



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CAMPUS MACAÉ
ENGENHARIA MECÂNICA



**ANÁLISE DA SECAGEM CONVECTIVA EM CONDIÇÕES EXTERNAS
CONSTANTES DE FATIAS DE MAÇÃ DO TIPO GOLDEN DELICIOUS**

DOUGLAS BECKER MARTINS

MACAÉ
2019

DOUGLAS BECKER MARTINS

**ANÁLISE DA SECAGEM CONVECTIVA EM CONDIÇÕES EXTERNAS
CONSTANTES DE FATIAS DE MAÇÃ DO TIPO GOLDEN DELICIOUS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro – Campus Macaé, como um dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Diego Cunha Malagueta


MACAÉ

2019

DOUGLAS BECKER MARTINS

**ANÁLISE DA SECAGEM CONVECTIVA EM CONDIÇÕES EXTERNAS
CONSTANTES DE FATIAS DE MAÇÃ DO TIPO GOLDEN DELICIOUS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro – Campus Macaé, como um dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.



Prof. Dr. Diego Cunha Malagueta



Profa. Dra. Elisa Pinto da Rocha



Eng. Mateus Barros Almeida

MACAÉ

2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que sempre me apoiaram e me incentivaram neste caminho. Tem sido uma longa jornada, mas que finalmente chega ao seu fim.

Agradeço a minha família que sempre foi meu suporte e meu porto seguro. Agradeço de coração à Mariana, por estar ao meu lado nas horas mais difíceis, pela preocupação, por sempre me dar forças e iluminar meu caminho.

Um muito obrigado ao meu querido orientador Prof. Dr. Diego Malagueta, o qual considero como amigo, que se dispôs a me ajudar todas as vezes que precisei, me recebendo sempre de braços abertos, sendo atencioso, paciente e bem-humorado.

RESUMO

A secagem convectiva depende, basicamente, dos parâmetros do ar externo de secagem, isto é, sua temperatura, umidade relativa e velocidade, e das características do material, como as suas propriedades físicas, sua geometria, sua quantidade de água, porosidade e outros. Muitas vezes, para a secagem de produtos agrícolas, as características do produto não podem ser alteradas. Assim, torna-se evidente que os parâmetros do ar possuem um papel de extrema importância para o processo, já que é a partir deles que é possível alterar a cinética de secagem do produto. Desse modo, o objetivo do presente estudo é compreender e analisar a influência dos parâmetros do ar externo (temperatura, velocidade e umidade relativa) sobre a secagem de um produto agrícola. O produto utilizado para o estudo foi a maçã do tipo Golden Delicious, a qual foi cortada transversalmente (em formatos de rodela) para os experimentos de secagem. Ao todos foram realizados quatro experimentos, alterando-se apenas um parâmetro de cada vez. Para o primeiro experimento de secagem, os parâmetros do ar foram de 55 °C, 15% de U.R. e 2 m/s. Para o segundo alterou-se apenas a velocidade do ar, o parâmetros foram de 55°C, 15% de U.R. e 3 m/s. No terceiro os parâmetros foram de 60 °C, 15% de U.R. e 2 m/s. No quarto experimento os parâmetros foram de 55°C, 10% de U.R. e 2 m/s. Para cada um dos experimentos, obteve-se a cinética de secagem, sendo possível compará-las posteriormente. Ao compará-las, constatou-se que todas as alterações dos parâmetros do ar, aceleraram as taxas de secagem, o que reduziu as o tempo em quase 50%. A velocidade do ar se mostrou mais efetiva durante o período inicial de secagem, quando os parâmetros externos de secagem que controlam o processo. Já a temperatura se mostrou eficiente durante todo o período de secagem, principalmente quando a secagem se torna dependente da difusão da água do interior do produto para o exterior. A umidade relativa também elevou as taxas de secagem, e ainda permitiu alcançar um teor de umidade final menor.

Palavras-chaves: Secagem convectiva, parâmetros do ar, transferência de calor, transferência de massa, taxa de secagem, cinética de secagem, maçã.

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1:** Diagrama do processo de secagem.
- FIGURA 2:** Diagrama da migração da umidade no interior de um sólido.
- FIGURA 3:** Evolução do movimento no interior do sólido durante secagem.
- FIGURA 4A:** Exemplos de secador convectivo de túnel.
- FIGURA 4B:** Exemplos de secador convectivos de bandejas.
- FIGURA 5:** Exemplos de secador condutivo de tambor.
- FIGURA 6A:** Exemplo de secador de radiação solar.
- FIGURA 6B:** Exemplo de secador de radiação infravermelho.
- FIGURA 7:** Representação do teor de umidade em base úmida e em base seca.
- FIGURA 8:** Isotermas de sorção.
- FIGURA 9:** Funções características da secagem convectiva.
- FIGURA 10:** Transferências de calor e massa entre o produto e o ar na secagem convectiva.
- FIGURA 11:** Transferências de calor e massa entre o ar e o produto através da camada limite.
- FIGURA 12:** Corte transversal da maçã.
- FIGURA 13:** Esquema do túnel de vento utilizado na secagem convectiva.
- FIGURA 14:** Secador do tipo túnel de vento do departamento do TREFLE.
- FIGURA 15:** Secador convectivo do departamento do TREFLE.
- FIGURA 16:** Exemplo de um analisador de umidade TGA.
- FIGURA 17:** Fatias da maçã utilizada no experimento.
- FIGURA 18:** Fatia de maçã posicionada sobre o suporte.
- FIGURA 19:** Representação genérica do fim do experimento de secagem.
- FIGURA 20:** Produto seco no final do experimento.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Evolução da produção de maçã no Brasil.

TABELA 2: Consumo de Frutas por habitante no Brasil.

TABELA 3: Classificação dos métodos para determinação do teor de umidade

TABELA 4: Métodos, suas vantagens e desvantagens.

TABELA 5: Atividade da água nos alimentos.

TABELA 6: Parâmetros do ar para cada experimento.

TABELA 7: Teor de umidade inicial para o produto utilizado em cada experimento.

TABELA 8: Massa inicial, teor de umidade e massa seca dos produtos nos experimentos.

TABELA 9: Resultados dos coeficientes de transferência externo e interno.

LISTA DE GRÁFICOS

- GRÁFICO 1:** Variação da massa dos produtos em função do tempo.
- GRÁFICO 2:** Evolução do teor de umidade em função do tempo.
- GRÁFICO 3:** Velocidade de secagem dos produtos em função do tempo.
- GRÁFICO 4:** Velocidade de secagem dos produtos em função do teor de umidade.
- GRÁFICO 5:** Razão de umidade das fatias de maçãs em função do tempo.
- GRÁFICO 6:** Logaritmo neperiano da razão de umidade, $\ln(RU)$, em função do tempo.

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

- ABPM – Associação Brasileira de Produtores de Maçã.
- BRDE – Banco Regional de Desenvolvimento do Extremo Sul.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
- FAO – Food and Agriculture Organization.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- ONU – Organização das Nações Unidas.
- PIB – Produto Interno Bruto.
- TREFLE - Transfert de Fluide Énergétiques.
- RU – Razão de umidade.
- UR – Umidade relativa.
- a_w – Atividade da água.
- a_{ws} – Atividade da água na superfície do produto.
- c_p – Capacidade térmica mássica à pressão constante
- D_{ef} – Coeficiente de difusão efetivo (m^2/s).
- h – Coeficiente convectivo de calor ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$).
- L – Espessura da placa (m).
- L_0 – Espessura inicial da placa (m)
- k_p – Coeficiente convectivo de massa ($kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot Pa^{-1}$)
- m – Massa (kg).
- $m_{\acute{a}gua}$ – Massa de água (kg).
- m_{seca} – Massa de matéria seca (kg).
- $\dot{m}_{\acute{a}gua}$ – Fluxo de massa (kg/s).
- n_1 – Número de mols do solvente (mol).
- n_2 – Número de mols do soluto (mol).
- p_0 – Pressão de vapor da água pura (Pa).
- $p_{0.\theta_{bu}}$ – Pressão de vapor da água na temperatura de bulbo úmido (Pa).
- p_v – Pressão de vapor (Pa).
- p_{vs} – Pressão de vapor da água na superfície do produto (Pa).
- p_v^* – Pressão de vapor da água do ar em contato com o sólido (Pa).
- pp_a – Pressão parcial de vapor de água no ar (Pa).

\dot{Q} – Fluxo de calor (W/s).

S – Superfície de troca em contato com ar (m^2).

t – Tempo (s).

U – Teor de umidade em base úmida ($kg_{\text{água}}/kg_{\text{produto}}$).

v_a – Velocidade do ar de convecção (m/s)

X – Teor de umidade em base seca ($kg_{\text{água}}/kg_{\text{matéria seca}}$).

X_{cr} – Teor de umidade crítico ($kg_{\text{água}}/kg_{\text{matéria seca}}$).

X_{eq} – Teor de umidade de equilíbrio ($kg_{\text{água}}/kg_{\text{matéria seca}}$)

X_f – Teor de umidade final ($kg_{\text{água}}/kg_{\text{matéria seca}}$).

ΔH_v – Calor latente de vaporização da água (kJ/kg).

$\theta_{Ambiente}$ – Temperatura do ambiente ($^{\circ}C$)

θ_a^* – Temperatura do ar em contato com o sólido ($^{\circ}C$)

θ_{bu} – Temperatura de bulbo úmido ($^{\circ}C$)

$\theta_{produto} = \theta_p$ – Temperatura do produto ($^{\circ}C$)

θ_{ps} – Temperatura na superfície do produto ($^{\circ}C$)

φ – Umidade relativa do ar (%)

φ_v^* – Umidade relativa do ar em contato com o sólido (%)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	CULTIVO E PRODUÇÃO DE MAÇÃ	15
2.2	PRINCÍPIOS DE SECAGEM.....	17
2.2.1	Métodos de Secagem	20
2.3	TEOR DE UMIDADE.....	22
2.3.1	Determinação do Teor de Umidade	24
2.4	ATIVIDADE DA ÁGUA.....	26
2.4.1	Influência de a_w nos Alimentos	28
2.5	SECAGEM CONVECTIVA POR AR QUENTE	30
2.5.1	Transferências Externas	33
2.5.2	Transferência Interna	36
3	MATERIAL E MÉTODOS	39
3.1	CINÉTICA DE SECAGEM EXPERIMENTAIS EM CONDIÇÕES EXTERNAS CONSTANTES	39
3.1.1	Coefficientes de Transferência Externo	40
3.1.2	Coefficiente de Difusão	42
3.2	LOCAL	44
3.3	MATÉRIA PRIMA	44
3.3.1	Cortes	45
3.4	SECADOR TÚNEL DE VENTO.....	45
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	48
4.1	TEOR DE UMIDADE DAS MAÇÃS	48
4.2	EXPERIMENTOS DE SECAGEM.....	49
4.2.1	Temperatura, UR, e velocidade do ar.	49
4.2.2	Secagem	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52

	XI
5.1	TEOR DE UMIDADE..... 52
5.2	SECAGEM 52
6	CONCLUSÃO 62
7	BIBLIOGRAFIA 65

1 INTRODUÇÃO

A produção de alimentos no Brasil cresceu extraordinariamente nos últimos 50 anos. O país saiu da condição de importador de alimentos para um dos mais importantes produtores e exportadores no mundo. Os benefícios dessa condição possibilitaram preços mais acessíveis aos consumidores, elevaram a renda e a geração de empregos e impulsionaram a participação da agricultura no Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro. A disponibilidade de recursos naturais, associada a políticas públicas, a competências técnico-científicas e ao empreendedorismo dos agricultores brasileiros foram fundamentais para esse desenvolvimento agrícola do país (EMBRAPA, 2018).

De acordo com ABRAMOVAY (1996), durante essa expansão agrícola, a oferta de alimentos foi considerada sob três aspectos básicos: 1) pelo aumento da área plantada; 2) pelo aumento da área produtiva; 3) pelo aumento de números de safras durante a sazonalidade. Entretanto, aumentar a produção de alimentos, não se mostrou como arma eficiente para reduzir a fome e a miséria. Prova disso, é segurança alimentar do Brasil, que mesmo com o incrível aumento da produção de alimentos, segundo a FAO, o país só saiu do mapa mundial da fome da ONU em 2014.

A fome afeta milhares de seres humanos em todas as partes do globo, no entanto, baseado em um estudo da FAO (2002), a produção de alimentos já é mais que suficiente para erradicá-la do mundo. Colocar o alimento ao alcance das pessoas não é apenas uma questão de elevar a produção global, além disso é preciso garantir que chegue ao consumidor final. Aumentar a oferta, portanto, não garante o crescimento proporcional da disponibilidade de alimento, concretizando, desta maneira, que o problema se trata da distribuição e do desperdício de alimentos, do que propriamente ao desenvolvimento de novas tecnologias para alcançar níveis extraordinários de produtividade agrícola. Nesse sentido, é preciso que haja uma maior conscientização com relação aos desperdícios, que deve envolver todos atores participantes da cadeia produtiva (MARTINS, 2002). Na compreensão da extensão dos desperdícios, as perdas que ocorrem em produtos agrícolas, chegam a equivaler a 7,8% do PIB brasileiro, algo próximo aos R\$ 10 bilhões (JARDINE, 2002).

Muitos são os fatores que contribuem aos desperdícios de alimentos. As principais razões encontram-se na falta de conhecimento técnico, no uso de máquinas inadequadas, de

peçoal treinado e habilitado, no uso de prticas inadequadas de produo e principalmente no desconhecimento de tcnicas adequadas de ps-colheita (CENCI, 2000).

Este cenrio se torna mais evidente quando se trata de cadeias produtivas em que os produtos so altamente perecveis, como o caso das frutas e hortalias. A grande quantidade de gua presente nas frutas juntamente com a falta de cuidados, infraestrutura e de tcnicas de preservao faz com que mais de um tero da produo seja perdida entre a colheita e o consumidor (MARTINS, 2002; MUJUMDAR, 2011).

Atrelado a isto, percebe-se mudanas nas tendncias da sociedade moderna. O consumidor tem se tornado cada vez mais preocupado com as dietas atuais e tem buscado alimentos mais saudveis e nutritivos (MUJUMDAR, 2014; FERNANDES, 2015).

Diversas tcnicas de processamento de alimentos tm sido empregadas em escala industrial para preservao de frutas e vegetais. Os principais deles so o enlatamento em conservas, congelamento e a desidratao. Um dos principais objetivos do processamento de alimentos o converter um alimento perecvel em um produto estvel, que pode ser armazenado durante longos perodos de tempo para reduzir as perdas ps-colheitas, estendendo a disponibilidade de produtos sazonais com a manuteno de seu valor nutritivo. Dentre estes, a desidratao o que mais tem ganhado mais destaque atualmente (MUJUMDAR, 2014).

Apesar de ser a tcnica mais antiga de preservao de alimentos praticada pela humanidade, o aumento nos custos de energia tem promovido um crescimento dramtico no interesse em secagem por todo mundo na ltima dcada. As tcnicas de desidratao, tem como objetivo a remoo da gua (ou umidade) do interior do produto, prevenindo o crescimento e a reproduo de microrganismos que causam seu apodrecimento e minimizando muitas reaes de deteriorao que necessitam da umidade. Alm disso, h uma reduo considervel no peso e volume do produto, minimizando os custos de embalagem, armazenamento e transporte, e permite o armazenamento do produto em temperaturas ambientes durante longo perodo de tempo, sem a necessidade de refrigerao (MCMINN, 1999).

Muitos avanos em tcnicas de secagem e o desenvolvimento de novos mtodos tem aumentado seu alcance, tornando a secagem possvel para uma grande quantidade de produtos, de frutas a vegetais. O resultado o um produto estvel com propriedades e qualidades que no poderiam ser vistas alguns anos atrs. (MUJUMDAR, 2014). Para as diferentes tcnicas de secagem, o necessrio que haja uma fonte de energia, capaz de fornecer calor para evaporao da umidade do produto. O fornecimento de energia define o mtodo de secagem utilizado, sendo por conduo, convecção e radiao. Uma vez que os produtos alimentcios, como frutas e vegetais, so extremamente sensveis ao calor e suscetveis a deteriorao devido a altas

temperaturas, a secagem convectiva é a que mais tem sido utilizada para esses produtos, pois permite um maior controle das condições de secagem e a obtenção de um produto de maior qualidade (MCMINN, 1999).

Um desses produtos que sofreu um grande aumento na produção nas últimas décadas foi a maçã. Sua produção aumentou em mais de 900% desde a década de 70, e o Brasil passou a estar entre os dez maiores produtores e exportadores do fruto (ABPM, 2016). Entretanto, apesar dos esforços para aumentar a produção, as técnicas de pós-colheita não cresceram proporcionalmente. A maçã possui mais de 80% de água o que a torna extremamente sensível a ação de bactérias, fungos e microrganismos que causam sua deterioração. Em contrapartida, torna-se também uma excelente matéria prima para o processo de secagem, uma vez que é possível reduzir consideravelmente sua massa através da remoção da umidade, permitindo obter um produto estável e ao mesmo tempo de alto valor nutricional.

Mesmo sendo um dos mais antigos métodos de preservação utilizado pelo homem, a secagem era (e muitas vezes ainda é) baseada mais em experiências práticas do que em conhecimentos teóricos. Isso porque a secagem é uma das operações mais complexas e menos entendidas devido as dificuldades e deficiências em descrições matemáticas dos fenômenos simultâneos de troca de calor de massa durante sua operação. Assim, a secagem se torna um conjunto de ciência, tecnologia e arte (ou know-how baseado em experiências operacionais e observacionais) (MUJUMDAR, 2014).

1.1 OBJETIVO

Compreender os mecanismos de transferência de calor e massa de um produto vegetal durante o processo de secagem convectiva, tomando a maçã como o produto de estudo.

Realizar diferentes experimentos de secagem convectiva em fatias de maçãs com condições externas constantes, alterando-se em cada experimento apenas um parâmetro.

Demonstrar a influência dos parâmetros do ar sobre a cinética de secagem de um mesmo produto.

Comparar as curvas de secagem e seus coeficientes de troca de calor e massa, a partir dos experimentos realizados com as fatias de maçã.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CULTIVO E PRODUÇÃO DE MAÇÃ

A maçã é, dentre as frutas de clima temperado cultivadas no Brasil, aquela que apresentou maior expansão em área plantada e em volume de produção nas últimas décadas, na qual mais de 95% da produção nacional está concentrada na Região Sul do país (RIZZON, 2005; RECH, 2014).

De acordo com a Associação Brasileira de Produtores de Maçã (ABPM, 2016), o Brasil passou de um país importador de maçãs para exportador nos anos 2000, tendo aumentado sua produção de 15 mil toneladas por ano para mais de 1 milhão, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Evolução da produção de maçã no Brasil.

Década	Toneladas
1970 - 80	13.262
1980 - 90	183.299
1990 - 00	519.845
2000 - 2010	890.626
2010 - 2015	1.185.188

Fonte: (IBGE/ABPM 2016).

No Brasil, segundo ASSIS (2013), a maçã do tipo Gala representa cerca 46% da produção total, a variedade Fuji 45% e a Golden Delicious representa 6% da produção e os outros 3% são compostos por outras variedades. Em comparação com o cultivo de maçã em outros países, verifica-se que na China, segundo CASTELLARNAU (2004), mais de 50% da produção é da variedade Fuji. Nos EUA, 31% da produção é de Red Delicious, 13% de Golden, 9% de Gala 8% de Fuji, 6% de Granny Smith e 1% de Braeburn. Já nos países da União Européia 36% da produção é da variedade Golden, 10% Red Delicious e Granny Smith, 9% Gala, 3% de Braeburn e 1% de Fuji.

Com o aumento da produção e a redução nos preços do produto, o consumo de maçã aumentou significativamente no país, sendo a terceira fruta mais consumida no Brasil, ficando atrás somente da banana e da laranja, como pode ser visto na Tabela 2 (ABPM, 2016).

Tabela 2 - Consumo de frutas por habitante no Brasil (kg/hab/ano).

Produto	Total	Homem	Mulher
Laranja	7,5	7,4	7,6
Banana	6,8	6,7	6,9
Maçã	4,2	3,5	4,9
Mamão	2,3	1,7	2,9
Manga	1,7	1,8	1,6
Tangerina	1,6	1,5	1,8
Melancia	1,5	1,3	1,8
Açaí	1,1	1,3	0,9
Abacaxi	0,5	0,4	0,6
Uva	0,4	0,5	0,4

Fonte: (ABPM, 2016).

Da produção total, 70 % são para consumo *in-natura* e 30% seguem para a indústria, sendo que metade desta é utilizada para a fabricação de diversos tipos de sucos e o restante para outros produtos como purê de maçã, chips, *etc* (BRDE, 2011).

A maçã contém uma grande quantidade de água, cerca de 85% em massa e seu consumo está ligado à uma vida saudável, devido à grande quantidade de benefícios trazido pela fruta à saúde (ATUNGULU *et al.*, 2004). Segundo BOYER E LIU (2004) uma única maçã fornece cerca de 14% do valor diário recomendado de vitamina C, além disso, é rica em fibras, o que auxilia na regulação do intestino, vitaminas do tipo B, E e flavonoides – substâncias com qualidade anti-inflamatórias, anti-hemorrágicas e antialérgicas. A maçã também possui antioxidantes que ajudam a combater os radicais livres, o que ajuda na saúde da pele, retarda o envelhecimento e previne doenças.

Com o aumento da produção, um dos problemas enfrentados pelos fruticultores, em grande parte, é a perda da colheita até a chegada ao mercado consumidor, estimada em até 40%. Uma das principais causas é a deterioração do produto devido à grande quantidade de água livre

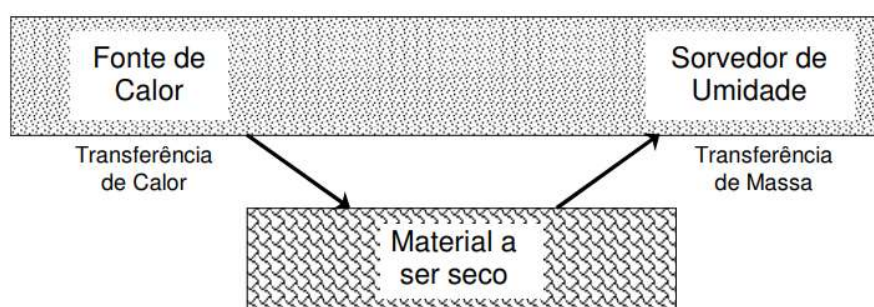
presente no fruto. Desse modo, torna-se necessário a utilização de métodos de conservação que tenham como objetivo tornar o alimento mais estável (MACHADO, 2011; VALENTE, 2007).

Ademais, tem se tornado perceptível que a produção de mais e melhores alimentos, por si só, não é suficiente e deve andar de mãos dadas com técnicas adequadas de conservação pós-colheita. A redução da umidade do produto diminui consideravelmente seu peso e volume, reduzindo também os custos de embalagem, armazenamento e transporte e ainda permite que o produto seja armazenado em condições ambientais por longos períodos, normalmente maiores que 3 anos, sem a perda de suas propriedades nutricionais e organolépticas (ROSSI & ROA, 1980; KROKIDA & MARINOS-KOURIS, 2003, MUJUMDAR, 2014). Assim, com o crescimento do consumo de frutas secas, a secagem de maçãs tem sido uma alternativa inteligente para o problema, uma vez que o processo aumenta o tempo de vida do produto sem que haja deterioração de seus nutrientes, tornando a fruta estável e consumível por um período muito mais longo.

2.2 PRINCÍPIOS DE SECAGEM

A secagem é o processo de remoção de uma substância volátil (ou umidade) de um produto sólido ou de um líquido pela evaporação dessa substância, com o propósito de obter um produto sólido de umidade mais baixa (KEEY & DANCKWERTS, 1972; MUJUMDAR, 2011; BERK, 2018). Segundo PARK (2007), é necessário, portanto, que durante a secagem haja um fornecimento de calor para evaporar a umidade do material e também deve haver um sorvedor de umidade para remover o vapor de água, formado a partir da superfície do material a ser seco, como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Diagrama do processo de secagem.



Fonte: PARK, 2007.

Se a fonte de calor fornece energia suficiente a qual permita elevar a pressão de vapor da umidade na superfície do sólido até a pressão atmosférica, então a água será eliminada por ebulição, o que ocorre quando a temperatura atinge o ponto de ebulição. Caso o produto permaneça a uma temperatura inferior à temperatura de ebulição, então a umidade em sua superfície será removida graças a evaporação.

A energia fornecida pela fonte calor pode ocorrer através da condução, radiação, convecção ou através de outros métodos menos comuns, como é o caso do fornecimento de energia por micro-ondas. A forma pela qual o calor é fornecido definirá o método de secagem e o equipamento utilizado, além disso, mais de um método pode estar envolvido no processo de transferência de calor (MASKAN, 2002).

Contudo, para que água seja removida da superfície do material, a umidade deve ser transportada do interior do sólido até a superfície, como é demonstrado pela Figura 2.

Figura 2 - Diagrama da migração da umidade no interior de um sólido.



Fonte: PARK, 2007.

Dessa forma, quando um sólido está sujeito a secagem, dois processos ocorrem simultaneamente:

1. Transferência de energia (calor) do meio para o produto, para que haja vaporização da umidade superficial.
2. Transferência interna de umidade em direção à superfície do sólido.

A transferência de umidade no interior do sólido pode ocorrer por diferentes tipos de mecanismos de transferência de massa como, por exemplo, a difusão líquida, por ação capilar (ou capilaridade), a difusão de vapor, a diferença de pressão ou difusão de Knudsen, se a secagem acontece em temperaturas e pressões muito baixas (MUJUMDAR, 2014).

A difusão da umidade ocorre devido ao gradiente entre o interior do sólido, onde a concentração de umidade é maior, e sua superfície, onde sua umidade é baixa, que se forma

durante o processo de secagem. Este método de transporte é limitado a casos onde o material é formado por uma solução sólida de fase única com a umidade, como no sabão, na cola, na gelatina e alguns casos de secagem, como na secagem das últimas porções de água da argila, farinha, tecidos, papel e madeira. Geralmente, a difusão da umidade diminui rapidamente à medida que a água é removida de seu interior (TREYBAL, 1980).

A umidade no interior de sólidos porosos e granulados, tais como argila, areia e pigmentos de tintas, também se move através dos capilares e interstícios do sólido por um mecanismo envolvendo tensão superficial, denominado capilaridade. Os capilares se estendem de pequenos reservatórios de umidade até a superfície de secagem. O movimento por capilaridade ocorre nos primeiros momentos da secagem, que é rápida o suficiente para manter a umidade na superfície uniforme. Conforme a secagem ocorre, os reservatórios de umidade vão se esgotando, e pouco a pouco a umidade vai sendo substituída por ar, reduzindo o movimento por capilaridade, até que poro se torne completamente seco (PARK, 2007; TREYBAL 1980).

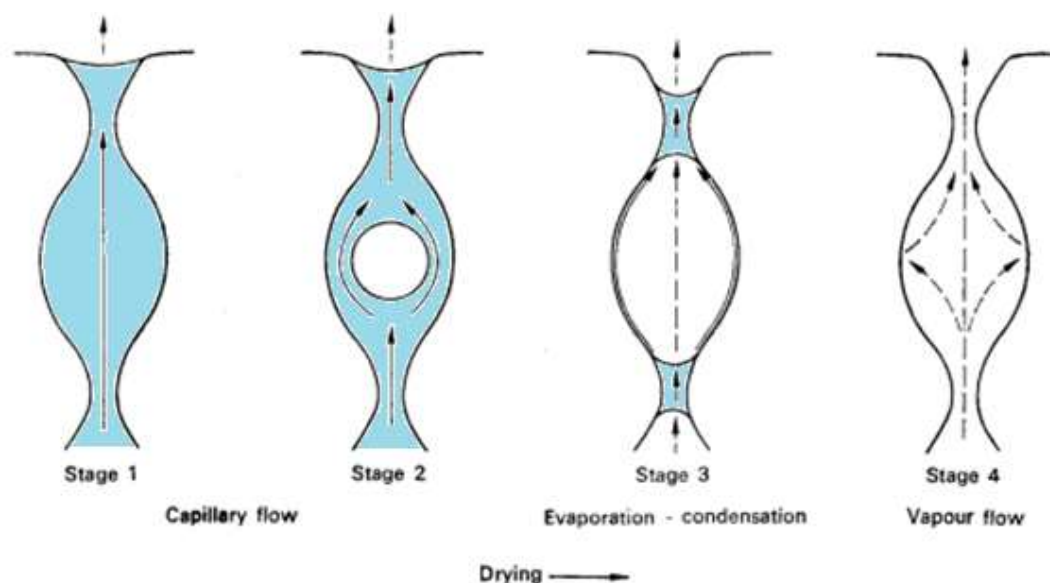
A umidade também pode ser evaporada abaixo da superfície úmida do sólido, em regiões que se encontram mais isoladas. O vapor então se difunde pelo sólido até a superfície ou até algum outro reservatório no qual pode vir a se condensar novamente.

Outro mecanismo de transporte interno de umidade que tem sido especulado é devido à pressão interna. O encolhimento sofrido pelo sólido durante a secagem pode gerar um aumento na pressão interna, expulsando a umidade do seu interior.

É importante ressaltar que durante a secagem não ocorre apenas um tipo de transporte interno de umidade, normalmente ocorre mais de um ao mesmo tempo, e que, à medida que a secagem ocorre, as estruturas físicas do sólido estão sujeitas a mudanças, portanto os mecanismos de transporte interno variam de acordo com o tempo. Uma exemplificação da evolução do transporte interno de umidade pode ser vista na Figura 3 (KEEY E DANCKWERTS, 1972; PARK, 2007; MUJUMDAR, 2014).

Durante o processo 1, a remoção de água como vapor da superfície do material depende das condições externas de secagem, como a temperatura e o fluxo de ar. No processo 2, o transporte da umidade no interior do sólido varia em função das características físicas do material e sua complexidade, da temperatura e seu teor de umidade. Durante as operações de secagem qualquer um desses processos pode ser o fator limitante, isto é, aquele que governa a taxa de secagem, mesmo que ocorram simultaneamente durante a secagem (MUJUMDAR, 2014).

Figura 3 - Evolução do movimento no interior do sólido durante secagem.



Fonte: KEEY E DANCKWERTS, 1972.

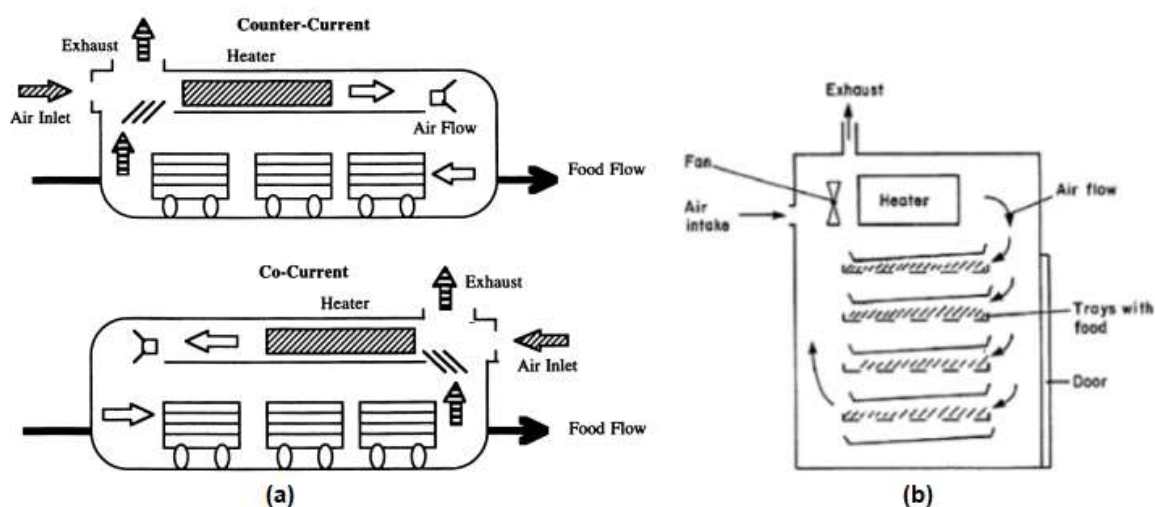
2.2.1 Métodos de Secagem

O método de secagem pode ser dividido pela forma na qual o calor é transferido para o material. A energia necessária para a evaporação da umidade pode ser fornecida através da condução, convecção, radiação, por micro-ondas ou sistemas dielétricos e, em alguns casos, pode ocorrer com a combinação desses métodos (MASKAN, 2002).

Micro-ondas e sistemas dielétricos fornecem energia a partir de ondas eletromagnéticas que aquecem o material ao interagir com ele, por isso possuem a vantagem de fornecer calor diretamente ao seu interior, sem depender da condução de calor da superfície para o interior, mas mesmo assim ainda são pouco utilizados industrialmente, devido ao custo muito elevado envolvido em sua operação (MUJUMDAR, 2014).

Mais de 85% dos secadores industriais são do tipo convectivo que utilizam ar aquecido ou gases de combustão direta como meio de secagem (CHIRIFE, 1983; MUJUMDAR, 2014). Esses secadores utilizam a temperatura, a umidade relativa e a velocidade do ar como parâmetros para controlar as taxas de secagem e possuem uma certa segurança contra o superaquecimento do produto, uma vez que sua temperatura nunca será maior que a do ar. Apesar de sua simplicidade, os secadores convectivos são termicamente ineficientes já que parte da energia utilizada na secagem é perdida junto com os gases descartados (KEEY E DANCKWERTS, 1972). A Figura 4 ilustra dois secadores convectivos mais utilizados.

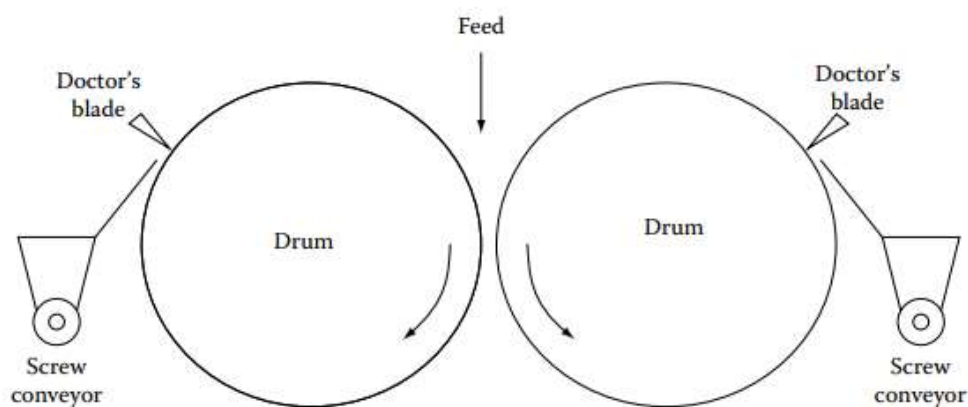
Figura 4 - Exemplos de secadores convectivos. (a) Secador de túnel; (b) Secador de bandejas.



Fonte: CANOVAS, 1996.

O secador condutivo precisa estar em contato com o produto para aquecê-lo. O calor necessário para a evaporação da umidade é fornecido por superfícies aquecidas que suportam ou confinam o material, tais como: bandejas, placas, cilindros ou paredes de secadores. Neste método as perdas térmicas são menores, entretanto as temperaturas alcançadas são maiores do que as utilizadas nos secadores convectivos. A Figura 5 ilustra um secador de tambor, muito utilizado para produto viscosos ou pastosos (KEEY E DANCKWERTS, 1972; PARK, 2007).

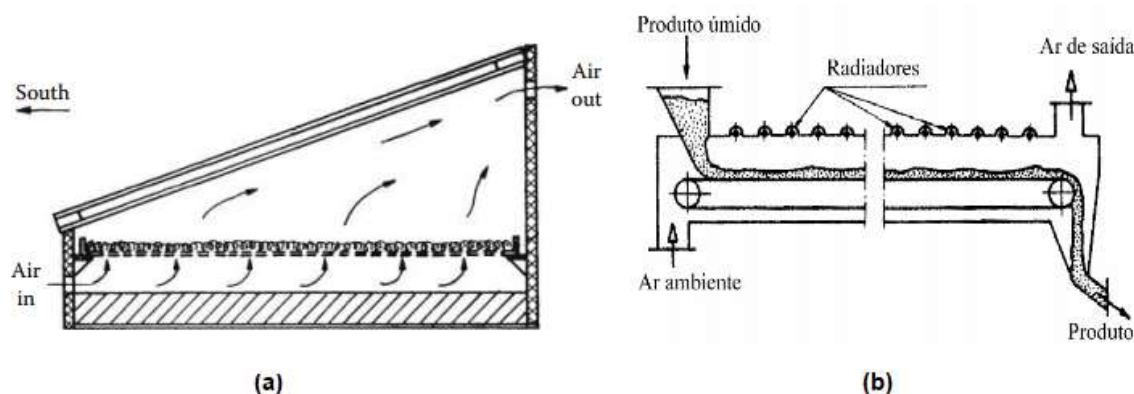
Figura 5 - Secador de tambor duplo. Quando o secador é alimentado, o produto é esmagado contra os dois tambores aquecidos, o que faz com que ele fique agarrado ao tambor, sendo removido posteriormente pela lâmina.



Fonte: MUJUMDAR, 2014.

A energia térmica também pode ser suprida através de fontes que emitem radiação eletromagnética. Uma das principais fontes de energia eletromagnética é o sol, muito utilizado em secagens mais arcaicas, que mesmo sendo uma fonte gratuita de energia, ela não é constante, o que a torna pouco confiável (MUJUMDAR, 2014; PARK, 2007). Exemplos de secadores por radiação podem ser visto na Figura 6.

Figura 6 - Secadores que utilizam radiação como método de secagem. **(a)** Secador solar. **(b)** Secador industrial com fontes de radiação infravermelha.



Fonte: (a) MUJUMDAR, 2014. (b) PARK, 2007.

2.3 TEOR DE UMIDADE

Todo produto que será submetido a secagem é constituído por uma certa quantidade de água e matéria sólida. Assim, é necessário saber a relação entre dois. Para isto utiliza-se uma medida chamada de teor de umidade, grau de umidade ou conteúdo de água.

O teor de umidade de um produto representa a proporção entre a massa de água presente no material e a massa de matéria seca contida no mesmo. Segundo VASSEUR (2007), o teor de umidade pode ser definido de duas maneiras diferentes:

- Com relação à massa total do produto com água: U (kg água / kg produto), $0 < U < 1$, conhecido como “Base úmida”

$$U = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{água}} + m_{\text{seca}}} \quad (1)$$

- Em relação a massa de matéria seca presente: X (kg água / kg matéria seca), $X > 0$, conhecida base seca.

$$X = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{seca}}} \quad (2)$$

onde, $m_{\text{água}}$ é a massa de água contida no produto e m_{seca} é a massa de matéria seca do alimento. A Figura 7 ilustra a diferença entre os modos de calcular o teor de umidade.

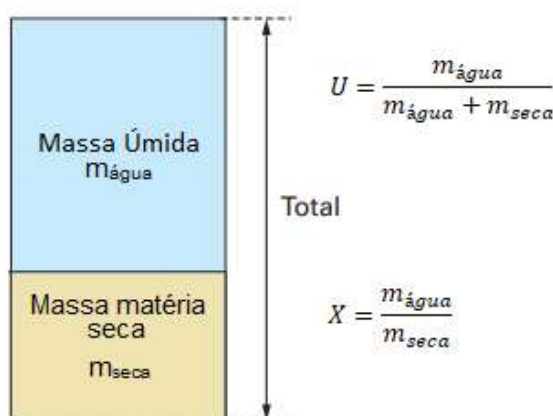
É possível converter o teor de umidade de uma base para outra através das relações abaixo:

$$X = \frac{U}{(1 - U)} \quad (3)$$

$$U = \frac{X}{(1 + X)} \quad (4)$$

onde a Equação 3 é utilizada para converter de base úmida para base seca e a Equação 4 é utilizada para converter de base seca para base úmida.

Figura 7 - Representação do teor de umidade em base úmida e em base seca.



O teor de umidade em base úmida é normalmente utilizado em práticas industriais, como armazenagem e transações comerciais. Já o conteúdo de água em base seca é mais utilizado para cálculos nos secadores e para pesquisas científicas, porque a mudança necessária no peso para redução de cada ponto de umidade na base seca é constante, enquanto que na base úmida a quantidade de água envolvida na redução de um por cento do teor de umidade se modifica no

decorrer da secagem, ou seja, durante a secagem a massa de água de varia com o tempo enquanto que a massa seca permanece constante ao longo (SILVA, 2001).

Há muito tempo é reconhecido que há uma relação, embora imperfeita, entre o teor de umidade e a deterioração do alimento. Por este motivo, os processos de desidratação são realizados com intuito de diminuir o teor de umidade e, ao mesmo tempo, aumentar a concentração de solutos do alimento, diminuindo sua perecibilidade.

Contudo o teor de umidade não pode ser utilizado como único parâmetro para definirmos a perecibilidade de um alimento, uma vez que diferentes alimentos com mesmo teor de água podem apresentar uma grande diferença em sua perecibilidade. Isto é atribuído às diferenças na intensidade ao qual a água está associada aos componentes não-aquosos, ou seja, ao quão disponível está água contida no alimento, e para isto utiliza-se um outro parâmetro, chamado de atividade da água (a_w) (FENNEMA *et al.*, 2017).

2.3.1 Determinação do Teor de Umidade

Os métodos para determinação do teor de umidade podem ser classificados em função de um dos quatro princípios utilizados – secagem, destilação, químico ou físico – ou em função do procedimento empregado, podendo ser direto ou indireto, conforme pode ser visto na Tabela 3. Nos métodos diretos, a análise da umidade normalmente envolve a remoção da água contida em uma amostra do sólido por secagem, destilação, extração ou outro método, no qual a água removida é medida pela pesagem, titulação, ou outra forma qualquer. Já para os métodos indiretos, a umidade não é removida da amostra e quantificada diretamente, ao invés disso, avalia-se alguma propriedade do produto que depende da quantidade de água, ou de átomos de hidrogênio, que existe em seu interior (PARK E BELL, 2002).

O método direto mais utilizado é o da secagem em estufa, por ser o mais simples e barato. Este método consiste em pesar uma amostra, secá-la em uma estufa e pesá-la novamente, de acordo com procedimentos padronizados. A secagem em estufa à vácuo utiliza pressões menores que a pressão atmosférica para diminuir o ponto de ebulição da água e acelerar a remoção de umidade da amostra, sendo especialmente usada para produtos muito sensíveis a temperaturas mais elevada, suscetíveis a decomposição de seus componentes. As técnicas termogravimétricas consistem em monitorar a variação da massa de uma amostra enquanto ela é aquecida a uma taxa controlada, podendo ser considerado um processo automatizado do método da estufa. Nos métodos de estufa ou termogravimétricos, a umidade é sempre separada

do sólido, não havendo distinção entre a água e outros componentes do produto facilmente voláteis (SILVA, J.S. E CARVALHO, 1980; PARK, 1996).

Tabela 3: Classificação dos métodos para determinação do teor de umidade.

Classificação pelo Princípio	Classificação pelo Procedimento
<i>Métodos de secagem</i>	<i>Método Diretos</i>
Secagem à vácuo	Secagem em estufa
Termogravimetria	Liofilização
Secagem em estufa	Destilação simples
Liofilização	Secagem à vácuo
<i>Métodos de Destilação</i>	Termogravimetria
Destilação simples	Titulação de Karl-Fischer
<i>Métodos Químicos</i>	<i>Métodos Indiretos</i>
Titulação de Karl-Fischer	Absorção de IR
<i>Métodos Físicos</i>	Condutividade
Absorção de IV	Capacitância dielétrica
Capacitância dielétrica	Absorção de microondas
Condutividade	
Absorção de microondas	

Fonte: (PARK E BELL, 2002).

Os métodos indiretos, são técnicas que utilizam radiação infravermelha (IV), microondas, ultrassom, espectroscopia, condutividade e outros. São geralmente mais rápidos para a determinação da umidade, contudo necessitam de um equipamento especial para análise da umidade no produto. Quando realizado de maneira correta, os métodos indiretos podem ser tão exatos e precisos quanto os métodos diretos. Mesmo assim, os equipamentos precisam ser calibrados através de métodos diretos para serem confiáveis (BOTTOM, 2008).

Sabe-se que os métodos diretos geralmente fornecem valores mais precisos para o teor de umidade, entretanto são ditos “destrutivos”, uma vez que após o ensaio, as amostras não podem mais ser utilizadas. Já os métodos indiretos são mais rápidos e podem ser automatizados, oferecendo a possibilidade de medição contínua, porém são mais caros, já que necessitam de equipamentos e uma constante calibração (PARK & BELL, 2002). Na Tabela 4 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, são demonstrados alguns métodos, suas vantagens e desvantagens.

Tabela 4: Métodos, suas vantagens e desvantagens.

Método	Vantagens	Desvantagens
Secagem em estufa	Método convencional padrão	Variação da temperatura devido a posição
	Grande numero de amostra	Perda de componentes voláteis
	Aquece rapidamente	Decomposição da amostra
	Relativamente rápido e preciso	Possível perda de componentes voláteis
Secagem em estufa à vácuo	Aquecimento à baixas temperaturas	Menor número de amostras
	Previne a decomposição das amostras	
	Aquecimento uniforme e constante	Maior gasto energético
Liofilização	Excelente para produtos sensíveis	Custo elevado
	Preserva a textura e aparência	Longo período de secagem
	Não há formação de crostas	O produto precisa estar congelado
	Não há oxidação	Aplicado para produtos com alto teor de umidade
	Sem mudanças devido a bactérias	
Termogravimetria	Método automatizado	Amostra reduzida pode não ser representativa
	Tamanho reduzido da amostra	
	Erro de pesagem reduzido	Amostra pode se decompor ou oxidar
Condutividade	Medição instantânea	Avalia apenas água livre
	Não destrutivo	Cartas de conversão são necessárias para se obter o valor total da umidade

Fonte: PARK E BELL, 2002.

2.4 ATIVIDADE DA ÁGUA

O termo mais geral utilizado para definir a disponibilidade de água em um ambiente particular é o de atividade da água (FENNEMA *et al.*, 2017). Água é o mais importante e abundante componente em todos alimentos, podendo ser encontrada na forma de água livre (ou não ligada) e água ligada.

De acordo com PUIGALLI (1995), a água livre se encontra no interior dos poros e nos espaços intergranulares dos alimentos, preenchendo os espaços vazios, funciona como um solvente, estando disponível para reações químicas e crescimentos microbianos. A água livre

possui as características físico-químicas muito próximas a da água pura e, portanto, necessitam de pouca energia para serem retiradas do interior do alimento (CANOVAS, 1996).

A água ligada é aquela que se encontra ligada quimicamente com elementos presentes dos alimentos. OKOS *et al.* (1992) e LEUNG (1986) a definiram como sendo a água que exibe uma pressão de vapor menor, menor mobilidade e um ponto de congelamento bem menor que o da água pura. Este tipo de água não está disponível para o crescimento microbiano, uma vez que não pode ser utilizada como solvente. Assim, por estar fortemente ligadas às moléculas do alimento, é extremamente difícil de ser retirada, necessitando de uma grande quantidade de energia (RAHMAN 2009; CANOVAS, 1996).

A atividade da água (a_w) se baseia na Lei de Raoult para soluções ideais e não leva em consideração a interação entre solutos e qualquer outro componente que não seja a água. De forma simples, temos que:

$$a_w = \frac{p_v}{p_0} = \frac{n_1}{n_1 + n_2} \quad (5)$$

Onde n_1 é o número de mols do solvente (água); n_2 é o número de mols do soluto; p_v é pressão de vapor da solução e p_0 é a pressão de vapor da água pura para mesma temperatura.

A atividade da água nada mais é que a quantidade de água efetiva expressa em fração molar, a qual pode ser representada pela umidade relativa que é atingida no equilíbrio em um ambiente fechado onde um produto higroscópico foi colocado. Desta forma, consideramos que a água pura possui atividade igual a 1 e todas outras soluções possuem valores menores que 1 (FENNEMA *et al.*, 2017).

Segundo BONAZZI (2003), o equilíbrio entre o produto e a atmosfera que o envolve é definido pelas duas igualdades dadas a seguir:

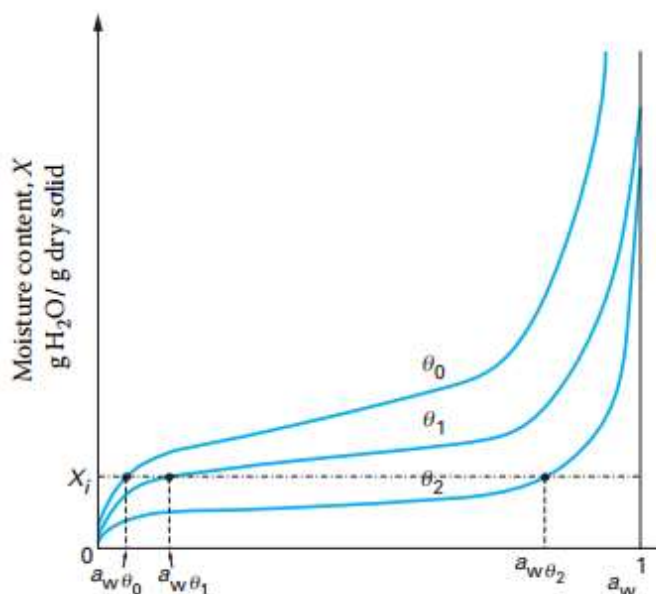
$$\begin{aligned} \theta_{Produto} &= \theta_{Ambiente} \\ \varphi &= a_w \end{aligned}$$

Onde $\theta_{Produto}$ é a temperatura do produto, $\theta_{Ambiente}$ é a temperatura na qual o produto está inserido e φ é a umidade relativa do ar.

Este equilíbrio é caracterizado pelas isotermas de sorção, que representam a variação de a_w em função do teor de água em base seca (X) do produto, para uma dada temperatura. A Figura 8, a seguir, demonstra a influência da temperatura sobre as curvas de sorção. Pode-se

perceber que, para um teor de umidade X_i constante, quanto maior a temperatura, menos higroscópico se torna o produto, ou seja, menor a quantidade de água adsorvida (BONNAZZI, 2003; VASSEUR, 2009).

Figura 8: Isotermas de sorção, ($\theta_0 < \theta_1 < \theta_2$). O aumento da temperatura torna a água do produto mais “livre”



Fonte: VASSEUR, 2009

A isoterma de sorção permite igualmente de prever o teor de água mínimo que um produto pode atingir ao ser colocado em um ambiente com uma temperatura e umidade pré-determinados. Basta considerarmos que no equilíbrio teremos $a_w = \varphi$, $X_{final} = X_{equil}$ e $\theta_{produto} = \theta_{ar}$.

2.4.1 Influência de a_w nos Alimentos

William James Scott em 1953 mostrou que a atividade da água está relacionada à precibibilidade dos alimentos e demonstrou que os microrganismos têm um nível de a_w limitante para o seu crescimento. Desta forma, a atividade da água é uma propriedade mais importante que a quantidade total de água quando se deseja determinar a estabilidade do alimento. Desde então a comunidade científica utiliza a_w como parâmetro para determinar as características

físicas, o tempo de prateleira (data de validade) e características sensoriais dos alimentos (RAHMAN, 2009).

A atividade da água é o principal fator para se determinar o crescimento microbiano, a produção de toxinas e as reações enzimáticas e não-enzimáticas em alimentos (LEUNG, 1986). Existe um valor crítico para a_w no qual nenhum microrganismo se desenvolve. Para a maioria dos alimentos, este valor situa-se no intervalo de a_w entre 0,6 - 0,7. Entretanto, para bactérias patogênicas, seu crescimento encontra-se no intervalo de 0,85 - 0,86, enquanto que para leveduras e fungos este valor é de 0,80. Normalmente considera-se que nenhum crescimento ocorre para valores de a_w inferior a 0,62 (CHIRIFE & BUERA, 1994). Os valores de a_w para o crescimento de cada tipo de microrganismo pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5: Importância da atividade da água nos alimentos.

a_a	Fenômeno	Exemplo
1,00		Alimentos frescos altamente perecíveis
0,95	Inibição de <i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Clostridium perfringens</i> e outras leveduras	Alimentos com 40% de sacarose ou 7% de sal, salsichas cozidas, pão
0,90	Limite inferior para o crescimento microbiano (geral), inibição de <i>Salmonella</i> , <i>Vibrio parahaemolyticus</i> , <i>Clostridium botulinum</i> , <i>Lacotobacillus</i> e algumas leveduras e fungos	Alimentos com 55% de sacarose, 12% de sal, presunto curado, queijos levemente maturados. Alimentos com umidade intermediária ($a_a = 0,90 - 0,55$)
0,85	Inibição de muitas leveduras	Alimentos com 65% de sacarose, 15% de sal, salame, queijo maturado, margarina
0,80	Limite inferior para a maioria das atividades enzimáticas e crescimento da maioria dos fungos; inibição de <i>Staphylococcus aureus</i>	Farinha, arroz (15 a 17% de água), bolo de frutas, leite condensado, xaropes de frutas, glacê
0,75	Limite inferior para bactérias halofílicas	Marzipã (15 a 17% de água), doces de frutas
0,70	Limite inferior para o crescimento da maioria dos fungos xerofílicos	
0,65	Velocidade máxima para a reação de Maillard	Flocos de aveia (10% de água), caramelo, melados, nozes
0,60	Limite inferior para o crescimento de leveduras e fungos osmofílicos ou xerofílicos	Frutas desidratadas (15 a 20 % de água), balas de caramelo (8% de água), mel
0,55	O ácido desoxirribonucléico toma-se desordenado (limite inferior para continuação da vida)	
0,50		Alimentos desidratados ($a_a = 0$ a 0,55), temperos, massas
0,40	Velocidade mínima de oxidação	Ovo integral em pó (5% de água)
0,30		<i>Cream crackers</i> , farinha de pão (3 a 5% de água)
0,25	Resistência máxima ao calor de esporos bacterianos	
0,20		Leite integral em pó (2 a 3% de água), vegetais desidratados (5% de água), sucrilhos (5% de água)

Fonte: FELLOWS, 2006.

Vale ressaltar que os valores limitantes da atividade da água para crescimento de microrganismos podem ser alterados devido a outros fatores, tais como, pH, sal, agentes antimicrobianos, tratamentos térmicos e temperatura de estocagem (RAHMAN, 2007). Sendo assim, podemos dizer que o processo de secagem de um alimento permite de obter um produto estável, mas não estéril, uma vez que nem todos microrganismos são destruídos pela temperatura elevada.

2.5 SECAGEM CONVECTIVA POR AR QUENTE

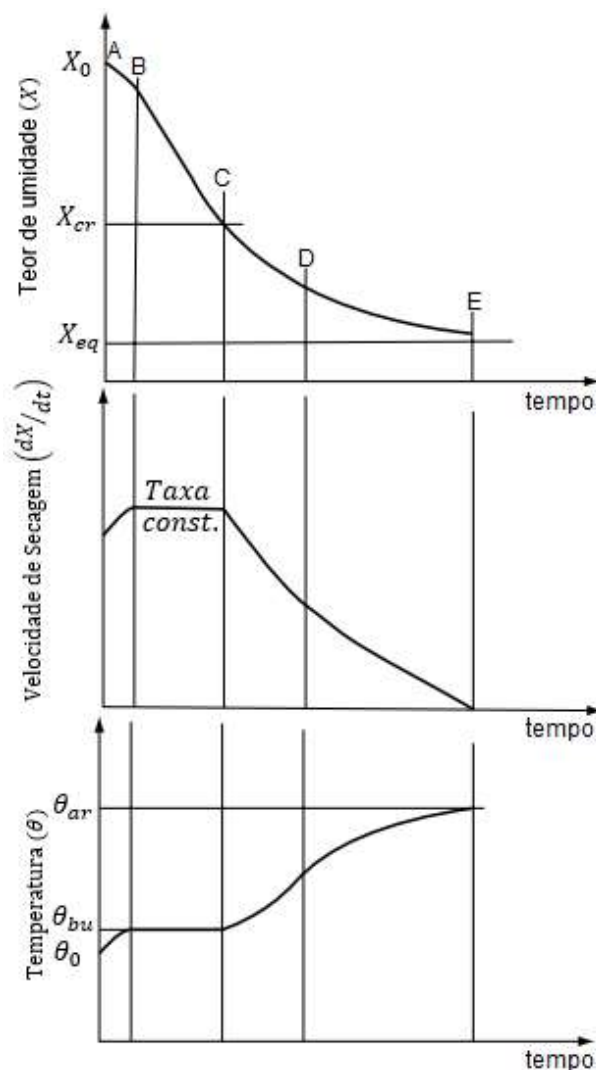
Atualmente a maior parte das frutas e vegetais desidratados ainda são produzidos pelo método de secagem convectiva por ar quente. Neste método o produto úmido é exposto a uma corrente de gás (normalmente ar) quente e seco, com intuito de facilitar as transferências de calor e massa devido a convecção. As diferenças de temperatura e concentração resultam em trocas simultâneas de calor e matéria (água). O calor é transferido em direção ao produto, fornecendo a energia necessária para vaporização da água em sua superfície. A umidade antes de ser transportada na forma de vapor, deve migrar do interior até a superfície do produto. Dessa maneira, é dito que ocorrem dois processos distintos de transferência de massa, sendo um externo e outro interno (MASKAN, 2000; MUJUMDAR, 2014).

O produto atinge naturalmente uma condição de equilíbrio na qual a temperatura é tal que as transferências de calor permitem a evaporação de uma quantidade de água equivalente àquela capaz de atravessar a camada limite (BONAZZI, 2003). Para um ar com características constantes, as experiências mostram que, enquanto ocorre a secagem, a temperatura do produto sempre será menor que a temperatura do ar, mantendo o potencial de transferência de calor e massa.

O gradiente de concentração durante a secagem pode ser representado de diversas maneiras, uma das mais utilizados é através gradiente de pressão existente entre o ar seco e o produto úmido, dado por $(p_{vs} - pp_a)$, onde p_{vs} é a pressão de vapor da água na superfície do produto e pp_a é a pressão parcial de vapor de água no ar.

A medida que a umidade é removida do interior do produto, este perde massa de água e seu teor de umidade se reduz. Portanto, para descrever a curva de secagem, utiliza-se a evolução do teor de umidade do produto ao longo do processo. Conforme a umidade se reduz no produto, sua temperatura se eleva, o que resulta numa queda nas taxas de secagem. A Figura 9 mostra as curvas de secagem e a evolução da temperatura do produto.

Figura 9: Funções características da secagem convectiva.



Fonte: MUJUMDAR, 2014

O fluxo das transferências de calor e massa na interface ar-produto são regidos pelo conjunto de duas resistências:

- Resistência às transferências externas, podendo ser representada pelos coeficientes convectivos de calor h e de massa k .
- Resistência às transferências internas de calor e massa. Estas trocas contribuem para fixar a temperatura e a pressão da superfície do produto. As resistências internas variam principalmente com a natureza do produto, a geometria, a espessura, seu teor de umidade, etc.

As curvas de secagem, mostradas na Figura 9, podem ser divididas em períodos, ou fases, na qual cada uma possui suas particularidades. O trecho AB, também conhecido como período 0, corresponde ao período de indução, no qual o produto se adapta às condições do secador. Quando um produto é inserido no secador, ele se encontra normalmente à temperatura ambiente, o que faz com que sua pressão de vapor na superfície (p_{vs}) seja baixa, resultando numa taxa de evaporação inicial baixa. O calor transferido ao produto serve para elevar a sua temperatura, aumentando sua pressão de vapor e sua taxa de secagem. Este fenômeno continua a ocorrer até que a transferência de calor e massa se equilibrem. A duração desta fase é insignificante e geralmente é desconsiderado (PARK, 2007; MUJUMDAR, 2014).

O trecho BC, também conhecido como período I, consiste no período de velocidade (taxa) constante. Ele existe somente se há uma grande quantidade de água livre no produto. Assim, o produto se comporta como se fosse um termômetro de bulbo úmido e sua superfície permanece a uma temperatura θ_{bu} , que depende somente da temperatura e da umidade relativa do ar. A pressão de vapor na superfície, então, permanece constante e é igual a pressão de vapor da água pura na temperatura do produto. Dessa forma, pode-se dizer, que a taxa de secagem é controlada pelas condições externas, ou seja, depende apenas da resistência à transferência externa. O término deste período corresponde ao teor de umidade crítico (X_{cr}), representado pelo ponto C (ROZZIS, 1995; GEANKOPOLIS, 1998; IARAWN, 2007).

O segmento CE, também chamado de período II, e representa o período de velocidade (taxa) decrescente, entretanto este período pode apresentar duas fases de queda na velocidade. A primeira fase de taxa decrescente ocorre no segmento CD, onde, a partir do X_{cr} , há um aumento da resistência interna e o movimento da água do interior para a superfície do sólido torna-se insuficiente para compensar o líquido que está sendo evaporado. Nesse momento as resistências internas passam a ser o fator limitante para secagem, já que a transferência externa da umidade ocorre de maneira muito mais rápida. A partir do ponto D, tem-se a segunda fase de velocidade (taxa) decrescente que corresponde a evaporação da água ligada, a água livre que existia no interior do produto para ser transformada em vapor em sua superfície já foi evaporada durante a primeira fase de taxa decrescente, restando somente a água que está mais fortemente ligada ao produto. A água não evapora mais na superfície do produto, mas em seu interior. Caso ele seja deixado um tempo suficientemente longo em condições constantes de temperatura e umidade relativa, o produto irá perder umidade até que a pressão de vapor em seu interior seja igual à pressão parcial do ar, neste momento é dito que o sólido e o ar estão em equilíbrio, e o

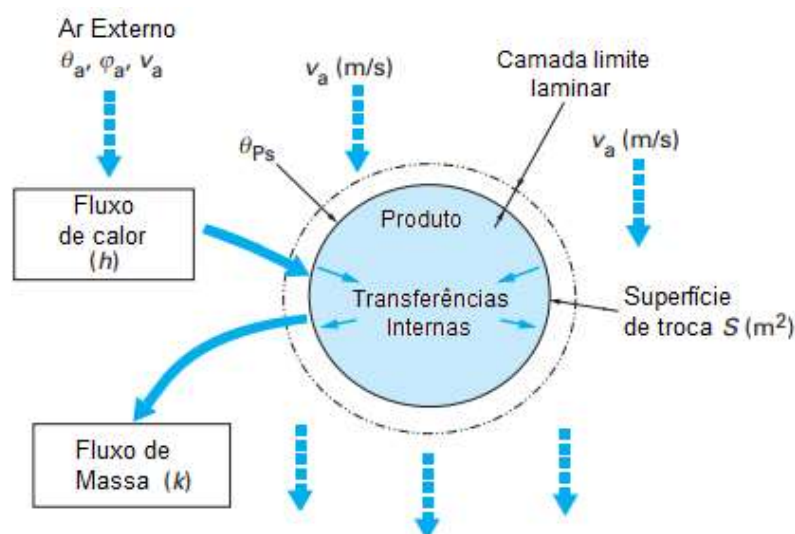
teor de umidade é chamado de teor de umidade de equilíbrio (X_{eq}) para as condições estabelecidas, encerrando o processo de secagem (PARK, 2007; CELESTINO, 2010;).

Vale ressaltar que, durante um processo de secagem, o produto dificilmente atingirá o teor de umidade de equilíbrio, pois envolveria um tempo de secagem muito longo e seria extremamente dispendioso. A escolha do teor de umidade final é, então, determinada pelos parâmetros de armazenamento e estabilidade. No Brasil, por exemplo, a resolução da Anvisa nº 272 de 22 setembro de 2005, estipula que a umidade (%bu) deve ser, no máximo, 25% para frutas secas. O teor de umidade final é quem determinará o tempo de secagem e as condições necessárias.

2.5.1 Transferências Externas

Durante o processo de secagem convectiva o produto é caracterizado por sua geometria (superfície de troca de calor), pelo seu teor de umidade, X (kg água / kg massa seca) e por sua temperatura θ_p (no qual θ_{ps} é a temperatura em sua superfície). O ar quente, por sua vez, é caracterizado por sua temperatura θ_a , onde $\theta_a > \theta_{ps}$, sua umidade relativa φ_a (que deve ser baixa), e sua velocidade v_a (m/s) em relação ao produto (VASSEUR, 2009). Essas características estão apresentadas na Figura 10.

Figura 10: Transferências de calor e matéria entre o produto e o ar durante a secagem convectiva



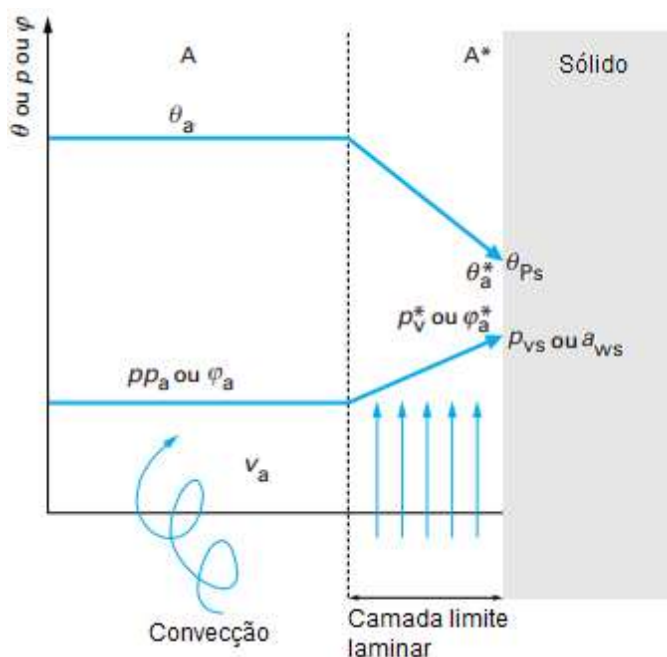
Fonte: VASSEUR, 2007.

À partir do momento em que se inicia o processo de secagem, o produto estará a uma temperatura inferior a temperatura do ar que o envolve, isto é $\theta_a > \theta_{ps}$, permitindo que haja um fluxo de calor \dot{Q} (W), sendo parte deste fluxo necessário para a evaporação de uma certa quantidade de água (dm/dt) e outra parte necessária para o aumento da temperatura do produto ($d\theta_p/dt$). Assim, há uma troca de calor e matéria entre o ar e o produto, onde o ar se resfria fornecendo o calor, carregando consigo vapor de água eliminado pelo produto (VASSEUR, 2007).

A medida que há um acúmulo de calor no produto, sua temperatura aumenta e há uma diminuição do teor de umidade do produto com passar do tempo, $X(t)$. Por consequência, a velocidade de secagem diminui, descrevendo um processo de secagem não estacionário para o produto, mesmo que as condições externas sejam constantes (BONAZZI, 2003; MUJUMDAR, 2011).

Geralmente, no interior de um secador convectivo, o ar está em regime turbulento em torno do produto e uma camada limite laminar de espessura muito pequena se forma em sua vizinhança, conforme pode ser visto na Figura 10. No interior desta camada limite, a última camada de ar, que se encontra em contato com o produto, é considerada como sendo imóvel em relação ao produto, isto é, sua velocidade é nula, é denominada como A^* , como pode ser visto na Figura 11.

Figura 11: Transferências de calor e massa entre o ar e o produto através da camada limite



Fonte: BONAZZI, 2003.

Esta camada, que se encontra na interface ar-produto, é considerada como estando em equilíbrio com o produto, ou seja, mesma temperatura e umidade da superfície do produto, o que se traduz pelas seguintes relações:

$$\begin{aligned}\theta_{A^*} &= \theta_{ps} \\ \varphi_{A^*} &= a_{ws} \\ p_{v^*} &= p_{vs} = p_{0,\theta_{ps}} \cdot a_{ws}\end{aligned}$$

Onde, θ_{A^*} , φ_{A^*} , p_{v^*} são a temperatura, a umidade relativa e a pressão de vapor da água, do ar em contanto com o sólido (A^*).

A quantidade energia recebida pelo produto durante a secagem pode ser descrita considerando-se que todo o produto está a uma temperatura uniforme, que é a mesma da temperatura de sua superfície, isto é $\theta_p \approx \theta_{ps}$. Assim, a quantidade de calor \dot{Q} (W) transferida do ar para o produto devido a convecção h ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$) através da área de troca térmica S (m^2), supondo que a energia de vaporização da água no produto é mesma da água livre ΔH_v para a temperatura em questão, é:

$$\dot{Q} = h \cdot S(\theta_a - \theta_{ps}) = m \cdot c_p \cdot \frac{d\theta_p}{dt} + \Delta H_v \cdot \frac{dm}{dt} \quad (6)$$

onde c_p é a capacidade térmica mássica à pressão constante.

Esta relação demonstra que, se o produto entra frio no secador convectivo, o fluxo inicial de massa sendo baixo, $(dm/dt) \cong 0$, o calor transferido serve essencialmente para aumentar sua temperatura $(d\theta_p/dt) > 0$, o que eleva a pressão de vapor do produto p_v , aumentando rapidamente o fluxo de secagem. Descrevendo assim a etapa inicial do processo, o período 0. Mas a equação 6 é válida durante todo processo de secagem.

O balanço de matéria, de acordo com VASSEUR (2007), descreve a quantidade de água que sai do produto. Com a mesma simplificação, $(\theta_p \approx \theta_{ps})$, e representando a diferença de concentração entre o ar e o produto através da diferença de pressão $(p_{vs} - pp_a)$, onde p_{vs} é a pressão de vapor de água na superfície do produto para θ_{ps} e pp_a pressão parcial de vapor de água no ar para as condições de temperatura e UR, o fluxo evaporativo água relativo a massa m do produto e sua superfície de transferência S , pode ser descrito através de um coeficiente convectivo k_p ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}$).

$$\dot{m}_{\text{água}} = \frac{dm}{dt} = k_p \cdot S(p_{vs} - pp_a) = k_p \cdot S(p_{0,\theta_{ps}} \cdot a_{ws} - pp_a) \quad (7)$$

As transferências de massa e calor estão ligadas pelo fato da pressão de vapor na superfície, p_{vs} , depender da temperatura θ_{ps} .

2.5.2 Transferência Interna

Devido à complexidade dos sistemas internos de um produto vegetal, o total entendimento dos mecanismos de transferência de água do seu interior para a superfície ainda não são bem elucidados. Contudo sabe-se que a água pode migrar do interior do produto devido ao efeito de diversos mecanismos que podem se combinar, como a difusão molecular, a capilaridade, a difusão de Knudsen e a difusão de vapor. Os inúmeros fenômenos que ocorrem durante a secagem levam os pesquisadores a proporem diversas teorias e modelos para prever a taxa de secagem, tais como: Teoria difusional; Teoria capilar; Teoria de Luikov; Teoria de Phillip & de Vries; teoria de Krisher-Berger & Pel; Teoria da condensação – evaporação. (BENDLIN, 2003; MUJUMDAR, 2011)

A teoria da difusão é a que tem ganhado preferência entre os pesquisadores, graças a sua simplicidade. Ela considera que durante o período de secagem constante, a umidade na superfície do sólido é reduzida, mas a concentração no seu interior permanece alta. Isto resulta numa alta difusividade, permitindo que a água se movimenta até a superfície tão rápida quanto pode ser evaporada, mantendo o período constante. À medida que a secagem ocorre, a umidade interna do produto se torna cada vez menor, o que reduz as taxas de difusão, até o ponto em que a secagem passa a ser controlada pela difusão da umidade no interior do produto, resultando no fim do período de secagem constante (TREYBAL, 1980).

Essa teoria se baseia na solução analítica da lei de Fick para algumas geometrias, adotando um coeficiente de difusão efetivo. Essencialmente, esse coeficiente de difusão de umidade leva em consideração a heterogeneidade do material e representa a interação de todos os mecanismos que influenciam no transporte interno de umidade (MCMINN 1999).

Sem a necessidade de saber o mecanismo exato, o transporte de água pode ser representado pela segunda lei de Fick, na qual o fluxo de água é proporcional ao gradiente de concentração local no produto, representado na secagem pelo teor de umidade X , e o coeficiente de proporcionalidade é chamado de “difusividade efetiva”, D_{ef} (VASSEUR, 2007). A evolução

do perfil do teor de umidade dentro do produto pode ser descrita em relação ao espaço e tempo $X = f(x, t)$, da seguinte maneira

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \cdot \nabla^2 X = D_{ef} \left[\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right] \quad (8)$$

A teoria da difusão é baseada em várias hipóteses simplificadoras, o que pode ser considerado inaceitável e levar a erros em alguns trabalhos (MCMINN, 1999), apesar disso o coeficiente de difusão tem sido calculado através desse método, para a secagem de cebola, bananas, maçãs, amoras e para diversos produtos agrícolas (SCHULTZ, 1999).

As hipóteses consideradas, segundo PARK (2007), são:

1. A difusividade da água é constante. Esta suposição é levada em consideração pela maioria das publicações, que afirmam que a secagem se faz de maneira isotérmica e que a difusividade da água é independente do teor de água.

2. O produto é homogêneo: tem uma forma regular simples e simétrica. Em geral, os autores fazem relação a uma esfera, cilindro ou a uma placa.

3. As dimensões do produto permanecem constantes ao longo do tempo. O que é completamente falso para os produtos biológicos, pois eles sofrem encolhimento durante a secagem.

4. A superfície do produto se põe imediatamente em equilíbrio com o ar de secagem, $X_s = X_{eq}$. Onde X_{eq} é o teor de água de equilíbrio do produto com o ar.

5. O conteúdo de umidade do material tende para a umidade de equilíbrio.

O transporte interno de água e sua variabilidade ao longo do processo de secagem é uma função complexa, dependente da temperatura de processamento, do teor de umidade do material, dos parâmetros físicos inter-relacionados, e.g. porosidade e densidade, e a interação dos componentes alimentares (amido, proteína, fibras, celulose, etc.) com a água. (KARATHANOS, 1990). Para muitos casos de secagem onde o mecanismo de difusão tem explicado satisfatoriamente as taxas de secagem como uma função do teor de umidade, a distribuição da umidade no interior do sólido em vários estágios da secagem não está em conformidade com este mecanismo. A aplicabilidade do mecanismo de difusão é, então, aparentemente acidental (TREYBAL, 1980).

A Lei da difusão é finalmente aplicada mais por causa de sua forma matemática e sua simplicidade do que pelas razões teóricas relativas aos fenômenos físicos, em que, essencialmente, a difusividade efetiva da umidade representa a interação de todos os parâmetros que influenciam no fenômeno de transferência de massa (TREYBAL, 1980; MCMINN, 1999; MUJUMDAR, 2014).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CINÉTICA DE SECAGEM EXPERIMENTAIS EM CONDIÇÕES EXTERNAS CONSTANTES

Um método utilizado para antecipar as transferências é o de caracterizar diretamente o comportamento da secagem de um produto pelas curvas de cinética de secagem experimentais, adquiridas em condições externas constantes, conhecidas e reproduzíveis.

O experimento de base consiste em colocar uma amostra representativa do produto inicial a ser secado dentro de uma corrente de ar com características conhecidas e constantes ao longo do tempo: Temperatura θ_a (°C), umidade relativa φ_a (%), velocidade v_a (m/s). Registra-se a evolução da massa do produto ao longo do tempo, $m(t)$ (kg), de modo contínuo ou por pesagens em intervalos de tempo regulares. Dizemos aqui que se trata de uma secagem de “camada fina”, para exprimir que o ar saindo da camada do produto é um pouco mais frio e úmido que o ar da entrada, de maneira que as condições externas de secagem são razoavelmente uniformes para toda a amostra e constantes durante todo tempo.

Uma primeira transformação necessária consiste em obter da curva $m(t)$ a função $X = f(t)$, que possui a vantagem de ser independente da massa da amostra utilizada durante o ensaio. De fato, desde que as condições de secagem sejam idênticas, se dobrarmos a massa da amostra a superfície de troca com ar também será dobrada, e a cinética $X(t)$ permanecerá a mesma.

A taxa de secagem pode ser obtida pela derivada do teor de umidade em base seca em relação ao tempo, e representa a velocidade de secagem do produto. Numericamente, ela pode ser calculada a partir das pequenas variações de teor de umidade (ΔX) correspondente à pequenos intervalos de tempos (Δt):

$$Taxa = -\frac{dX}{dt} \cong -\frac{\Delta X}{\Delta t} \quad (9)$$

O fluxo de massa, N , pode ser calculado a partir da velocidade de secagem, dX/dt , da massa seca do produto, m_s , e sua área superficial, S , em contando com o ar quente. Esta curva representa a quantidade de umidade que atravessa a área superficial de troca a cada unidade de tempo para um determinado conteúdo de água do produto.

$$N = \frac{m_s dX}{S dt} \quad (10)$$

As curvas observadas permitem distinguir e classificar os três períodos de secagem. Entretanto o período 0 é apenas o período de aclimatação do produto e não traz informações importantes, sendo normalmente desconsiderado. Assim, as curvas de secagem podem ser divididas em duas partes principais: O período de taxa constante e o período de taxa decrescente. O formato da curva durante o período decrescente pode variar para diferentes tipos de produtos, bem como para as diferentes condições de secagem ou tipo de secagem.

As cinéticas de secagem obtidas em condições externas constantes permanecem uma situação de estudo, em geral, muito diferente de um secador industrial, onde o ar no entorno do produto vai variar muito em temperatura e umidade, entre a entrada e a saída do secador.

3.1.1 Coeficientes de Transferência Externo

Se um sólido está inicialmente muito úmido, a sua superfície estará coberta com um filme fino de água, no qual é assumido como sendo água não-ligada. Este fenômeno ocorre durante o período I de secagem, também conhecido como período de velocidade constante.

Durante este período, a quantidade de calor transferido do ar ao produto é exatamente igual a energia necessária para vaporização da água. Visto que a evaporação da umidade utiliza apenas o calor latente, a superfície do produto permanecerá a uma temperatura constante tal que o calor cedido pelo ambiente à superfície seja igual ao calor absorvido pela umidade contida nela. Neste período, a medida que a umidade é evaporada, os capilares e interstícios do sólido preenchidos com água, podem fornecer água rapidamente. Assim, considera-se que o produto se comporta como um termômetro de bulbo úmido, ou seja, sua superfície permanece à temperatura constante, conhecida como temperatura de bulbo úmido (θ_{bu}), que depende somente da temperatura e da umidade do ar externo.

Dessa maneira, o fluxo de calor durante o período constante pode ser simplificado. Sabendo que a massa de água evaporada corresponde à variação da massa do produto e considerando que não há variação da temperatura do produto, $(d\theta_p/dt) = 0$, e que todo calor utilizado para vaporização é fornecido pelo ar devido a convecção, a Equação 6, pode ser escrita como

$$\dot{Q} = h \cdot S(\theta_a - \theta_{bu}) = \dot{m}_{\text{água}} \cdot \Delta H_v \quad (11)$$

A secagem durante este período é controlada somente pelas condições externas do ar em torno do produto e o fluxo evaporativo pode ser expresso a partir da relação:

$$\dot{m}_{\text{água}} = \frac{h \cdot S(\theta_a - \theta_{bu})}{\Delta H_v} \quad (12)$$

ΔH_v é o calor latente de vaporização da água para temperatura de bulbo úmido, que pode ser obtido a partir de uma tabela de propriedades termodinâmicas.

Esta relação mostra que a secagem por convecção requer um ar quente (θ_a alto), velocidade do vento elevado (h significativo) e um ar mais seco (θ_{bu} menor possível ou φ_a baixo) e uma superfície de troca maior possível (S grande).

A taxa na qual a umidade evapora também pode ser descrita em termos de um coeficiente de transferência de massa. Segundo Vasseur (2007), o fluxo mássico pode ser calculado a partir da diferença de pressão de vapor na superfície do produto e no ar, dado por $(p_{vs} - pp_a)$, relacionado a um coeficiente de transferência de massa k_p , dado pela equação 7. Já que a água na superfície do produto pode ser considerada como água livre, então tem-se que $a_{ws} = 1$ e a equação 7 pode ser simplificada como

$$\dot{m}_{\text{água}} = k_p \cdot S(p_{0,\theta_{bu}} - pp_a) \quad (13)$$

onde $(p_{0,\theta_{bu}})$ é a pressão de vapor da água pura na temperatura de bulbo úmido.

O coeficiente k_p permanecerá constante enquanto as condições de secagem e a direção do ar que passa sobre a superfície do produto não forem alteradas.

É importante ressaltar que essas condições só são válidas durante o período de taxa constante, na qual não há acúmulo de calor no produto e que dura somente enquanto há água livre no interior do produto e sua superfície pode ser alimentada de maneira a se manter $a_{ws} = 1$.

Logo quando a superfície em contato com o ar de secagem não é mais alimentado facilmente pela água, inicia-se o período II, correspondendo ao momento no qual a atividade da água na superfície do produto a_{ws} passa a ser inferior a 1, resultando numa diminuição da

pressão de vapor da água na superfície do produto p_{vs} ($p_{vs} = p_{0,\theta_a} \cdot a_{ws}$) e o aumento da temperatura do produto θ_p .

O resultado é uma desaceleração simultânea das transferências de matéria, uma vez que $(p_{vs} - pp_a)$ diminui, e das transferências de calor, já que $(\theta_a - \theta_p)$ também diminui. A temperatura do produto aumenta progressivamente a partir da superfície e há uma pequena variação entre a temperatura na superfície e no centro do produto e as Equações 12 e 13, simplificadas, deixam de ser válidas, uma vez que parte da energia transferida do ar ao produto serve para aumentar a temperatura do produto progressivamente.

Assim, durante o período II, é a transferência interna de água do centro do produto em direção à superfície que se torna limitante e as resistências externas são geralmente desconsideradas frente à resistência interna. Dessa forma, o aumento da velocidade do ar v_a tem pouco efeito no aumento do fluxo, mas aumentar a temperatura do ar é bem efetivo no período II para aumentar o fluxo de secagem, já que com aumento de θ_a tem-se um aumento de θ_{ps} , p_0 e D_{ef} (salvo em caso em que há a formação de crostas). Entretanto, o aumento da temperatura do ar é também limitado pela perda de qualidade do produto.

3.1.2 Coeficiente de Difusão

O estudo do transporte interno de umidade é importante quando ele passa a ser o fator limitante, fato que ocorre logo após o teor de umidade crítico até o final do processo de secagem. Embora esse transporte de umidade do interior do produto até a superfície possa ocorrer através de diversos mecanismos os quais ainda não são completamente compreendidos devido a heterogeneidade e complexidade dos alimentos e o fenômeno de difusão verdadeira só ocorra em alguns alimentos muito simples, para a engenharia, a Teoria da difusão é amplamente aceita e aplicada, no qual o coeficiente de difusão efetivo pode ser interpretado como uma propriedade global de transporte de massa, que reúne todos os mecanismos que contribuem para transferência de umidade e a heterogeneidade do material em um só parâmetro.

Pela teoria da difusão, um coeficiente efetivo pode ser estimado durante a secagem, a partir de dados experimentais, geralmente através da curva de secagem. A teoria difusional se apoia exclusivamente sobre a 2ª lei de Fick, a qual expressa que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água. Considera-se que a temperatura no alimento nesse período de secagem é constante, o que torna o coeficiente de difusão da água

no alimento também constante, já que este depende da temperatura (SARAVACOS, 1986). A 2ª Lei de Fick da Difusão é dada pela Equação 8. Admitindo que a difusão seja unidirecional e ocorra somente no eixo z , a equação pode ser dada por

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \left(\frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right) \quad (14)$$

Considerando a fatia como sendo uma placa plana semi-infinita, as condições iniciais e de contorno são:

$$\begin{aligned} C.I.: t = 0, X(z, 0) &= X_0 && \text{(Umidade inicial uniforme)} \\ C.C.: z = L_0, X(L, t) &= X_{eq} && \text{(Umidade constante na superfície)} \\ z = 0, \frac{\partial X}{\partial t} &= 0 && \text{(umidade máxima no centro)} \end{aligned}$$

Supondo que a umidade se distribui uniformemente e, que a resistência externa seja desprezível, a solução analítica da lei de Fick é dada na forma de uma série infinita (CRANK, 1975):

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n + 1)^2} \cdot e^{\left(-\frac{(2n+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{ef} \cdot t}{4 \cdot L_0^2} \right)} \quad (15)$$

onde D_{ef} é o coeficiente de difusividade efetivo (m^2/s) e L_0 é a metade da espessura da placa plana (m). $\frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$ é denominado de razão de umidade (RU) o qual é adimensional.

Para longos períodos de secagem a Equação 15 converge rapidamente e pode ser simplificada para o primeiro termo da série (TUTUNCU & LABUZA, 1996), logo tem-se que

$$RU = \frac{8}{\pi^2} e^{\left(-\frac{\pi^2 \cdot D_{ef} \cdot t}{4 \cdot L_0^2} \right)} \quad (16)$$

A equação 16 é geralmente escrita em sua forma logarítmica, dada por

$$\ln(RU) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 \cdot D_{ef} \cdot t}{4 \cdot L_0^2} \quad (17)$$

A difusividade é determinada traçando-se uma curva experimental de secagem em termos de $\ln(RU)$ pelo tempo de secagem t . Como a curva resulta numa reta, o coeficiente pode ser determinado a partir de sua inclinação, assim tem-se que

$$\text{Inclinação} = \frac{\pi^2 D_{ef}}{4 L_0^2} \quad (18)$$

Apesar de inúmeros esforços no sentido de se obter um modelo teórico para o processo de secagem, os dados experimentais ainda têm um papel importante no estudo da desidratação de alimentos (MAZZA, 1980).

3.2 LOCAL

A determinação experimental tanto das curvas de secagem quanto do teor de umidade inicial dos produtos foram realizadas no laboratório de secagem do departamento de Transfert de Fluide Énergétiques – TREFLE, que fica no interior do Institut de Mécanique et d'Ingénierie, localizado em Bordéus, na França. O departamento do TREFLE realiza estudos sobre os domínios de mecânica dos fluidos e transferências de energia divididos em três eixos: Fluidos e escoamentos complexos, transferências em meio porosos e energia e sistemas térmicos. A cidade de Bordéus encontra-se no nível do mar, estando, portanto, a uma pressão de 1 atm.

3.3 MATÉRIA PRIMA

A matéria prima utilizada nos experimentos de secagem foi a maçã da variedade Golden Delicious (*Malus domestica*), originária da região de Bordéus, sendo um dos tipos mais produzidos no país. Antes dos testes, os produtos foram armazenados em câmaras frias a 10 °C e retiradas 2 horas antes da secagem para equilibrar sua temperatura com a do ambiente.

Segundo HONORES (1995), os tipos de cortes mais comuns utilizados na secagem de maçã, são os cortes em rodela e os cortes em cubos. Neste trabalho, optou-se por realizar os

experimentos de secagem com rodela de maçã. Já para determinação do teor de umidade, utilizou-se pequenos cubos.

3.3.1 Cortes

Para o experimento de secagem realizou-se cortes transversais nos frutos, obtendo um produto de geometria aproximadamente circular, do tipo “rodela”. Para isto, utilizou-se como instrumento um fatiador de legumes do tipo mandoline de altura regulável, o qual foi ajustada para 8mm. As fatias utilizadas para o experimento de secagem, foram as fatias centrais do produto. As figuras abaixo ilustram os cortes realizados.

Figura 12: Corte transversal da maçã.



Fonte: <https://www.istockphoto.com/br/search/stack/786547130?assettype=image>.

Já para a determinação da massa seca do produto, retirou-se aleatoriamente diversas amostras das fatias que não foram utilizadas no experimento. Essas amostras foram cortadas manualmente em formato de pequenos cubos, para que se pudesse colher amostras de diversas regiões da maçã utilizada e remover completamente a água de seu interior em um intervalo de tempo menor.

3.4 SECADOR TÚNEL DE VENTO

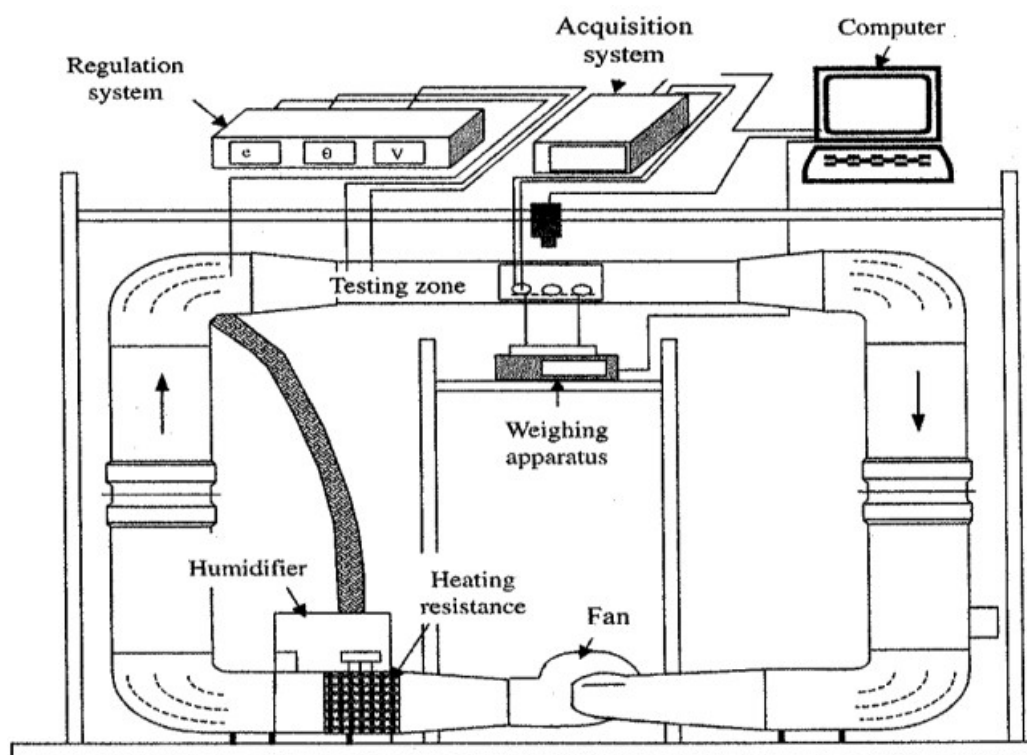
Os experimentos de secagem foram realizados em um secador convectivo, construído pelo próprio departamento do TREFLE. O dispositivo consiste num túnel de vento de circuito

fechado, cujo esquema pode ser visto na Figura 13. O ar é aquecido com o auxílio de resistências elétricas no interior do circuito e sua umidade relativa é controlado a partir de um umidificador de ar. Os ajustes da velocidade, UR e temperatura do ar podem ser feitas através do sistema de regulação com uma precisão de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ para temperatura, $0,1\text{ m/s}$ para velocidade do ar e 1% para UR. O sistema de regulação também está conectado a um termopar, a um anemômetro e a um higrômetro, localizados no início da “zona de teste”, que servem para a verificação e da temperatura, velocidade e da umidade relativa.

O produto testado é colocado no centro da “zona de teste”, no interior de uma cabine de vidro, sobre um suporte perfurado, parecido com uma grelha, no qual está conectado a uma balança digital de precisão de $0,001\text{g}$. Acima a cabine de testes há uma câmera que registra imagens do produto durante a secagem.

Tanto a balança quanto a câmera estão conectadas a um sistema de aquisição, que recebe e transmite os dados para um computador. O intervalo entre as pesagens e entre as capturas de imagem são regulados através de um software desenvolvido pelo próprio laboratório.

Figura 13: Esquema do túnel de vento utilizado na secagem convectiva.



Fonte: JANNOT, 2004

Figura 14 - Secador do tipo túnel de vento do departamento do TREFLE, no I2M.



Na Figura 14 pode-se identificar os componentes como sendo: 1 - Balança de precisão; 2 - Cabine de teste; 3 - Câmera; 4 - Painel Elétrico; 5 - Umidificador; 6 - Sistema de Regulação; 7 - Computador.

Figura 15: Secador convectivo do departamento do TREFLE.



Fonte: CHEMKHI, 2008.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 TEOR DE UMIDADE DAS MAÇÃS

O teor de umidade das maçãs utilizadas em cada experimento foi determinado com o auxílio de um aparelho termogravimétrico aquecido por radiação infravermelha. O aparelho utilizado, semelhante ao da Figura 16, possuía uma zona aquecida por radiação infravermelha acoplada a uma balança. O equipamento permitia ajustar a temperatura entre 40-140 °C e media automaticamente o peso da amostra, que se localizava no interior do cadinho.

Figura 16 - Exemplo de um analisador de umidade TGA



Fonte: <https://www.thelabstore.co.uk/sartorius-ma35-infrared-moisture-analyzer-balance-35-g-capacity-1-mg-0-01-readability.html>

O processo de determinação do teor de umidade foi realizado automaticamente pelo equipamento. As amostras retiradas da maçã foram colocadas em um cadinho e em seguida inserida na zona de aquecimento. O peso inicial, (m_0), era registrado e selecionava-se a temperatura de secagem, que era entre 105 e 115 °C. O aparelho media constantemente a massa da amostra durante a secagem, $m(t)$, até que não houvesse mais variação do seu peso, indicando o término do processo. A massa final foi registrada e considerada como sendo a massa seca (m_s) da amostra. O equipamento também registrava a diferença entre massa inicial e a massa final, ($m_0 - m_s$), e a partir das Equações 1 e 2 foi possível calcular o teor de umidade em base úmida e em base seca, respectivamente.

É preciso lembrar que a massa seca obtida nesse caso é a massa seca da amostra, mas assume-se que o teor de umidade é o mesmo para amostra e para fatia de maçã. Assim, para

determinar a massa seca das fatias de maçãs utilizadas no experimento de secagem, utilizou-se a mesma equação para o teor de umidade em base seca (Equação 2), em que o teor de umidade inicial (X_0) e massa inicial (m_o) são conhecidos.

4.2 EXPERIMENTOS DE SECAGEM

Foram realizados no total quatro experimentos de secagem. Em cada experimento foi alterado somente os parâmetros do ar, que são: A temperatura θ_a , a umidade relativa φ_a e a velocidade v_a .

4.2.1 Temperatura, UR, e velocidade do ar.

O primeiro experimento, tomado como experimento de base, selecionou-se os seguintes parâmetros para o ar: Temperatura de 55 °C, umidade relativa de 15% e velocidade do ar de 2 m/s.

No segundo experimento alterou-se somente a velocidade do ar, mantendo todos os outros parâmetros constantes. A velocidade selecionada para o segundo experimento foi de 3 m/s.

Já no terceiro experimento, o parâmetro alterado foi a temperatura do ar, no qual foi ajustada para 60 °C, e todos outros parâmetros foram igual ao do experimento de base.

No quarto experimento, alterou-se a somente a umidade relativa do ar, diminuindo-a para 10%, enquanto os outros parâmetros permaneceram idêntico ao do experimento de base.

A Tabela 6 ilustra as condições do ar de secagem utilizada em cada experimento.

Tabela 6: Parâmetros do ar para cada experimento.

	Temperatura (°C)	UR (%)	Velocidade (m/s)
Experimento 1	55	15	2
Experimento 2	55	15	3
Experimento 3	60	15	2
Experimento 4	55	10	2

4.2.2 Secagem

Para garantir que as condições dentro do túnel de vento fossem estabilizadas, o secador era ajustado para as condições de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar estabelecidas para o experimento cerca de 40 minutos antes do preparo dos produtos.

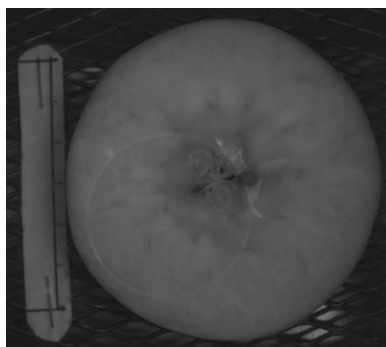
As maçãs eram retiradas da câmara fria com duas horas de antecedência, para permitir o equilíbrio de sua temperatura com a do ambiente. Em seguida, as frutas eram fatiadas em formato de rodela com espessura de 8 mm, como demonstrado na Figura 17. Esse procedimento era realizado com o auxílio de um mandoline.

Figura 17: Fatias da maçã utilizada no experimento.



Após os frutos serem cortados, a fatia aparentemente mais regular era selecionada e pesada. Sua massa era registrada e, em seguida, posicionada no centro do suporte de acordo com a Figura 18, de maneira que a câmera sobre a cabine de secagem pudesse capturar sua imagem durante o experimento.

Figura 18: Fatia de maçã posicionada sobre o suporte.



Uma vez que o produto estivesse posicionado no interior do secador, dava-se início ao processo de secagem. Os pesos e as imagens eram registrados automaticamente pelo computador, bastando apenas selecionar o intervalo entre as pesagens e entre as capturas de imagens. O intervalo selecionado foi de 15 minutos. A secagem durou até não houvesse mais variação na massa, conforme pode ser visto na Figura 19. Ao término da secagem os produtos secos, representados pela Figura 20, eram retirados do interior do secador e guardado em envelopes plásticos.

Figura 19: Representação genérica do fim do experimento de secagem.

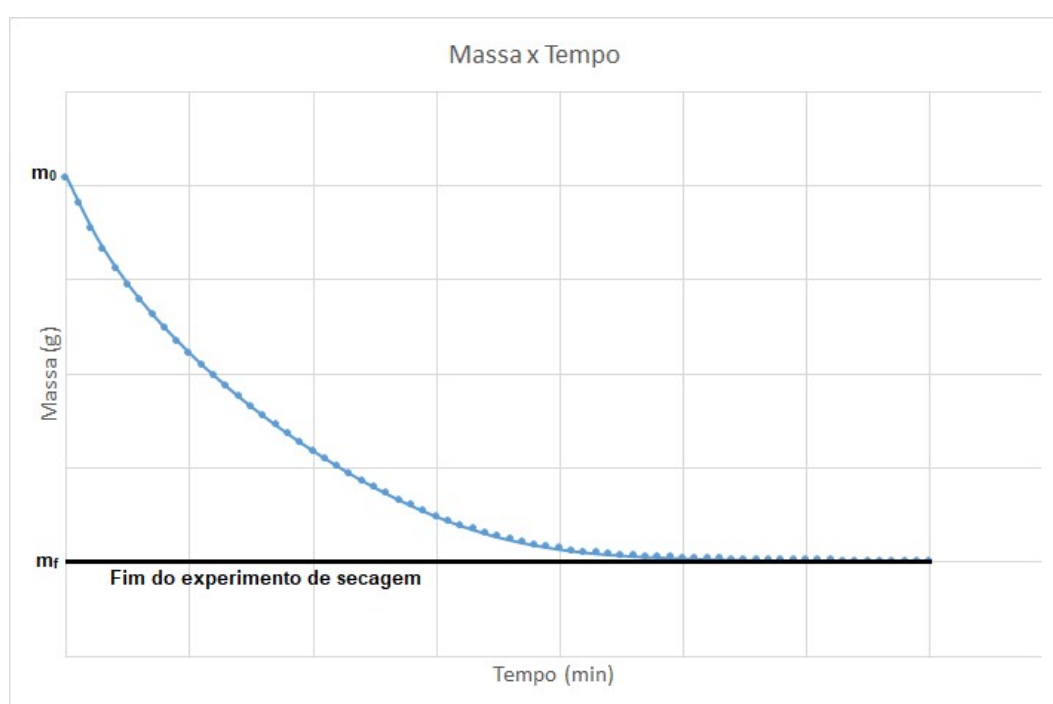


Figura 20: Produto seco no final do experimento.



5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 TEOR DE UMIDADE

A Tabela 7 representa o conteúdo de água inicial encontrado para cada maçã. As massas apresentadas na tabela são as massas das amostras e não dos produtos utilizados para os experimentos de secagem. Entretanto é considerado que o teor de umidade das amostras é o mesmo que o das fatias das maçãs. O teor de umidade em base seca foi calculado com o auxílio da Equação 2.

Tabela 7: Teor de umidade inicial para o produto utilizado em cada experimento.

Parâmetros do ar (°C, %, <i>m/s</i>)	Massa inicial da amostra (<i>g</i>)	Massa final da amostra (<i>g</i>)	Teor de Umidade (<i>g</i>_{água}/<i>g</i>_{ms})
55 - 15 - 2	14,158	1,893	6,479
55 - 15 - 3	19,276	3,026	5,370
60 - 15 - 2	15,818	2,371	5,671
55 - 10 - 2	13,749	2,147	5,404

Os teores de umidade iniciais em base seca de cada maçã, apesar de aparentarem ser muito diferente, estão dentro do padrão. Utilizando a Equação 1 ou a Equação 4 para determinar o teor de umidade em base úmida, constata-se que a umidade do produto varia entre 84,4% e 86,6%. Segundo PROTZEK (1997) a água é o principal constituinte da fruta, que apresenta em média 85% de massa em quantidade de água.

5.2 SECAGEM

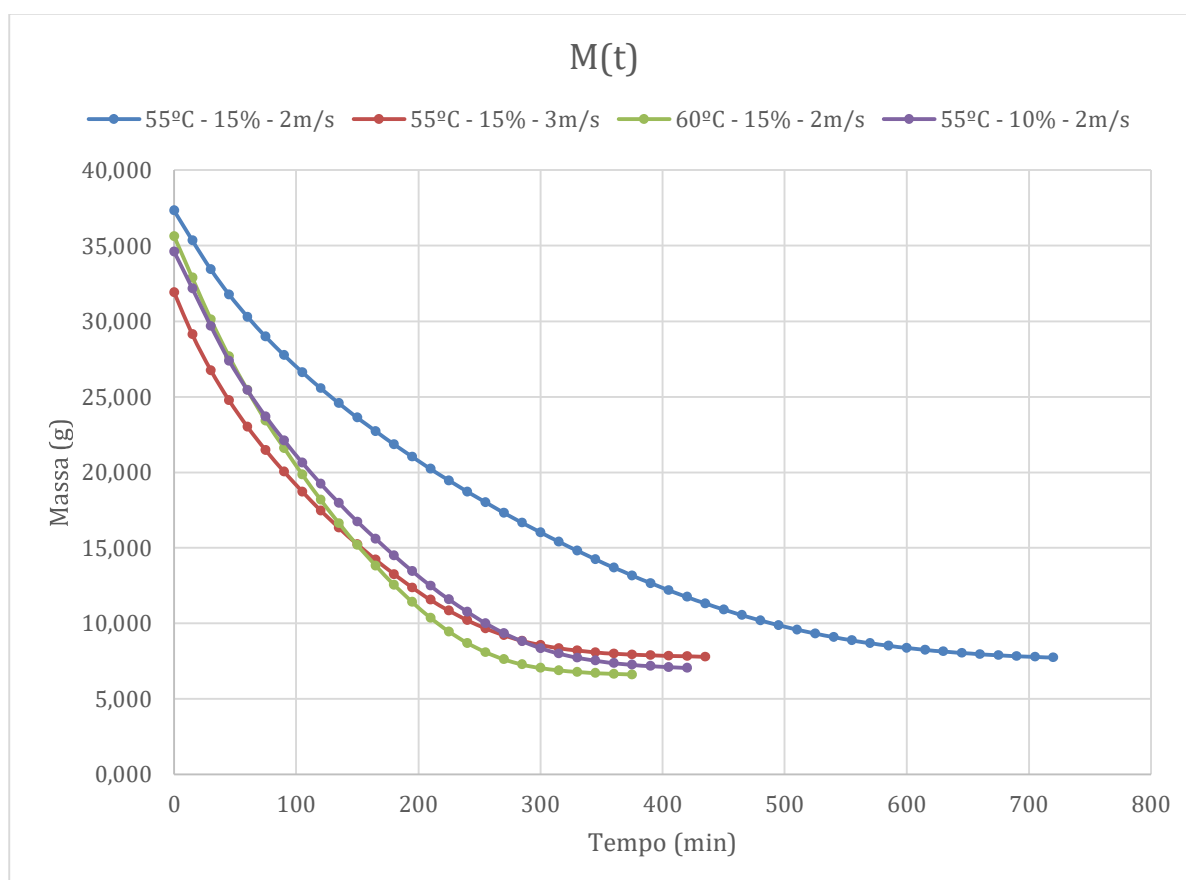
Os resultados obtidos das experiências de secagem das fatias de maçã no túnel de vento podem ser observados no Gráfico 1, o qual demonstra a variação da massa em função do tempo.

Conhecer o teor de água inicial (X_0) e a massa inicial (m_0) de cada fatia de maçã é importante pois nos permite determinar sua massa seca (m_s). Isto foi realizado com o auxílio da Equação 2 e os resultados estão apresentados na tabela abaixo.

Tabela 8: Massa inicial, teor de umidade e massa seca dos produtos nos experimentos.

Parâmetros do ar (°C, %, m/s)	Massa inicial (g)	Teor de umidade (g _{água} /g _{ms})	Massa seca (g)
55 - 15 - 2	37,328	6,479	4,991
55 - 15 - 3	31,913	5,370	5,010
60 - 15 - 2	35,628	5,671	5,341
55 - 10 - 2	34,613	5,404	5,405

Gráfico 1: Variação da massa do produto em função do tempo.

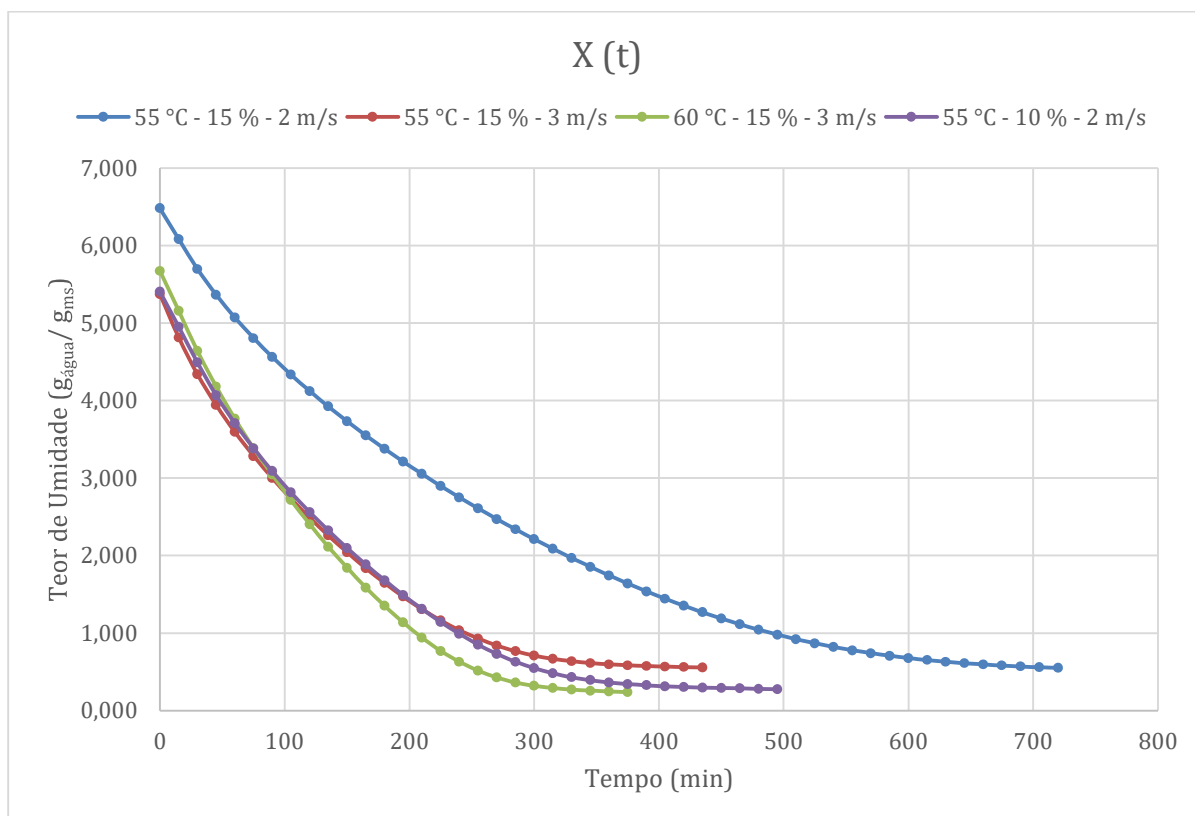


A curva de secagem de um produto é dada pela evolução do teor de umidade durante a secagem. Se a massa do produto em cada instante de tempo, $m(t)$, for conhecida (representada pelo Gráfico 1), bem como a sua massa de matéria seca, m_s , é possível determinar para cada experimento sua curva de secagem recorrendo à Equação 2, onde dessa vez a massa do produto irá variar com o tempo e a massa de matéria seca será fixa, o resultado pode ser visto no Gráfico 2.

Com relação ao Gráfico 2, observa-se que o conteúdo de água de cada fatia de maçã diminui em função do tempo até atingir o equilíbrio. Os resultados mostram uma forte influência dos parâmetros de secagem sobre a evolução do teor de umidade. Quando comparadas ao Experimento 1, a alteração das características do ar nos Experimentos 2, 3 e 4 reduziram em quase 50% o tempo de secagem.

O ponto de equilíbrio das Curvas 3 e 4 possuem um teor de umidade inferior ao das Curvas 1 e 2, que por sua vez são iguais. Isso decorre do fato de que, para um mesmo produto com mesma geometria, o ponto de equilíbrio depende apenas da temperatura e da umidade relativa do ambiente no qual ele está inserido, portanto a alteração na velocidade do ar não tem efeito sobre o teor de umidade de equilíbrio.

Gráfico 2: Evolução do teor de umidade em função do tempo.



Para entender melhor o efeito dos parâmetros sobre a cinética de secagem do nosso produto, deve-se analisar a taxa de secagem (ou velocidade de secagem), obtida a partir da inclinação da tangente da curva de secagem ($-dX/dt$). Com base na Equação 9, a taxa de secagem ou a velocidade de secagem pode ser observada no Gráfico 3. Esta curva torna possível observar as variações nas taxas durante o processo de secagem e diferenciar os períodos de secagem. Uma outra forma de apresentar o a taxa de secagem do produto deixa-lo em função do seu teor de umidade, tornando o gráfico independente do tempo, como pode ser visto no Gráfico 4. É importante ressaltar que neste tipo de gráfico a leitura da secagem se faz da direita pra esquerda, uma vez que o produto possui um teor de umidade maior no início da secagem.

Gráfico 3: Velocidade de secagem ($-dX/dt$) dos produtos em função do tempo.

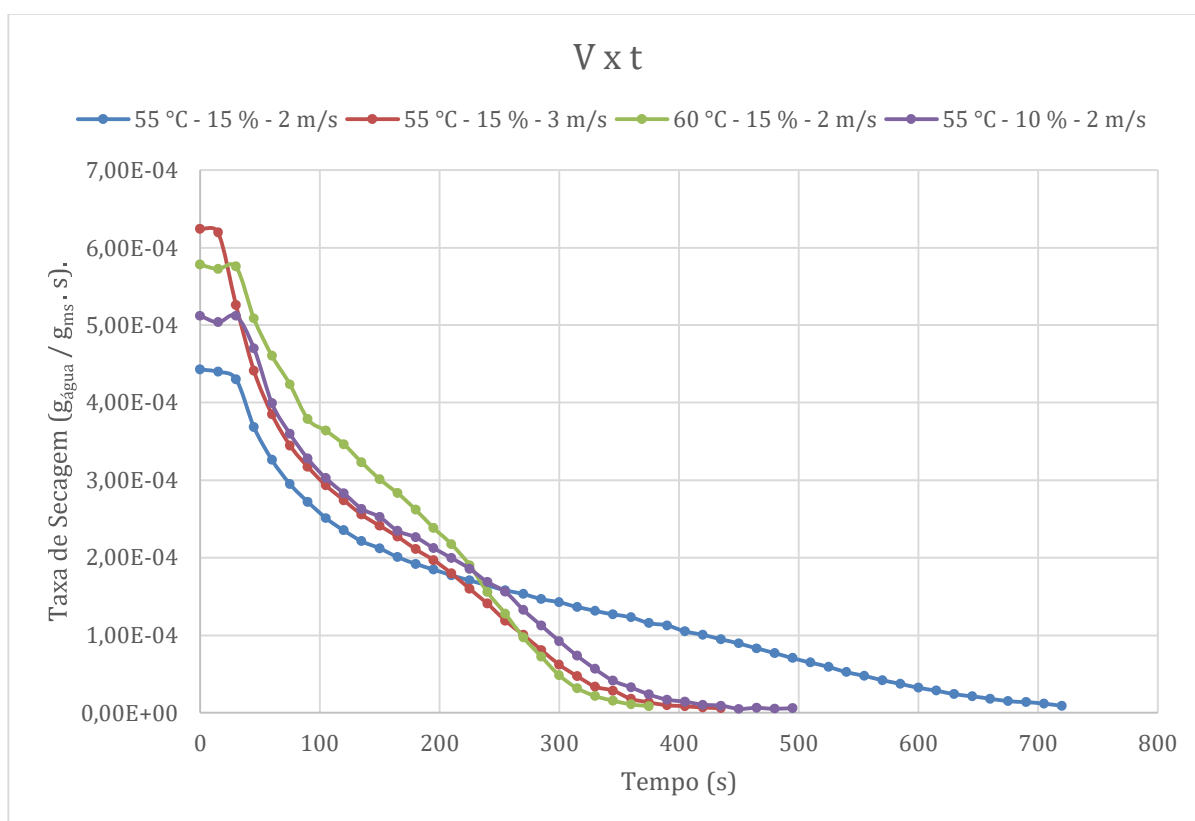
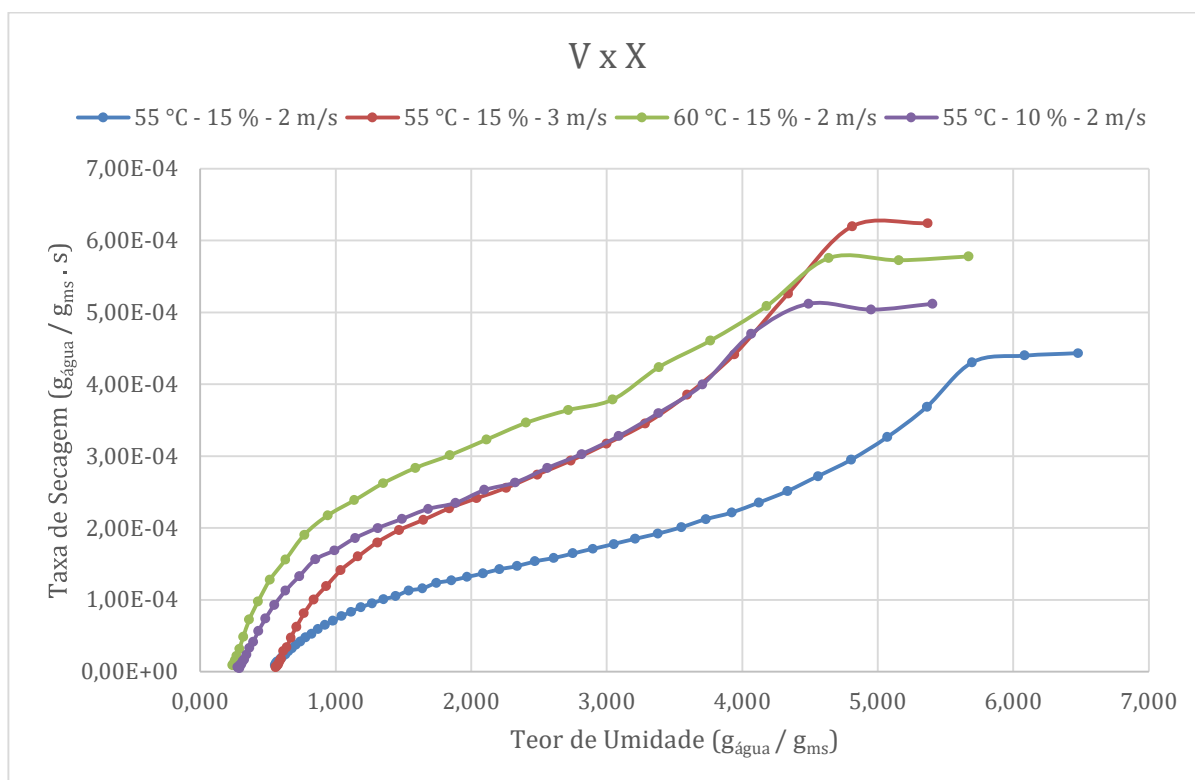


Gráfico 4: Velocidade de secagem dos produtos em função do teor de umidade.



A partir dos Gráficos 3 e 4, é possível constatar que todos os experimentos apresentaram um curto período de taxa constante, no qual o teor de umidade crítico (X_{cr}) variou entre 4,5 e 5,6 $g_{\text{água}}/g_{\text{ms}}$. SARAVACOS E CHARM, em 1962, determinaram o teor de umidade crítico para diversas frutas e vegetais e reportaram valores entre 3,5 e 5,5 $g_{\text{água}}/g_{\text{ms}}$. De acordo com os estudos de J. CHIRIFE (1983), a existência de um curto regime constante em alimentos pode ser atribuída ao baixo potencial de secagem do ar, isto é, baixos parâmetros de secagem, e ao alto conteúdo de água do alimento. Um período curto de taxa constante também foi constatado por VELIĆ *et al.* (2004) para secagem de maçãs. MAZZA E LEMAGUER (1980) também reportaram um período de taxa constante muito curto para fatias de cebola. Entretanto este período não foi observado por KUMAR *et al.* (2011) em seus experimentos de secagem para o bagaço de cenoura.

Apesar de existir um período de taxa constante, a secagem ocorre predominantemente dentro do período de taxa decrescente, se iniciando logo que o produto atinge seu teor de umidade crítico. É importante salientar que durante o regime constante o produto se encontra extremamente úmido e a velocidade é controlada pelas condições externas de secagem, i.e., a água migra do interior para a superfície do produto na mesma taxa na qual ela é evaporada. Entretanto, após atingir o X_{cr} , as resistências internas aumentam rapidamente e o transporte

interno de umidade não consegue mais suprir a quantidade de água evaporada, dando início ao período II da secagem, o período de taxa decrescente. BELGHIT *et al.* (1999) em seus experimentos com sálvia-comum, concluiu que a transferência de calor e massa devido a convecção não são fatores limitantes para o processo de secagem. Os fatores limitantes são os fatores internos que controlam a transferência de umidade do interior para a superfície do produto.

Durante o período de taxa decrescente, as curvas apresentam duas quedas. A primeira queda acontece logo após o produto atingir o X_{cr} , denominada como primeira fase de taxa decrescente. A segunda queda ocorreu quando o teor de umidade estava em aproximadamente $1 g_{\text{água}}/g_{ms}$, sendo denominada como segunda fase de taxa decrescente. A primeira fase ocorre, pois, a secagem passa a depender do mecanismo de difusão do produto, que é muito mais lenta que as transferências de massa por convecção, o que resulta nas quedas das taxas de secagem. Nesta fase ocorre a remoção da água intersticial, a água que se encontra no interior dos poros e que possui, ainda, uma boa mobilidade, porém, à medida que o teor de umidade se aproxima do equilíbrio, torna-se necessário remover a água que possui maior interação com o alimento, dando início a segunda fase de taxa decrescente. Durante essa fase a água possui pouca ou quase nenhuma mobilidade, necessitando de uma grande quantidade de energia para ser evaporada.

Tomando apenas o período de secagem constante, é possível determinar os coeficientes de transferência de calor e massa, h e k_p , a partir das Equações 12 e 13, respectivamente. Os parâmetros da equação, como a temperatura de bulbo úmido, θ_{bu} , e as pressões p_{vs} e pp_a , podem ser obtidos de uma carta psicrométrica, que é um gráfico que expressa as propriedades do ar para uma determinada temperatura, umidade e pressão, ou a partir de uma calculadora psicrométrica.

Para o cálculo do coeficiente de difusão traça-se uma curva denominada de razão de umidade (RU) pelo tempo, onde a RU é dado por $(X(t) - X_e)/(X_0 - X_e)$, representado pelo Gráfico 5. O gráfico de $\ln(\text{RU})$ x tempo, Gráfico 6, resulta em uma reta, cujo o coeficiente angular, *i.e.* sua inclinação, é usado para o cálculo do coeficiente de difusão efetivo, através da Equação 18.

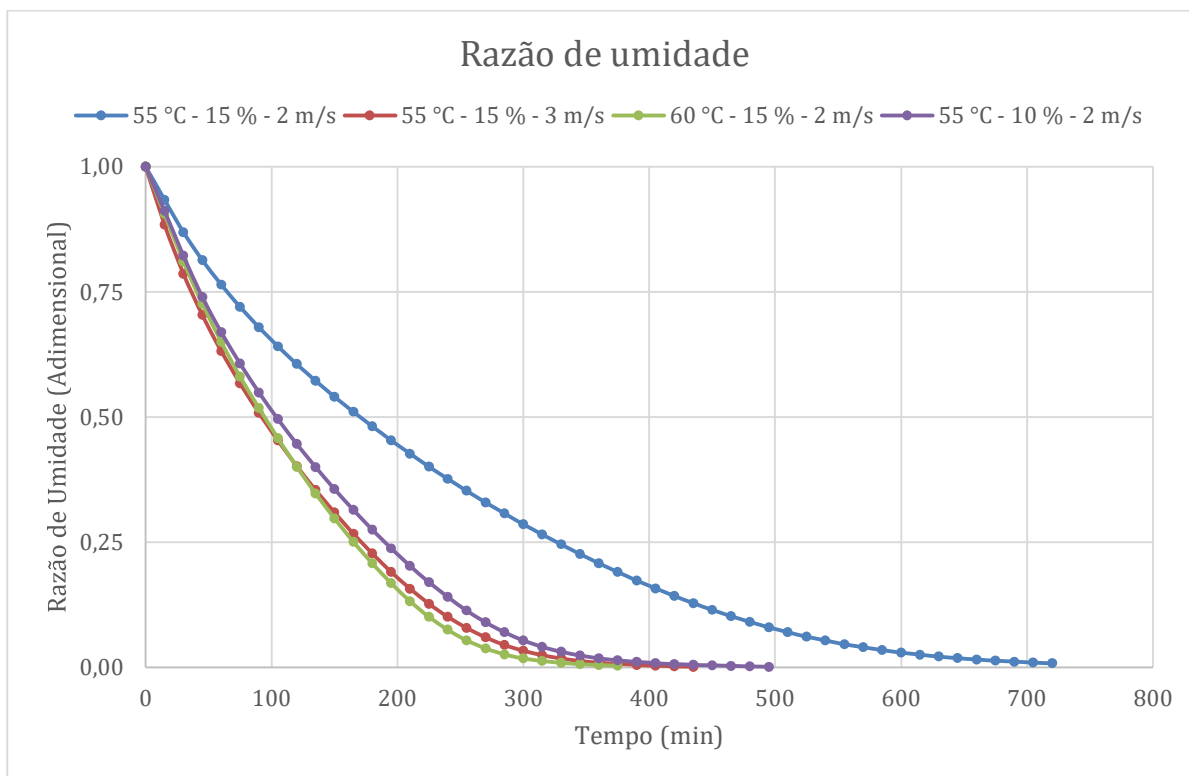
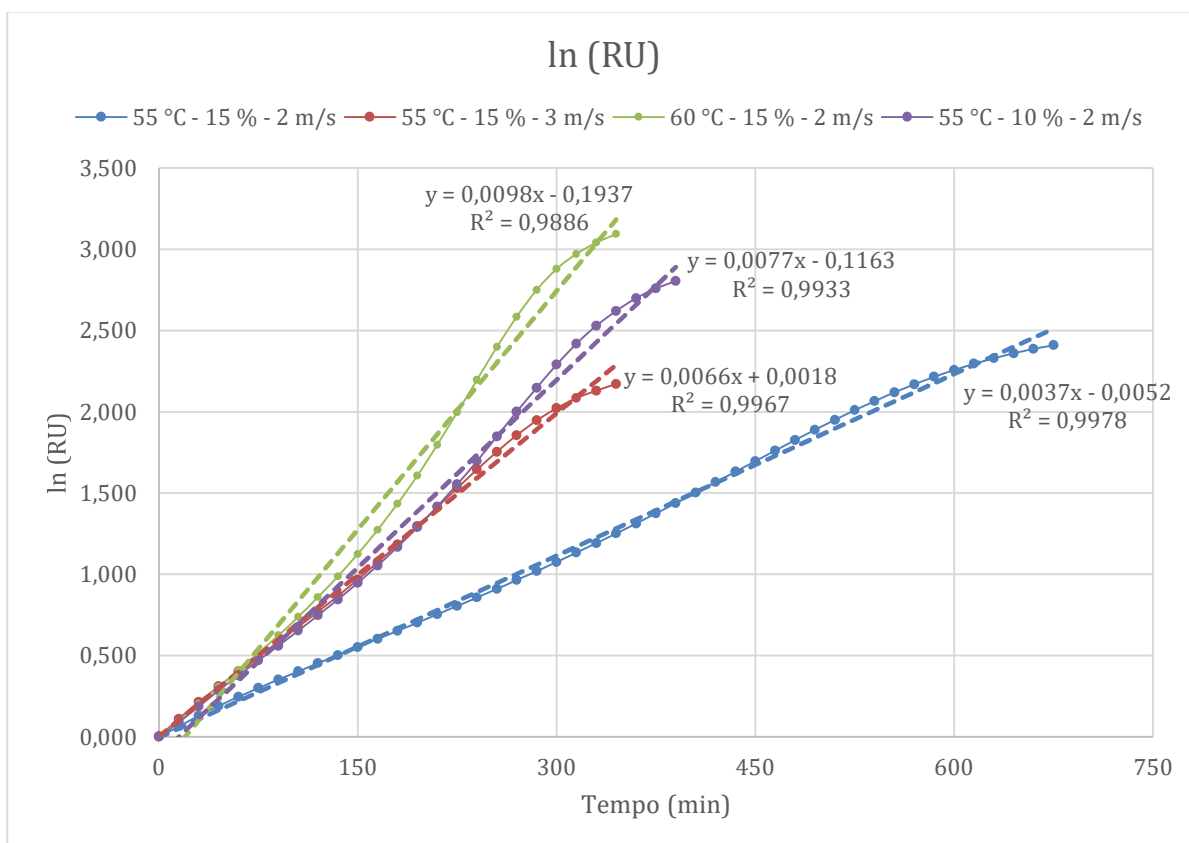
Gráfico 5: Razão de umidade das fatias de maçãs em função do tempo.**Gráfico 6:** Logaritmo neperiano da razão de umidade, $\ln(\text{RU})$, em função do tempo.

Tabela 9: Resultados dos coeficientes de transferência externo e interno.

Parâmetros do ar (°C, %, m/s)	h ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$)	k_p ($kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot KPa^{-1}$)	D_{ef} (m^2/s)
55 - 15 - 2	46,340	$2,91 \times 10^{-4}$	$3,82 \times 10^{-10}$
55 - 15 - 3	67,570	$4,57 \times 10^{-4}$	$7,15 \times 10^{-10}$
60 - 15 - 2	64,660	$4,05 \times 10^{-4}$	$1,04 \times 10^{-9}$
55 - 10 - 2	54,930	$3,37 \times 10^{-4}$	$9,11 \times 10^{-10}$

O aumento da velocidade do ar durante a secagem, como visto nos Gráficos 3 e 4, aumenta as taxas de secagem, principalmente durante o período constante. Segundo BERK *et al.* (2018), o aumento da velocidade do ar acelera as transferências de calor e massa sobre a superfície do sólido, o que acelera o processo enquanto a evaporação da umidade na superfície for o mecanismo que controla a secagem. O mesmo fato também foi constatado por A. BELGHIT *et al.* (1999) em um experimento de secagem realizado com sálvia comum e o mesmo pode ser observado neste experimento. Se analisarmos a Tabela 9, o coeficiente de transferência de massa teve um aumento mais significativo ao se alterar a velocidade do ar, provocando um maior crescimento das taxas no início da secagem. Entretanto, ao atingir o teor de umidade crítico, o processo passa a depender da difusão da umidade no interior do produto e as taxas caem rapidamente, uma vez que a alteração da velocidade teve o menor efeito sobre este coeficiente de difusão. Essa influência da velocidade do ar sobre a taxa de secagem também foi observada por D. VELIĆ *et al.* (2004) em fatias de maçã com 5 mm de espessura, no qual ele mostrou que o aumento da velocidade do ar eleva as taxas de secagem principalmente no início do processo.

Com a variação da temperatura, também se nota um aumento significativo nas taxas de secagem durante o período constante. Em contrapartida, a elevação da temperatura permitiu as maiores taxas de secagem durante o período de taxa decrescente, o que mostra uma redução significativa das resistências internas do produto. Ao mesmo tempo, pode-se constatar na Tabela 9 que a alteração da temperatura provocou grandes aumentos nos coeficientes convectivos e a maior elevação sobre coeficiente difusivo. A influência da temperatura sobre a secagem tem sido amplamente estudada e resultados semelhantes também foram observados por SACILIK *et al.* (2006) para secagem de maçãs, ZLATANOVIĆ *et al.* (2013) para secagem

de maçãs, VERGARA *et al.* (1997) para maçãs, NIEUWENHUIJZEN *et al.* (2002) para fatias de maçã e WANG E CHAO (2002) para fatias de maçã.

REIS *et al.* (2015) constatou em seu estudo com pimenta de bico que temperatura e a velocidade do ar tiveram efeito sobre a difusividade efetiva e influenciaram significativamente na cinética de secagem. O mesmo comportamento foi observado por SOARES (2007), que concluiu que as taxas de secagem do manjeriço são afetadas tanto pela temperatura como pela velocidade do ar de secagem. Esse comportamento pode ser explicado pela análise da transferência de calor no material submetido a processo de secagem. O aumento da temperatura gera um aumento da diferença de temperatura entre produto e o ar de secagem, e conseqüentemente provoca um aumento na taxa de transferência de calor. A mesma situação é válida para a velocidade do ar, que provoca um aumento no coeficiente convectivo externo de troca térmica, aumentando a taxa de transferência de calor. Este efeito foi observado por VELIĆ *et al.* (2004) em seus experimentos, que também determinou os valores de h para diferentes velocidades do ar de secagem, obtendo valores entre 21,43 e 44,30 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Já RATTI, C., E CRAPISTE, G. H. (1995) em seus estudos obtiveram valores de h entre 41,7 e 63,7 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, para a secagem de fatias de maçã em diferentes condições.

Nos dois casos, as variáveis temperatura e velocidade aumentaram a taxa ou o fluxo de calor do ar para o material, conseqüentemente aumentaram a taxa de transferência de massa do produto para o ar de secagem, diminuindo, assim, o tempo de secagem.

A alteração da umidade relativa também provocou um aumento na velocidade de secagem. De acordo com KLITZE (2007), a umidade relativa determina a capacidade do ar de absorver umidade do produto inserido no ambiente. O ar mais seco (com menor umidade relativa) absorve mais umidade na forma de vapor de água, aumentando as taxas de secagem. Um estudo realizado por S. CHEMKHI, F. ZAGROUBA e A. BELLAGI (2005) com batatas, mostrou que a redução da umidade relativa do ar provocou um crescimento nas taxas de secagem devido ao aumento diferença entre a pressão vapor da superfície e a pressão parcial do ar ($p_{vs} - pp_a$), uma vez que quanto menor a UR do ar, menor a pressão parcial do ar. A. L. J. BIHAIN (2011), obteve os mesmos resultados em um experimento de secagem de soja. I. ZLATANOVIĆ *et al* (2013) também percebeu que o aumento da UR causa uma redução das taxas de secagem de maçãs e um aumento do coeficiente difusivo. Além disso a alteração da umidade do ar permitiu taxas mais elevadas no fim da secagem, permitindo obter um produto final mais seco.

Com relação ao coeficiente de difusão efetivo, existem diversos estudos a respeito de seus valores e de sua influência na durante a secagem. SOUZA E OCÁCIA (2009), encontraram

valores e 10^{-12} a $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, e HENRÍQUEZ *et al.* (2014), entre 10^{-10} e $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, para secagem de maçã. Valores entre $1.42 \cdot 10^{-10}$ a $4.69 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ foram reportados por LAZARIDES, GEKAS e MAVROUDIS (1997) para fatias de maçã. Z. WANG *et al.* obteve a média dos valores da difusividade efetiva para o bagaço de maçã durante o processo de secagem à uma temperatura entre $75 - 105 \text{ }^\circ\text{C}$ variou entre $1.91 - 3.93 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Desta forma é possível constatar que os resultados obtidos neste trabalho estão de acordo com as investigações anteriores de que os valores de D_{ef} estão dentro da faixa de 10^{-11} a $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para alimentos (MADAMBA *et al.*, 1996).

6 CONCLUSÃO

A secagem de alimentos é um processo complexo pois depende de diversos fatores além daqueles que podemos controlar, como as características intrínsecas do produto, como a porosidade, conteúdo de água, concentração de açúcar, geometria e outros. Frutas, legumes, vegetais, grãos ou qualquer outro produto alimentício tem suas características modificadas pelo clima e, portanto, apesar de realizar experimentos somente com maçãs, é impossível garantir que todas possuam propriedades idênticas. Dessa forma, para os experimentos de secagem prioriza-se estudar o comportamento da secagem e não apenas os valores obtidos.

Portanto, para o escopo proposto e analisado neste trabalho, a alteração de todos parâmetros mostrou resultados positivos sobre o tempo de secagem, isto é, diminuíram o tempo do processo. Portanto aumentar a temperatura, aumentar a velocidade ou diminuir a umidade relativa do ar de secagem provoca um aumento das taxas de secagem.

Alterar a velocidade do ar interferiu consideravelmente na secagem da fatia de maçã. Ela permitiu aumentar as transferências externas de calor e massa graças ao aumento significativo dos coeficientes convectivos, h e k_p . A elevação da velocidade foi mais efetiva no início da secagem, que é quando as resistências externas controlam as taxas de secagem.

A temperatura do ar também influenciou significativamente na secagem da maçã. Seu aumento faz com que a diferença de temperatura entre o produto e o ar se torne maior, elevando as taxas de transferência de calor, resultando no aumento das taxas de evaporação da umidade. A elevação da temperatura se mostrou, também, muito eficiente durante o período de taxa decrescente, indicando uma forte correlação entre a temperatura e o coeficiente de difusão.

A umidade relativa reduziu o tempo de secagem e aumentou as taxas de transferência de calor e massa do produto. Isso porque diminuir a umidade relativa fez com que a diferença entre pressão de vapor no produto e a pressão parcial do ar aumentasse. Além disso, o ar mais seco permitiu que o produto atingisse um teor de umidade final mais baixo, mantendo mais elevadas as taxas de secagem durante o período de taxa decrescente.

Apesar dos experimentos terem sido realizados em condições controladas no qual considerou-se como fonte única de calor a convecção, é importante ressaltar que podemos somente mitigar os efeitos da condução ou radiação, tentando reduzir seu impacto, sendo impossível eliminá-las por completa, fazendo com que os coeficientes convectivos de transferência de calor e massa obtidos não sejam os valores reais e seus aumentos possam estar atrelados aos efeitos de outra fonte de calor.

Em estudos da secagem convectiva de produto agrícolas, dificilmente verifica-se os coeficientes de transferência de calor e massa, o que torna difícil comparar os valores encontrados. Entretanto, o fato de não haver muitos estudos a respeito dos coeficientes de convecção é compreensível, uma vez que são poucos os produtos alimentícios que possuem uma fase de secagem constante e, quando o período existe, ele é muito curto, tendo uma pequena influência sobre o tempo total de secagem. De uma forma ou de outra as transferências externas de calor e massa não são os fatores limitantes da operação como um todo. Assim, é evidente que se torna mais importante compreender e estudar os fatores que alteram o mecanismo de difusão, a fim de se obter taxas mais elevadas durante o período de taxa decrescente. Existem atualmente alguns pré-tratamentos que são realizados visando acelerar o período de taxa decrescente, um deles é a realização de pequenos furos no produto que funcionam como um canal artificial que facilita o escoamento da água, outro consiste em imergir o produto em uma solução osmótica sob o efeito do ultrassom, o que resulta na criação de pequenos canais no interior do produto. O intuito de realizar pré-tratamentos em um produto é o de reduzir o custo da secagem com a diminuição do tempo de secagem sem a necessidade de se alterar os parâmetros do ar externo.

Este trabalho procurou abordar somente a influência dos parâmetros do ar sobre a secagem convectiva, não avaliando a qualidade organolépticas do produto, como o odor, a cor, a textura, o gosto ou o valor nutricional. Mas ao se trabalhar com alimentos não podemos descartar os aspectos nutritivos e gastronômicos. Antes de mais nada, deve-se lembrar que o produto será consumido e deve apresentar um gosto agradável ao paladar do consumidor. De nada adianta reduzir os gastos de secagem aprimorando o processo para, no fim, se obter um produto de baixa qualidade que não será vendido. O custo adicional da secagem pode ser reavido com a venda de um produto de alta qualidade.

Tendo em vista os resultados obtidos neste trabalho, estudos complementares sobre o tempo de vida de prateleira dos produtos obtidos também são necessários. Além disso, a relação dos parâmetros com o tempo de secagem não ocorre de forma linear, *i.e.*, se continuar a alterar as características do ar de secagem, provavelmente a redução do tempo será menos efetiva. Então, a realização de mais ensaios variando uma maior quantidade de vezes os parâmetros de secagem, *e.g.*, realizar experimentos com a temperatura do ar em 55 °C, 60 °C, 65 °C, 70 °C e 75 °C, seria interessante para encontrar os parâmetros ótimos de secagem. Seria interessante, também, tentar analisar os coeficientes de calor e massa a partir dos números adimensionais, como os números de Reynolds e Sherwood, por exemplo, comparando com valores experimentais obtidos, uma vez que estes podem não representar os valores reais para os

coeficientes convectivos. Ademais, sabendo que a secagem de produtos alimentares ocorre principalmente durante o período de fase decrescente e que são as transferências internas que limitam o processo de secagem, torna-se importante a realização de estudos sobre influência dos pré-tratamentos na secagem de produtos agrícolas.

7 BIBLIOGRAFIA

1. ABPM. Anuário HF 2016. Disponível em: <http://www.abpm.org.br/portugues/mensagens/imprensa/185_2016/anuario_hf_2016_maca.pdf>. Acesso em 15/07/19 às 14:30.
2. ABRAMOVAY, Ricardo. A atualidade do método de Josué de Castro e a situação alimentar mundial. **Revista de economia e sociologia rural**, v. 3, p. 4, 1996.
3. ASHWORTH, J.C. Use of Bench Scale Tests for Dryer Design, Industrial Drying Short Course. **Department of Chemical Engineering**, McGill University, Montreal, Quebec, Canada, 1978.
4. ASSIS, Fernanda Rosa et al. Desidratação e caracterização físico-química de maçãs impregnadas com lactato de cálcio. 2013.
5. ATUNGULU, G.; NISHIYAMA, Y.; KOIDE, S. Electrode configuration and polarity effects on physicochemical properties of electric field treated apples post harvest. **Biosystems Engineering**, v. 87, n. 3, p. 313-323, 2004.
6. BARBOSA-CÁNOVAS, Gustavo V.; VEGA-MERCADO, Humberto. **Dehydration of foods**. Springer Science & Business Media, 1996.
7. BENDLIN, RCS. Secagem convectiva de erva-mate. **Florianópolis-SC: Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos.-UFSC**, 2003.
8. BERK, Zeki. **Food process engineering and technology**. Academic press, 2018.
9. BONAZZI, Catherine; BIMBENET, Jean-Jacques. Séchage des produits alimentaires Principes. **Techniques de l'ingénieur. Agroalimentaire**, v. 2, n. F3000, p. F3000. 1-F3000. 14, 2003.
10. BOTTOM, Rod. Thermogravimetric analysis. **Principles and applications of thermal analysis**, p. 87-118, 2008.

11. BOYER, Jeanelle; LIU, Rui Hai. Apple phytochemicals and their health benefits. **Nutrition journal**, v. 3, n. 1, p. 5, 2004.
12. BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional da Vigilância Sanitária. Resolução RDC n °272, de 22 de setembro de 2005. Regulamento Técnico para Produtos de Vegetais, Produtos de Frutas e Cogumelos Comestíveis. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 23 set. 2005.
13. CARVALHO, Vera Regina F. Cadeia produtiva da maçã no Brasil: limitações e potencialidades. **Porto Alegre: BRDE**, p. 202011-04, 2011.
14. CASTELLARNAU, Ignasi Iglesias. Situación mundial y perspectivas de las principales variedades de manzano. **ENCONTRO NACIONAL SOBRE FRUTICULTURA DE CLIMA TEMPERADO**, v. 7, p. 103-119, 2004.
15. CELESTINO, Sonia Maria Costa. Princípios de secagem de alimentos. **Embrapa Cerrados-Documentos (INFOTECA-E)**, 2010.
16. CENCI, S.A. Perdas pós-colheita de Frutos e Hortaliças. **EMBRAPA/CTAA**, Rio de Janeiro 2000.
17. CETNARSKI FILHO, Ricardo; DE CARVALHO, Ruy Inacio Neiva; MARTIN, Vinícius Caetano. Caracterização da maçã brasileira comercializada em Curitiba e região metropolitana. **Revista Acadêmica Ciência Animal**, v. 6, n. 1, p. 21-27, 2008.
18. CHEMKHI, S.; ZAGROUBA, F. Development of a Darcy-flow model applied to simulate the drying of shrinking media. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 25, n. 3, p. 503-514, 2008.
19. CHIRIFE, JORGE; MARÍA DEL BUERA, PILAR. Water activity, glass transition and microbial stability in concentrated/semimoist food systems. **Journal of Food Science**, v. 59, n. 5, p. 921-927, 1994.
20. CHIRIFE, J. Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. **Advances in drying**, v. 2, p. 73-102, 1983.

21. SALUNKHE, Dattajirao K.; DESAI, Babasaheb B. Postharvest biotechnology of vegetables.-v. 1-2. 1984.
22. DAUDIN, J. D.; BIMBENET, J. J. Transformation de la prune d'ente en pruneau: Mesure des cinétiques de séchage et incidences technologiques. **Sciences des Aliments**, v. 5, p. 423-446, 1985.
23. EMBRAPA. Visão 2030, o futuro da agricultura brasileira, 2018. Disponível em < <https://www.embrapa.br/visao/trajetoria-da-agricultura-brasileira> >. Acesso em 19 de JUNHO de 2019, às 13:31.
24. FAO. Brasil em Resumo. Disponível em < <http://www.fao.org/brasil/fao-no-brasil/brasil-em-resumo/pt/> >. Acesso em 19 de JUNHO de 2019, às 11:43
25. FAO. **The state of food insecurity in the world**. Rome. 2002.
26. FELLOWS, Peter John. **Food processing technology: principles and practice**. Elsevier, 2009.
27. FENNEMA, Owen R.; DAMODARAN, Srinivasan; PARKIN, Kirk L. Introduction to food chemistry. In: **Fennema's Food Chemistry, Fifth Edition**. CRC Press, 2017. p. 1-16.
28. FERNANDES, FAN *et al.* DESIDRATAÇÃO DE MAÇÃS (MALUS DOMESTICA L.) UTILIZANDO SECAGEM A AR ASSISTIDA POR ULTRA-SOM. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 4902-4909, 2015.
29. FISH, B. P. Diffusion and thermodynamics of water in potato starch gel. In: **Proc 1958 Conf on Fund Aspects of Dehydration of Foodstuffs, Soc Chem Ind**. 1958. p. 24-36.
30. HONORES, Coya *et al.* Estudo de secagem da maçã (Malus spp. Variedade Golden delicious). 1995.
31. JANNOT, Yves *et al.* Modeling of banana convective drying by the drying characteristic curve (DCC) method. **Drying technology**, v. 22, n. 8, p. 1949-1968, 2004.

32. JARDINE, Carolina. Perdas: quando a produção não vai para o saco. **O Brasil Agrícola**, p. 12-21, 2002.
33. KARATHANOS, V. T.; VILLALOBOS, G.; SARAVACOS, G. D. Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data. **Journal of food science**, v. 55, n. 1, p. 218-223, 1990.
34. KIRANOUDIS, C. T. et al. Drying kinetics of some fruits. **Drying technology**, v. 15, n. 5, p. 1399-1418, 1997.
35. KLAGENBOECH, R.; SILVA, G. M. C. Influência da velocidade na cinética de secagem e nas características nutricionais da mistura de bagaço de malte e levedura (*Saccharomyces cerevisiae*). In: **SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA, 9., 2012**, Curitiba. Anais... Toledo: UTFPR, 2012
36. KROKIDA, M. K.; MARINOS-KOURIS, D. Rehydration kinetics of dehydrated products. **Journal of Food Engineering**, v. 57, n. 1, p. 1-7, 2003.
37. KUMAR, N.; SARKAR, B. C.; SHARMA, H. K. Effect of air velocity on kinetics of thin layer carrot pomace drying. **Food Science and Technology International**, v. 17, n. 5, p. 459-469, 2011.
38. LEUNG, H. K. **Water activity and other colligative properties of foods**. 1986.
39. MADAMBA, Ponciano S.; DRISCOLL, Robert H.; BUCKLE, Ken A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of food engineering**, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996.
40. MARTINS, Carlos Roberto; DE MELLO FARIAS, Roséli. Produção de alimentos x desperdício: Tipos, causas e como reduzir perdas na produção agrícola–Revisão. **Revista da FZVA**, v. 9, n. 1, 2002.
41. MASKAN, Aysun; KAYA, Sevim; MASKAN, Medeni. Hot air and sun drying of grape leather (pestil). **Journal of food engineering**, v. 54, n. 1, p. 81-88, 2002.

42. MASKAN, Medeni. Microwave/air and microwave finish drying of banana. **Journal of food engineering**, v. 44, n. 2, p. 71-78, 2000.
43. MAZZA, G.; LEMAGUER, M. Dehydration of onion: some theoretical and practical considerations. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 15, n. 2, p. 181-194, 1980.
44. MCCABE, Warren Lee; SMITH, Julian Cleveland; HARRIOTT, Peter. **Unit operations of chemical engineering**. New York: McGraw-hill, 1993.
45. MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Principles, methods and applications of the convective drying of foodstuffs. **Food and Bioproducts Processing**, v. 77, n. 3, p. 175-193, 1999.
46. MENON, A. S.; MUJUMDAR, A. S. Energy saving in the drying of solids. **Indian Chem. Eng**, v. 14, n. 2, p. 8-13, 1982.
47. METZGER, Thomas; IRAWAN, Anton; TSOTSAS, Evangelos. Influence of pore structure on drying kinetics: A pore network study. **AIChE Journal**, v. 53, n. 12, p. 3029-3041, 2007.
48. MOREIRA, Lunian Fernandes *et al.* CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE MAÇÃS DESIDRATADAS. In: **VII CONNEPI-Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação**. 2012.
49. MUJUMDAR, Arun S. Drying technology in agriculture and food science. **Drying Technology**, v. 19, n. 6, p. 1217-1218, 2001.
50. MUJUMDAR, Arun S. and DEVAHASTIN, Sakamon. Industrial Transfer Processes. Department of Mechanical Engineering National University of Singapore, 2011.
51. MUJUMDAR, Arun S. **Handbook of industrial drying**. CRC press, 2014.
52. NADEAU, J.-P.; PUIGGALI, J.-R. Séchage: des processus physiques aux procédés industriels. 1995.

53. NEWMAN, Gail M.; PRICE, William E.; WOOLF, Lawrence A. Factors influencing the drying of prunes 1. Effects of temperature upon the kinetics of moisture loss during drying. **Food chemistry**, v. 57, n. 2, p. 241-244, 1996.
54. OKOS, M.R.; NARSIMHAN, G.; SINGH, R.K.; WEITNAEUR, A.C. Food Dehydration. **In Handbook of Food Engineering**. Ch, v. 1, p. 1-10, 1992.
55. PARK, Kil Jin Brandini *et al.* Secagem: fundamentos e equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 16, n. 1, p. 93-127, 2014.
56. PARK, Young W.; BELL, Leonard N. Determination of moisture and ash contents of foods. **FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY-NEW YORK-MARCEL DEKKER-**, v. 138, n. 1, p. 55, 2004.
57. PIOTROWSKI, D.; LENART, A. Recent advances in the drying of apples under variable process conditions. **Processing foods. Quality optimization and process assessment**, p. 229-248, 1999.
58. PROTZEK, E. C. Desenvolvimento de tecnologia para o aproveitamento do bagaço de maçã na elaboração de pães e biscoitos ricos em fibra alimentar. 1997. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Química) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
59. RAHMAN, Mohammad Shafiur. Food preservation: overview. In: **Handbook of food preservation**. CRC Press, 2007. p. 21-36.
60. RAHMAN, Mohammad Shafiur. Food stability beyond water activity and glass transition: macro-micro region concept in the state diagram. **International Journal of Food Properties**, v. 12, n. 4, p. 726-740, 2009.
61. RECH, Samara; CARIO, Silvio Antonio Ferraz; AUGUSTO, Cleiciele Albuquerque. Avaliação conjuntural da produção e comercialização da maçã em Santa Catarina e no Rio Grande do Sul: aspectos comparativos. **Indicadores Econômicos FEE**, v. 42, n. 1, p. 89-106, 2014.

62. REIS, D. R. *et al.* Influência das características do ar na cinética de secagem de pimenta variedade bico. *Brazilian Journal Food Technology*, v. 18, n. 2, p. 146-154, 2015.
63. RIZZON, Luiz Antenor; BERNARDI, João; MIELE, Alberto. Características analíticas dos sucos de maçã Gala, Golden Delicious e Fuji. ***Ciência e Tecnologia de Alimentos***, v. 25, n. 4, p. 750-756, 2005.
64. ROZIS, J. F.; GUINEBAULT, A. Sécher des produits alimentaires. ***Techniques, procédés, équipements, GRET, CTA, GERES, FAO, Collect. Le point sur, Paris, France***, 1995.
65. SABAREZ, Henry *et al.* Modelling the kinetics of drying of d'Agen plums (*Prunus domestica*). ***Food Chemistry***, v. 60, n. 3, p. 371-382, 1997.
66. SACILIK, Kamil; ELICIN, Ahmet Konuralp. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of food engineering*, v. 73, n. 3, p. 281-289, 2006.
67. SARAVACOS, G. D.; CHARM, S. E. A study of mechanism of fruit and vegetable dehydration. *Food technology*, v. 16, n. 1, p. 78-&, 1962.
68. SCHULTZ, E. L. Influência das condições de secagem sobre o encolhimento e propriedades de transporte em fatias de maçã. Dissertação de Mestrado (Engenharia Química), UFSC, Florianópolis, 113 p., 1999
69. SEBRAE. Frutas secas vêm ganhando o paladar da população. Mercado ao Seu Alcance, 2014. Disponível em: < <http://www.sebraemercados.com.br/frutas-secas-vem-ganhando-o-paladar-da-populacao> >. Acesso em: 17 de JUNHO de 2019, às 10:48.
70. SILVA, J. de S. ***Secagem e armazenagem de café: tecnologias e custos***. Jard Editora, 2001.
71. SILVA, J. S.; CARVALHO, G. R. Amostragem e determinação de umidade de grãos. ***Viçosa, Centreinar***, 1980.
72. TREYBAL, Robert E. Mass transfer operations. ***New York***, v. 466, 1980.

73. VALENTE, Pedro Paulo Sanhes da Silva. Desidratação osmótica e secagem de abacaxi (ananas comosus (L.) Merrill), variedade perola. 2007. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, SP.
74. VAN NIEUWENHUIJZEN, N. H.; ZAREIFARD, M. R.; RAMASWAMY, H. S. Osmotic drying kinetics of cylindrical apple slices of different sizes. **Drying Technology**, v. 19, n. 3-4, p. 525-545, 2001.
75. VASSEUR, Jean. Séchage: principes et calcul d'appareils-Séchage convectif par air chaud (partie 1). 2009.
76. VELIĆ, Darko *et al.* Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. **Journal of Food Engineering**, v. 64, n. 1, p. 97-102, 2004.
77. VERGARA, F. *et al.* Analysis of the drying processes of osmotically dehydrated apple using the characteristic curve model. **Drying Technology**, v. 15, n. 3-4, p. 949-963, 1997.
78. WANG, Zhengfu *et al.* Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. **Food Research International**, v. 40, n. 1, p. 39-46, 2007.
79. YILBAS, B.; HUSSAIN, M.; DINCER, I. Heat and moisture diffusion in slab products due to convective boundary condition. **Heat and Mass Transfer**, v. 39, n. 5-6, p. 471-476, 2003.
80. ZLATANOVIĆ, Ivan; KOMATINA, Mirko; ANTONIJEVIĆ, Dragi. Low-temperature convective drying of apple cubes. *Applied Thermal Engineering*, v. 53, n. 1, p. 114-123, 2013.