. 2021.

FAO - Food and agriculture Organization of the United Nation. **Citrus Fruit - Fresh and Processed - Anual Statistics**. 2012. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i8092e/i8092e.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2021.

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**, v. 16, n. 5, p. 573-583, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/9kTqWpFMcynDkRPtjYTNYWN/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 05 mai. 2021.

FIGUEREDO, J. O. et al. Comportamento de catorze porta-enxertos para o limão eureka. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p.73-76, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbf/a/bHc7ntyY3xyY78GYBcDbpgc/?lang=pt>. Acesso em: 03 jun. 2021.

FIORENTIN, L.; MENON, B.; ALVES, J.; TEREZA, S.; BARROS, D.; MOTTA, O.; MODENES, A. Análise da secagem do bagaço de laranja em camada fina utilizando modelos semi-teóricos e empíricos. **Engvista**, 2011. Disponível em: <https://periodicos.uff.br/engvista/article/view/8894>. Acesso em: 03 jun. 2021.

FNP CONSULTORIA & AGROINFORMATIVOS. **Agriannual 2007**. Anuário da agricultura brasileira. São Paulo, p. 516, 2007.

GHODAKE, H. M.; GOSWAMI, T. K.; CHAKRAVERTY, A. Moisture sorption and vaporization of withered leaves, black and green tea. **Journal of Food Engineering**, Londres, v. 78, n. 3, p. 827-935, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/248514299_Moisture_sorption_isotherms_heat_of_sorption_and_vaporization_of_withered_leaves_black_and_green_tea. Acesso em: 03 jun. 2021.

GUIMARÃES, R. M.; OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; SILVA, J. S.; REZENDE, T. A. M.; EGEEA, M. B. Thermodynamic properties and drying kinetics of 'okara'. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 6, p. 418-423, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n6p418-423>. Acesso em: 12 abr. 2021.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 5ª edição, LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A., Rio de Janeiro, p. 698, 2003.

JERONIMO, C. E. M. Gestão Agroindustrial: Pontos Críticos de Controle Ambiental no Beneficiamento de Frutas. **Revista de Administração de Roraima**, v. 12, p.70- 77, 2012. Disponível em: <https://revista.ufrr.br/adminrr/article/view/1139>. Acesso em: 03 jun. 2021.

JIDEANI, V. A.; MPOTOKWANA, S. M. Modeling of water absorption of botswana bambara varieties using Peleg's equation. **Journal of Food Engineering**, v. 92, n. 2, p. 182-188, 2009. Disponível em: <http://digitalknowledge.cput.ac.za/handle/11189/2701>. Acesso em: 03 jun. 2021.

JORGE, A. **Avaliação comparativa entre processos de secagem na produção de tomate em pó**. 2014. 68f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa. 2014. Disponível em: http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1571/1/PG_PPGEPE_M_Jorge%2C%20Aline_2014.pd. Acesso em: 03 jun. 2021.

LEAL, F. C. **Desenvolvimento e validação de metodologia para determinação de propriedades termofísicas em alimentos**. 50f. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2017.

LEWICKI, P. P. **Data and Models of Water Activity**. II: Solid Foods. CRC Press, Boca Raton, 2008. Disponível em: <https://www.routledgehandbooks.com/pdf/doi/10.1201/9781420003093.ch3>. Acesso em: 03 jun. 2021.

LISBÔA, J. F.; SILVA, J. N.; CAVALCANTI, M. T.; SILVA, E. M. C. A.; GONÇALVES, M. C. Análise da hidratação de grãos de alpiste. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 218-223. 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/CNgrcF3MncpS9pM5KWZDKBk/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 03 jun. 2021.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. Thin layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v. 29, p. 75-97, 1996. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0260877495000623>. Acesso em: 03 jun. 2021.

MADAMBA, P. S. Thin layer drying models for osmotically pré-dried Young coconut. **Drying Technology**, v. 21, n. 9, p. 1759-1780, 2003. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/DRT-120025507>. Acesso em: 03 jun. 2021.

MOCHI, V. T. **Efeito da temperatura de secagem no rendimento do óleo essencial e teor de 1, 8-cineol presentes nas folhas de *eucalyptus camaldulensis***. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), 2005. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/266803>. Acesso em: 03 jun. 2021.

MORAIS, S. J.; DEVILLA, I. A.; FERREIRA, D. A.; TEIXEIRA, I. R. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) walp.). **Revista Ciencia Agronomica**, v. 44, n. 3, p. 455-463, 2013. Disponível em: <http://ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/article/view/1952>. Acesso em: 03 jun. 2021.

MOURA, S. C. S. R.; FRANÇA, V. C. L.; LEAL, A. M. C. B. Propriedades Termofísicas de Soluções Modelo Similares a Sucos – Parte I. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 23, n.1, p. 62-68, jan-abr, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cta/a/Y5gJfyjFZrSg5yT3mG3zCHc/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 03 jun. 2021.

MUJUMDAR, A.S., WU, Z.H. Thermal drying technologies: new developments and future R&D potential. In: Jangam, S.V., Thorat, B.N. (Eds.), R&D Needs, **Drying Technology**. 2010. Disponível em: <https://arunmujumdar.com/wp-content/uploads/2020/03/e-book-on-RD-opportunities-in-drying.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2021.

OLIVEIRA, G. H. H. DE; ARAGÃO, D. M. S.; OLIVEIRA, A. P. L. R. DE; SILVA, M. G.; GUSMÃO, A. C. A. Modelagem e propriedades termodinâmicas na secagem de morangos. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 18, n. 4, p. 314-321, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjft/a/TFQF4ZDYHmRbpGHFHYTrqWM/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 03 jun. 2021.

OLIVEIRA, G. H. H.; CORRÊA, P. C.; SANTOS, E. S.; TRETO, P. C.; DINIZ, M. D. M. S. Evaluation of thermodynamic properties using GAB model to describe the desorption process of cocoa beans. **International Journal of Food Science and Technology**, Londres, v. 46, n. 10, p. 2077-2084, 2011. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2621.2011.02719.x>. Acesso em: 03 jun. 2021.

PEREIRA, L. G. R.; AZEVEDO, J. A. G.; PINA, D. S.; BRANDÃO, L. G. N.; ARAÚJO, G. G. L.; VOLTOLINI, T. V. Aproveitamento dos Coprodutos da Agroindústria Processadora de Suco e Polpa de Frutas para Alimentação de Ruminantes. Petrolina: Embrapa Semi-árido, **Documentos online** (Embrapa Semi-árido. Documentos, 220), p. 30, 2009. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/257241/aproveitamento-dos-coprodutos-da-agroindustria-processadora-de-suco-e-polpa-de-frutas-para-alimentacao-de-ruminantes>. Acesso em: 03 jun. 2021.

PIRES, M. M. et al. Análise do comportamento dos preços do limão tahiti do Brasil. **Revista Informações Econômicas**, São Paulo, v. 41, n.9, p. 50-58. 2011. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/ftpiea/publicacoes/IE/2011/tec6-0911.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2021.

RAFIQ, S.; KAUL, R.; SOFI, S. A.; et al. Citrus peel as a source of functional ingredient: A review. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 17, n. 4, p. 351-358,

2018. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Citrus-peel-as-a-source-of-functional-ingredient%3A-A-Rafiq-Kaul/b1ae909243dac0975738add56814337f8bea8e09>. Acesso em: 03 jun. 2021.

REBEQUI, A. M. Produção de mudas de limão cravo em substrato com biofertilizante bovino irrigado com águas salinas. **Revista de Ciências Agrárias**, 2009. Disponível em: <https://revistas.rcaap.pt/rca/article/view/15740>. Acesso em: 03 jun. 2021.

RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; COSTA, L. M.; FERREIRA JÚNIOR, W. N. Drying kinetics of baru fruits (*Dipteryx alata Vogel*). **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 1, p.103-109, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v38n1p103-109/2018>. Acesso em: 12 abr. 2021.

RODOVALHO, R. S; SILVA, H. W.; SILVA, I. L.; ROSSETO, C. A. V. Cinética de secagem dos grãos de pimenta bode. **Global Science and Technology**. Rio verde, v.8, n.2, p.128-142, 2015. Disponível em: <https://scholar.google.com.br/citations?user=CU2IVNMAAAAJ&hl=pt-BR>. Acesso em: 12 abr. 2021.

RORIZ, R. F. C. **Aproveitamento dos resíduos alimentícios obtidos das centrais de abastecimento do Estado de Goiás S/A para alimentação humana**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, 2012. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/71/o/Dissertacao_Renata_Fleury_2012.pdf. Acesso em: 03 jun. 2021.

SABAREZ, H. Drying of Food Materials. Reference **Module in Food Science**. p.1–10, 2016.

SABAREZ, H. T. Computational modeling of the transport phenomena occurring during convective drying of prunes. **Journal of Food Engineering**, v. 111, n. 2, p. 279-288, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257084553_Computational_modelling_of_the_transport_phenomena_occurring_during_convective_drying_of_prunes. Acesso em: 03 jun. 2021.

SABAREZ, H. T. Mathematical modeling of the coupled transport phenomena and color development: finish drying of trellis-dried sultanas. **Drying Technology**. v. 32, p. 578-589, 2014. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2013.846366>. Acesso em: 03 jun. 2021.

SANTOS, C.; MORAIS, L. Thermodynamic parameters of dehydrated orange peel. **Química Nova**. 38, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20150026>. Acesso em: 12 abr. 2021.

SANTOS, D. C.; COSTA, T. N.; FRANCO, F. B.; CASTRO, R. C.; FERREIRA, J. P. L.; SOUZA, M. A. S.; SANTOS, J. C. P. Drying kinetics and thermodynamic properties of patawa pulp (*Oenocarpus bataua Mart.*). **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 22, n. 20e2018305, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1981-6723.30518>. Acesso em: 12 abr. 2021.

SANTOS, D. C.; LEITE, D. D. F.; LISBÔA, J. F.; et al. Modelagem e propriedades termodinâmicas da secagem de fatias de acuri. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 22, n. 4, p. 314–321, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjft/a/ArzHhsLmm86hkFxF5NGNP/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 03 jun. 2021.

SARRIA, S. D.; HONÓRIO, S. L. Condutividade e difusividade térmica do figo (*Ficus carica* L.) "Roxo de Valinhos". **Engenharia Agrícola**, 2004. Disponível em: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=BR2004005452>. Acesso em: 03 jun. 2021.

SEHRAWAT, R.; NEMA, P. K.; KAUR, B. P. Quality evaluation and drying characteristics of mango cubes dried using low pressure superheated steam, vacuum and hot air drying methods. **Food Science and Technology**, v. 92, n 1, p. 548-555, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2018.03.012>. Acesso em: 12 abr. 2021.

SILVA, H. W.; RODOVALHO, R. S.; VELASCO, M. F.; SILVA, C. F.; VALE, L. S. R. Kinetics and thermodynamic properties related to the drying of 'Cabacinha' pepper fruits. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 2, p. 174-180, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n2p174-180>. Acesso em: 12 abr. 2021.

SILVA, M. B.; RAMOS, A. M. Composição química, textura e aceitação sensorial de doces em massa elaborados com polpa de banana e banana integral. **Revista Ceres**, v. 56, p. 551- 554, 2009. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/3052/305226893004.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2021.

SILVA, S. B. **Propriedades Termofísicas de Polpa de Abacaxi**. 1997. 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos), Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1997. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/255138>. Acesso em: 03 jun. 2021.

SOUZA, D. **Estudo das Propriedades Físicas de Polpas e Néctares de Pequenos Frutos**. Tese (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 171, 2008. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/14832>. Acesso em: 03 jun. 2021.

SOUZA, J. C. B.; COSTA, M. R.; RENSIS, C. M. V. B.; SIVIERI, K. Sorvete: Composição, processamento e viabilidade da adição de probiótico. **Alimentos e Nutrição**, Araraquara, v.21, n.1, p.155-165, 2010. Disponível em: <http://serv-bib.fcfar.unesp.br/seer/index.php/alimentos/article/viewFile/1401/923>. Acesso em: 03 jun. 2021.

SPOLADORE, S. F. Modelagem Matemática da Secagem de Casca de Maracujá e Influência da Temperatura na Cor, Compostos Fenólicos e Atividade Antioxidante. **Brazilian Journal of Food Research**. v. 5, n. 2, p.17-25, 2014. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2260/1/CM_COEAL_2013_2_11.pdf. Acesso em: 03 jun. 2021.

STRUMILLO, C., KUDRA, T. Drying: principles, applications, and design. Switzerland: **Gordon and Breach Science Publishers**. 1986. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373939008959903>. Acesso em: 03 jun. 2021.

TELIS, V. R. N. et al. Water sorption thermodynamic properties applied to persimmon skin and pulp. **Thermochimica Acta**, v. 343, n. 1/2, p. 49-56, 2000. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/66088>. Acesso em: 03 jun. 2021.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, v. 14, n. 10, p. 2225-2253, 1996. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/07373939608917205>. Acesso em: 12 abr. 2021.