

Instituto Politécnico de Viseu

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu



Rafael Marques Almeida Santos

Secagem de Produtos e Subprodutos Agrícolas

maio de 2022

Instituto Politécnico de Viseu

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu

Rafael Marques Almeida Santos

Secagem de Produtos e Subprodutos Agrícolas

Tese de Mestrado

Mestrado em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Professor Doutor Carlos Alberto Catorze Pereira

Professor Doutor Sérgio Miguel Gomes Lopes



maio de 2022

“Mudam-se os tempos, mudam-se as vontades, muda-se o ser, muda-se a confiança;
Todo o mundo é composto de mudança, tomando sempre novas qualidades.”

(Luís Vaz de Camões)

RESUMO

O estudo sobre os parâmetros da secagem é necessário para otimizar o processo e a obtenção do produto com boa qualidade que satisfaça as exigências dos consumidores. Assim é necessária a determinação de curvas de secagem, que permitam prever o momento em que o produto atingirá o teor de água esperado.

No presente trabalho foi efetuada uma caracterização experimental da massa dos produtos ao longo da secagem, e posteriormente a modelação matemática dos dados experimentais obtidos. Para este estudo da secagem os produtos utilizados foram os mirtilos e as framboesas. Estes produtos foram sujeitos a dois tipos de ensaios de secagem: ao ensaio de secagem completa, em estufa colocada a 105°C para a determinação da humidade inicial dos produtos e ao ensaio em câmara climática com controlo das condições de temperatura e da humidade do ar no seu interior. Este processo foi repetido para todos os casos, tendo por base as condições de temperatura e de humidade a que se pretendia efetuar a secagem dos produtos. Durante os testes efetuados na câmara climática foi monitorizada a evolução da massa das amostras ao longo do tempo de secagem, obtendo-se as respetivas curvas de secagem. As condições de secagem foram a diferentes temperaturas (40, 50 e 60°C) com humidade relativa de 10%.

Através das curvas de secagem obtidas a partir dos ensaios, observou-se que a temperatura exerceu grande influência na secagem, pois quando se aumentou a temperatura ocorreu uma diminuição do tempo do processo e um conseqüente aumento da taxa de secagem. Os modelos matemáticos de Newton, o de Henderson e Pabis, o do Logarítmico e do exponencial de dois termos, foram ajustados aos dados experimentais mediante uma análise de regressão não-linear, recorrendo ao programa computacional IMB SPSS STATISTICS. Após a análise matemática, foi verificado que o modelo do Logarítmico foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais com base nos maiores valores do coeficiente de determinação R^2 e os menores valores do erro médio absoluto (MAE) e da raiz do erro quadrático médio (RMSE).

ABSTRACT

The study of drying parameters is necessary to optimize the process and obtain a product with good quality that meets the demands of consumers. So, it is necessary to determine the drying curves, which allow predicting the moment when the product will reach the expected water content.

In the present work was done an experimental characterization of the mass of the products during drying, and later the mathematical modeling of the obtained experimental data. For this drying study, the products used were blueberries and raspberries. These products have been subjected to two types of drying tests: the complete drying test, in an oven placed at 105°C for the determination of the initial humidity of the products and the test in a climatic chamber with control of the temperature conditions and humidity inside them. This process was repeated for all cases, based on the temperature and humidity conditions to which the products were to be drying. During the tests in the climate chamber, the evolution of the mass of the samples was monitored over the drying time, obtaining the respective drying curves. Drying conditions were at different temperatures (40, 50 and 60°C) with a relative humidity content of 10%.

Through the drying curves obtained from the tests, it was observed that the temperature had a great influence on the drying, because when the temperature was increased, there was a decrease in the process time and a consequent increase in the drying rate. The Newton, Henderson and Pabis, logarithmic and two-term exponential mathematical models, were adjusted to the experimental data through a nonlinear regression analysis, using the computer program IBM SPSS STATISTICS. After the mathematical analysis, it was verified that the Logarithmic model was the best fit to the experimental data based on the highest values of the coefficient of determination R^2 and the lowest values of the mean absolute error (MAE) and root mean square error (RMSE).

PALAVRAS CHAVE

Subprodutos
Secagem Natural
Secagem Artificial
Água
Teor de Humidade
Taxa de secagem
Modelos Matemáticos

KEY WORDS

Subproducts
Natural drying
Artificial drying
Water
Humidity Content
Drying Rate
Mathematical Models

AGRADECIMENTOS

Todo o apoio e colaboração prestados por algumas pessoas foi fundamental para a concretização da minha dissertação, por isso não posso deixar de lhes demonstrar o meu profundo agradecimento a elas.

Aos meus orientadores, ao Professor Doutor Carlos Alberto Catorze Pereira e ao Professor Doutor Sérgio Miguel Gomes Lopes, pela pronta colaboração face a todas as minhas solicitações e total disponibilidade em todo o trabalho desenvolvido, pelas valiosas sugestões e conselhos, pela acessibilidade e simpatia demonstradas e pela confiança que sempre me concederam.

Aos colegas que estiveram no Projeto I&D: Desidratador S2D e no projeto das Escolas de Verão do IPV, nomeadamente o Pedro Cardão e o Pedro Nogueira, por colaborarem comigo nos ensaios de secagem do mirtilo e da framboesa.

À minha família, em especial aos meus pais e às minhas irmãs, pelo incansável apoio, paciência e pelas palavras corretas nos momentos oportunos que me incentivaram à conclusão deste projeto.

À minha namorada pelo enorme apoio, paciência, amizade, compreensão ao longo de todo este percurso académico.

Aos meus amigos da escola e do mestrado que me acompanharam ao longo de toda a minha vida académica, pelas palavras de incentivo e encorajamento, amizade e pelos bons momentos proporcionados.

Por fim, e não sendo menos importante, a todas pessoas que diretamente ou indiretamente contribuíram para a realização deste projeto.

MUITO OBRIGADO!!!

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE TABELAS.....	xvii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xix
ABREVIATURAS E SIGLAS	xxi
NOMENCLATURA	xxiii
1. Introdução.....	1
2. Estado da arte.....	3
2.1. Processo de secagem.....	3
2.2. Produtos e subprodutos agrícolas	6
2.3. Secagem natural.....	8
2.3.1. Energia solar	9
2.3.2. Secadores solares.....	11
2.3.2.1. Tipos de secadores solares	12
2.4. Secagem artificial	18
2.4.1. Secadores por convecção	19
2.4.2. Secadores por contacto ou por difusão	19
2.4.3. Secadores por radiação	21
2.4.4. Secadores dielétricos	22
2.4.5. Secadores de liofilização	22
2.4.6. Secadores por vapor superaquecido	23
2.4.7. Secadores por spray	24
2.4.8. Secadores de leitos fluidizados ativos	24
2.5. Fatores que influenciam a secagem	25
2.6. Mecanismos de transferência de massa na secagem.....	29
2.7. Curvas de secagem.....	31
2.8. Modelação matemática das curvas de secagem.....	34
3. Estudo de caso.....	37
3.1. Seleção dos produtos a estudar.....	38
3.2. Equipamentos e procedimento experimental	41
3.3. Resultados	45
4. Conclusões finais	53
4.1. Conclusões sobre os resultados obtidos	53
4.2. Sugestões para trabalhos futuros	54
REFERÊNCIAS.....	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de secagem artificial mais comuns (Fonte: Adaptado de Oliveira, 2009)	5
Figura 2 – Distribuição média anual da radiação horizontal em Portugal (fonte: Global Solar Atlas 2.0, 2019)	10
Figura 3 – Representação dos tipos de radiação obtidos a partir da radiação solar (fonte: Souza et al., 2018).....	11
Figura 4 – Tipos de secadores solares (Adaptado de: Ekechukwu & Norton, 1999).....	13
Figura 5 - Secador solar direto com convecção forçada (Adaptado de: Ekechukwu & Norton, 1999).....	15
Figura 6 - Secador solar indireto com convecção natural (Adaptado de: Ekechukwu & Norton, 1999).....	16
Figura 7 - Secador solar misto com convecção natural (Adaptado de: Ekechukwu & Norton, 1999).....	17
Figura 8 - Secador solar híbrido (Fonte: Fudholi et al., 2010)	18
Figura 9 - Secador do tipo tambor (Fonte: Puhl & Nitzke, 2010)	20
Figura 10 - Esquema de secador IR de design simples (Adaptado de: Chua & Chou, 2003)	21
Figura 11 - Secagem por vapor superaquecido (Fonte: Park et al., 2007)	23
Figura 12 - Configuração típica de um sistema SLF simples (Adaptado de: Chua & Chou, 2003)	25
Figura 13 – Processo de transferência de massa num alimento (Fonte: adaptado de Sabarez, 2015)	30
Figura 14 – Estabilização dos produtos testados em ambiente laboratorial.....	42

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos matemáticos de camada fina (Adaptado de:Sallam et al., 2015)....	35
Tabela 2 - Descrição dos equipamentos utilizados.....	43
Tabela 3 - Tabela resumo dos ensaios efetuados.....	45
Tabela 4 - Teor de humidade de equilíbrio, constantes dos modelos e parâmetros estatísticos para os ensaios com framboesa a uma humidade relativa a 10% e às temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C	48
Tabela 5 - Teor de humidade de equilíbrio, constantes dos modelos e parâmetros estatísticos para os ensaios com o mirtilo a uma humidade relativa a 10% e às temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C	49

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curvas de secagem (Adaptado de Park et al., 2014)	32
Gráfico 2 – Exemplo de uma curva de evolução do teor de humidade de um produto ao longo do tempo de secagem (Adaptado de: Celestino, 2010)	33
Gráfico 3 - Evolução da produção (ton) de frutos vermelhos por tipo de cultura (Fonte: Millennium AgroNews, 2021).....	39
Gráfico 4 – Variação anual do preço (€/Kg) da framboesa (Fonte: Millennium AgroNews, 2021)	39
Gráfico 5 - Variação anual do preço (€/Kg) do mirtilo (Fonte: Millennium AgroNews, 2021)	40
Gráfico 6 - Curvas de secagem da framboesa resultantes dos ensaios efetuados, com a humidade relativa a 10% e às temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.	46
Gráfico 7 - Curvas de secagem do mirtilo resultantes dos ensaios efetuados, com a humidade relativa a 10% e às temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.	46
Gráfico 8 - Variação da fração de água evaporável da framboesa resultantes dos ensaios efetuados, com a humidade relativa a 10% e às temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C. ..	47
Gráfico 9 - Variação da fração de água evaporável do mirtilo resultantes dos ensaios efetuados, com a humidade relativa a 10% e às temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C. ..	48
Gráfico 10 – Curvas de secagem da framboesa resultantes da aplicação do modelo Logarítmico estimado para uma humidade relativa de 10% e temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.....	50
Gráfico 11 - Curvas de secagem do mirtilo resultantes da aplicação do modelo Logarítmico estimado para uma humidade relativa de 10% e temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.....	51

ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ADDLAP</i>	Associação de Desenvolvimento Dão Lafões e Alto Paiva
<i>GPP</i>	Gabinete de Planeamento, Políticas e Administração Geral
<i>IR</i>	Infravermelho
<i>MW</i>	Micro-ondas
<i>RF</i>	Radiofrequência
<i>SLF</i>	Secagem em leito fluidizado
<i>UNCHLL</i>	Unidade de Nutrição Clínica do Hospital Lusíadas Lisboa

NOMENCLATURA

h	Altura	(m)
a_w	Atividade da água	
R^2	Coeficiente de Determinação	
a	Constante do modelo	
b	Constante do modelo	
c	Constante do modelo	
g	Constante do modelo	
j	Constante do modelo	
n	Constante do modelo	
k	Constante do modelo	
k_1	Constante do modelo	
k_2	Constante do modelo	
D_{ef}	Difusidade efetiva de massa	(m ² /s)
MAE	Erro médio absoluto	(%)
w	Largura	(m)
m_t	Massa da amostra no tempo t	(g)
m_e	Massa de equilíbrio da amostra	(g)
m_f	Massa final da amostra	(g)
m_s	Massa seca do produto	(g)
m	Massa total do produto	(g)
N	Número de observações	
P	Pressão de vapor de água no produto	(Pa)
P_0	Pressão de vapor de água pura	(Pa)
$RMSE$	Raiz do erro quadrático médio	
RH	Razão de humidade ou fração evaporável	
m_v	Taxa de fluxo de massa	(kg/s)
t	Tempo	(s)
TH_t	Teor de humidade da amostra no tempo t	(g/g)
TH_e	Teor de humidade de equilíbrio da amostra	(g/g)
TH_0	Teor de humidade inicial da amostra	(g/g)
TH_{bh}	Teor de humidade na base húmida	(%)
TH_{bs}	Teor de humidade na base seca	(%)
H_r	Humidade relativa do ar	(%)
$RH_{exp,i}$	Valores experimentais da fração evaporável	
$RH_{pre,i}$	Valores teóricos da fração evaporável	
v	Velocidade do ar	(m/s)

e) Índices inferiores gerais

<i>bs</i>	Base seca
<i>bh</i>	Base húmida
<i>ef</i>	Efetiva da massa
<i>e</i>	Equilíbrio
<i>f</i>	Final do processo
<i>i</i>	Início do processo
<i>s</i>	Amostra após a secagem
<i>0</i>	Inicial
<i>t</i>	No tempo t
<i>v</i>	Velocidade
<i>exp,i</i>	Valor experimental
<i>pre,i</i>	Valor teórico
<i>r</i>	Relativa do ar

g) Símbolos gregos

ρ	Densidade do ar	(kg / m ³)
--------	-----------------	------------------------

1. Introdução

A secagem é uma das atividades domésticas mais antigas da História. Desde há milhares de anos que o homem recorre à radiação solar com a finalidade de secar alimentos para a sua conservação, secar peles de animais para o uso na confeção de roupas, secar outros materiais para diminuir o seu peso e/ou o seu volume, entre outras aplicações.

O primeiro sistema de secagem foi descoberto no sul de França 8000 anos a.c. Este sistema consistia numa superfície de pedra onde os alimentos eram expostos à radiação solar e ao vento, permitindo um desenvolvimento eficaz do processo de secagem. A nível industrial, apenas no século XVIII foi introduzido o método de secagem em massa, tendo em vista a conservação dos alimentos (Belessiotis & Delyannis, 2011). Até mesmo nos dias de hoje, tradicionalmente, após a colheita de alguns alimentos, estes são colocados sobre o solo, nos telhados das casas ou dispostos em recipientes, ficando expostos à radiação solar e ao vento para secarem e assim evitar a sua degradação microbiana.

As desvantagens dos processos descritos relacionam-se sobretudo com a exposição dos alimentos a poeiras, insetos e a eventos climáticas que podem causar degradação da sua qualidade, assim como a alteração da sua aparência ou a perda de propriedades nutricionais (Ferreira & Candeias, 2005). Assim, têm sido investigadas várias técnicas para minimizar o efeito destes fatores que influenciam a qualidade do produto durante a secagem e durante as possíveis etapas seguintes de armazenamento, distribuição e consumo.

Existem 5 métodos principais para preservar os produtos perecíveis, conferindo-lhes proteção contra a contaminação por microrganismos e contra as condições climáticas desfavoráveis, nomeadamente: a fermentação, o tratamento químico, a secagem, o tratamento térmico e o congelamento. Entre estes métodos, a secagem é o que mais se destaca pela sua

eficácia na preservação dos produtos, por conferir aos alimentos maior tempo de vida útil e, em alguns casos, por acrescentar valor ao produto final.

Assim, a secagem é uma operação importante em termos de melhoria e extensão da vida útil dos produtos, sendo comum a sua utilização na conservação de produtos agrícolas por remoção da água e eliminação da sua degradação microbiana (Gunathilake, 2017).

Torna-se por isso necessário o estudo da cinética deste processo, para descrever os mecanismos macroscópicos e microscópicos combinados de transferência de calor e de massa durante a secagem, que é afetada pelas condições de secagem, pelos tipos de secador e características dos materiais a serem secos (Jideani & Anyasi, 2020).

É inegável a importância dos produtos agrícolas na nossa alimentação, uma vez que são ricos em fibra, nutrientes, vitaminas e minerais, no entanto, a sua produção sazonal e os seus elevados teores em água, são características que os tornam muito perecíveis e por isso devem ser consumidos o mais rapidamente possível para evitar que apodreçam. Estas características desafiam a ciência e a tecnologia na procura de novos métodos e no desenvolvimento dos métodos existentes para que seja possível garantir a sua conservação e a sua disponibilidade por um período de tempo mais longo (Quiles et al., 2005).

Neste sentido, os produtos desidratados tem surgido no mercado através de conceitos inovadores, tal como os snacks de fruta, em que estes têm uma maior durabilidade em comparação com a fruta fresca, conservando os benefícios nutricionais e aumentando o seu valor comercial (UNCHLL, 2018).

Assim, tendo por base o exposto anteriormente, o principal foco do presente trabalho assenta no estudo da secagem de produtos e subprodutos agrícolas. A secagem de subprodutos reveste-se de particular interesse pois, resultam de produtos com partes não comestíveis ou de aspeto indesejável, visto que representam muitas vezes custo operacional adicional para as empresas. Estes podem ser utilizados para criar novos alimentos como fontes alternativas de compostos bioativos, melhorando o perfil nutricional do produto, dado que em muitos casos esses subprodutos são ricos em minerais (Oliveira et al., 2021).

Foram estabelecidos alguns objetivos, tais como: compreender os fundamentos do processo de secagem e os fatores que o influenciam, conhecer diferentes sistemas que permitem o processo de secagem de forma eficaz, analisar os resultados de um conjunto de testes de secagem e daí desenvolver modelos matemáticos que reflitam o processo e, finalmente, compreender as vantagens do produto final seco.

2. Estado da arte

2.1. Processo de secagem

O processo de secagem é provavelmente o método mais antigo de preservação de alimentos praticado pela humanidade. Tipicamente, é aplicado após as operações de colheita e o seu principal papel é a remoção da água presente nos produtos. Esta operação evita o crescimento e a reprodução dos microrganismos responsáveis pela decomposição dos produtos, assim como uma redução substancial do peso e do volume dos produtos, minimizando custos de embalagem, armazenamento e transporte (Anand, Sukesha & Thangjam, 2012). Celestino (2010) refere também que este processo permite a diminuição dos desperdícios alimentares, o aumento da produtividade em termos de qualidade e quantidade, a facilidade no transporte dos produtos, o melhor armazenamento e a não necessidade de mão-de-obra especializada.

Para Ferreira e Candeias (2005), a secagem, também designada muitas vezes por desidratação, é um processo que permite retirar a água de um determinado material por evaporação. Trata-se de um processo de transferência simultânea de calor e de massa entre os alimentos e o meio que os envolve. Durante a secagem, podem suceder reações biológicas e bioquímicas, desejáveis ou indesejáveis, tendo como resultado a melhoria ou o prejuízo das características do produto e até mesmo a sua perda (Leitão, 1998).

Apesar de ser, frequentemente, considerado um método dispendioso, dada a quantidade de energia necessária para o processo de secagem, apresenta como vantagem uma boa relação custo/benefício, possibilitando melhor resistência e capacidade de armazenamento aos vários tipos de produtos agrícolas.

Durante troca simultânea de calor e massa, a água livre adjacente à superfície do produto é removida por vários mecanismos, como a difusão de líquido e vapor, fluxos capilares e

gravitacionais e fluxos causados por retração e gradientes de pressão que atravessa os poros dos alimentos. Em Barnwal e Tiwari (2008) é referido que a redução do teor de humidade por secagem diminui o risco de crescimento de microrganismos, minimiza as reações de deterioração, tais como as reações enzimáticas, evita o escurecimento não enzimático e a oxidação de lipídios e pigmentos e reduz substancialmente o peso e o volume dos produtos.

Também Afolabi (2014) refere que os organismos como as bactérias, leveduras e bolores necessitam da água dos alimentos para se desenvolverem e a secagem impede-os de sobreviverem.

A secagem de produtos agrícolas pode ser efetuada de forma natural ou artificial. Na secagem natural é usada a radiação solar e o vento para desidratar os produtos, enquanto que na secagem artificial são utilizados equipamentos (por exemplo os secadores solares) para acelerar o processo (Wankhade et al. 2013, Peske et al. 2012).

A escolha de um dos métodos depende, entre outros fatores, dos requisitos financeiros e operacionais, nomeadamente os custos de operação a suportar, o tempo necessário para o processo de secagem e a qualidade final pretendida do produto. Seja qual for o procedimento de secagem selecionado, o princípio de transferência de calor e de massa será semelhante.

Uma das principais desvantagens da utilização do método de secagem natural é a possibilidade de resultar em produtos de menor qualidade. Este processo pode reduzir a porosidade dos materiais secos, afetando a retenção do sabor, a distribuição da humidade e a capacidade da reidratação, levando ao endurecimento dos produtos de uma forma indesejável (Link et al., 2017) e assim, como resposta às desvantagens que advêm da utilização do método de secagem natural, foram desenvolvidas tecnologias de secagem para obter produtos secos de qualidade e reduzir o tempo do processo e os custos operacionais, recorrendo a processos de secagem artificial (Link et al., 2017).

Na secagem artificial são necessários equipamentos ou sistemas apropriados para o efeito, que permitam o controlo da temperatura, velocidade do escoamento e humidade relativa do ar para se atingir uma secagem eficaz e que proporcione uma redução rápida do teor de humidade sem comprometer a qualidade dos produtos (Rocha et al., 2011).

De acordo com Oliveira (2009), existem diversos produtos, com propriedades químicas e físicas distintas, que exigem um processo de secagem específico, processos estes que permitem um controlo mais pormenorizado, sendo os mais comuns aquelas que são apresentando na Figura 1.



Figura 1 - Tipos de secagem artificial mais comuns (Fonte: Adaptado de Oliveira, 2009)

Oliveira (2009) aborda os diferentes tipos de secadores artificiais, dos quais os distingue conforme a exigência dos materiais a secar requerem um processo de secagem, a maioria deles com propriedades químicas e físicas diferentes. Classifica os mais comuns como:

- Secagem por Convecção: o ar quente atinge à superfície do material por convecção que, ao passar pelo material ou através dele, remove a água livre presente no produto e leva-a para fora do secador.

- Secagem por Contato ou por Condução: o calor é fornecido ao material húmido por contacto, a partir da superfície de placas, cilindros ou paredes do secador. A quantidade de calor transferida para o material a ser seco não depende apenas da condutividade térmica do material de que é feita a superfície de aquecimento, mas também do coeficiente de transferência de calor do meio de aquecimento e do próprio material secante.

- Secagem por Radiação: a energia térmica é fornecida ao material húmido por radiação eletromagnética na faixa de comprimento de onda de 0,76 - 400 μm . A radiação desta faixa, chamada de radiação infravermelha, penetra através da área superficial do material causando a vibração das moléculas, provocando um efeito térmico.

- Secagem Dielétrica: a energia térmica é gerada no interior do material a ser seco (maus condutores ou isolantes), que é colocado num campo eletromagnético de alta frequência, na região de frequência de rádio ou de micro-ondas. Devido às rápidas mudanças na direção do campo eletromagnético, os dipolos do dielétrico ou dos líquidos polares mudam a sua orientação, originando calor através da fricção molecular.

- Secagem por Liofilização: é um processo de estabilização, no qual a substância é primeiramente congelada e, depois, a quantidade de solvente é reduzida por sublimação seguida

da dessorção, com o objetivo de garantir que não permite o crescimento biológico ou reações químicas.

- Secagem por Vapor Sobreaquecido: o secador é preenchido com ar quente. No decorrer do processo, o vapor de água começa a circular juntamente com o ar quente. Deste modo, dá origem a um aumento da pressão interna, ativando uma válvula que regula qualquer sobrepressão, retirando gradualmente o ar ainda presente no secador, fazendo com que a secagem ocorra por contato com o vapor superaquecido.

- Secagem de Leitos Fluidizados Ativos: a secagem por este método consiste na imersão das partículas a serem secas num leito de uma substância dissecante, fluidizada pelo ar.

Conforme o efeito de secagem pretendido, existem processos de desidratação com ou sem a utilização de equipamentos que permitem controlar e acelerar o processo e com maiores cuidados de manipulação e higiene dos produtos.

Em suma, a secagem consiste numa operação pela qual a água livre nos produtos é significativamente reduzida, sem danificar o tecido, a qualidade e a aparência física dos alimentos. Por conseguinte todos os métodos de secagem são dimensionados e direcionados para alcançar uma redução da atividade da água dos produtos e o aumento do seu tempo de vida (Oyinloye & Yoon, 2020).

2.2. Produtos e subprodutos agrícolas

O combate ao desperdício alimentar é um tema que tem vindo a ganhar mais ênfase, na medida em que, cada vez maiores quantidades de determinados produtos, nomeadamente frutas e legumes, vão perdendo a sua frescura, o prazo de validade e até mesmo o seu aspeto, acabando muitas vezes por se transformarem em resíduos (Tribuna, 2020).

Nos últimos anos têm sido estudadas e adotadas diversas alternativas para o aproveitamento dos subprodutos agrícolas, resultando num aumento do seu valor comercial, para além de diminuição dos custos associados ao seu armazenamento, transporte e tratamento. A utilização de metodologias de valorização dos subprodutos a par do processo produtivo principal contribui para a diversificação da oferta dos produtos, para redução da produção de resíduos sólidos, do consumo de energia e água e desta forma para a redução da sua pegada carbónica (Valente, 2015).

A produção agrícola dá origem a elevadas quantidades de diferentes subprodutos e a União Europeia promove o seu aproveitamento de forma a dar-lhes maior valor comercial, paralelamente com a sua recuperação e reciclagem e, assim, contribuírem como alternativa ao uso de recursos naturais (ADDLAP, 2017).

A valorização dos subprodutos agrícolas emerge da necessidade dos produtores e da sociedade de atingir uma produção sustentável de alimentos. Embora esta necessidade já esteja reconhecida, a sua realização tem sido muitas vezes inviabilizada devido à perecibilidade dos

materiais. Todavia, atualmente, a utilização de novas tecnologias que empregam energias renováveis, o uso de equipamentos de dimensão reduzida e de fácil implementação junto dos produtores, facilita a implementação da secagem como método viável que contribui para um desenvolvimento sustentável local e regional (ADDLAP, 2017).

Também o sector agroindustrial gera grande quantidade de subprodutos e resíduos. Os subprodutos de frutas, como as cascas, as aparas, os caules, o farelo e as sementes representam mais de 50% da fruta fresca e por vezes têm um conteúdo nutricional ou funcional (relevante na melhoria do estado de saúde e bem-estar, ou redução do risco de doença) superior ao produto final (Ayala et al., 2011).

Os resíduos de produtos e subprodutos agrícolas também podem resultar dos danos causados aos materiais durante o seu transporte, o seu armazenamento e o seu processamento. Também devem ser considerados os resíduos resultantes da rejeição de alimentos por não terem a forma, o tamanho e o aspeto desejados. A crescente popularidade de sumos de frutas, néctares, produtos congelados e minimamente processados também aumentou a produção de subprodutos e resíduos agrícolas nos últimos anos (Organização das Nações Unidas Para a Alimentação e a Agricultura, FAO, 2016).

O bagaço do mirtilo é um subproduto da fermentação que geralmente é desprezado na natureza, causando poluição ambiental. No estudo feito pelo autor Goldmeyer (2014) revelou que o fabrico de fermentados do mirtilo permite que os consumidores continuem a usufruir dos seus benefícios funcionais, porém na maioria das vezes estes procedimentos produzem resíduos industriais que não são aproveitados, como é o caso do bagaço do mirtilo. Estes resíduos resultantes da produção de bebidas fermentadas, são caracterizados por conter elevados teores de compostos fenólicos devido à extração insuficiente durante a vinificação. Desta forma estes resíduos tornam-se valiosos para a extração de polifenóis. Os subprodutos obtidos após a vinificação constituem uma fonte muito barata para a extração de flavonoides antioxidantes, podendo através da secagem ser convertidos em farinha e posteriormente serem aproveitados como suplementos alimentares, ou para a produção de fitoquímicos.

Um outro exemplo consiste nos subprodutos resultantes do processamento do tomate para a indústria de fabrico de polpa ou concentrado, tais como as peles e sementes. A partir da transformação do tomate, produzem-se resíduos entre 3-4% da produção total (Cordeiro et al., 2020). De acordo com os mesmos autores, esses subprodutos possuem um elevado teor de humidade, entre 70-80%, o que os torna muito perecíveis e com outros inconvenientes, como o alto custo de transporte e o baixo valor nutricional. Os subprodutos que resultam do processamento de tomate industrial são separados industrialmente com vapor e são ricos em fibras e licopeno e são usados sobretudo na alimentação animal e em outras situações para a fertilização das culturas agrícolas.

As agroindústrias em Portugal compreendem vários setores, dos quais mais de metade das instalações são lagares, sendo o subsector do vinho (adegas e destilarias) o segundo mais relevante. O subsector dos frutos e hortícolas e das rações animais representam igualmente um número significativo de instalações e todos os restantes subsectores correspondem a menos de

1% (Valente, 2015). Segundo a mesma autora, nos últimos anos tem ocorrido uma tendência gradual para a valorização do material vegetal, tendo em conta a legislação ambiental cada vez mais restritiva. De grosso modo, a maioria dos subprodutos produzidos no setor dos frutos e hortícolas compreendem a pele e as sementes dos frutos e/ou vegetais, cascas, talos, ou produtos que expõem danos físicos ou químicos. No entanto, apesar do seu valor significativo, estes subprodutos ainda são subaproveitados e o seu potencial valor é frequentemente perdido. As vias tradicionais para a valorização deste tipo de subprodutos são a alimentação animal, a incineração e a compostagem, embora elas nem sempre demonstram eficiência e acarretem custos muitas vezes mais elevados dos que os que são estimados pelas próprias empresas (Valente, 2015).

2.3. Secagem natural

A secagem por exposição ao sol é um dos processos naturais mais primitivos. A energia solar servia essencialmente para efetuar a secagem e conservar os alimentos necessários para o inverno, tais como os vegetais, os peixes, as carnes e as frutas (Belessiotis & Delyannis, 2011).

No processo de secagem ao sol de forma direta, o produto é aquecido através dos raios solares e a humidade que se encontra nos produtos é removida para a sua superfície. Posteriormente é efetuada a transferência dessa humidade para o ar ambiente através da circulação do ar (Belessiotis & Delyannis, 2011).

Esta técnica por radiação solar e sem o recurso a uma estrutura especial, persiste como a modalidade mais largamente praticada na conservação de produtos agrícolas perecíveis, dado que é mais económica, fácil e cómoda. A grande utilização da secagem tradicional é explicada por diversas circunstâncias, designadamente: facilidade do domínio do processo, inexistência de ferramentas e equipamentos dispendiosos, baixo custo final e boa aceitação do produto seco obtido (Leitão, 1998).

Este tipo de secagem exige pouco investimento ou preparação técnica, todavia, segundo Leitão (1998), apresenta algumas desvantagens, designadamente:

- A quase total dependência das condições climáticas, sobretudo da precipitação imprevista, que provoca a regressão do processo de secagem e aumenta os riscos de transformação da cor e deterioração por fungos, insetos, roedores e pássaros;
- A fraca qualidade nutricional do produto seco e das suas características, como o aspeto e o aroma, devido à perda de vitaminas e ao seu escurecimento por exposição direta ao sol;
- O aumento da atividade enzimática que causa a desestruturação do produto e desenvolvimento microbiano com riscos de surgimento de agentes patogénicos;
- O aumento do período necessário para esta prática (preparação, manuseio, proteção contra os agentes nocivos);

- O teor de humidade final não muito reduzido, com aumento do risco de deterioração (maiores perdas) e redução da duração de conservação do produto;
- A qualidade do produto é variável, podendo ficar ou não suficientemente seco;
- A necessidade de grandes áreas, uma vez que a secagem é feita numa camada única;

Para superar os problemas inerentes à secagem tradicional por exposição solar, vários sistemas foram introduzidos, como o secador de estufa e o secador solar híbrido. Esses sistemas são mais rápidos, mais eficientes e mais higiénicos, resultando em perdas de produção menores em relação ao método tradicional de secagem por radiação solar (Hamdi et al., 2018).

Por questões ambientais e devido ao esgotamento esperado dos combustíveis fósseis convencionais e da inflação dos preços destas fontes de energia, a utilização de energias renováveis para as diferentes aplicações aumentou, entre as quais energia solar, especialmente no setor agrícola (Sahu et al., 2016). A utilização da energia solar na secagem é um processo bastante económico para os produtores agrícolas, principalmente para a aplicação em pequenos e médios volumes de produção, quando se pretende conservar o excesso de produção. A aplicação deste processo para uso doméstico é também significativa, mas a uma escala mais reduzida, tanto em produtos agrícolas como em alimentos, nomeadamente em frutas, vegetais, ervas aromáticas e madeiras, contribuindo consideravelmente para a economia das pequenas comunidades agrícolas (Belessiotis & Delyannis, 2011).

2.3.1. Energia solar

O sol é considerado uma fonte de energia renovável e a sua aplicação, como fonte de luz ou de calor, é uma das alternativas energéticas mais promissoras para o ser humano. A energia solar é abundante, é uma fonte limpa, renovável e praticamente inesgotável, permanente e sustentável, não prejudicando os diferentes ecossistemas do planeta (Pires et al., 2015).

Devido à grande distância entre o Sol e a Terra, apenas uma parte da radiação solar emitida atinge a superfície do planeta. Este fornece anualmente ao planeta terra, uma enorme quantidade de energia de aproximadamente 1×10^{18} kWh, o correspondente a cerca de dez mil vezes o consumo mundial de energia verificado nesse mesmo período (Reis, 2019b).

Em Portugal, é notório uma grande disponibilidade da energia solar, tal como apresentado na figura 2. Mais a sul do país é maior a incidência desta energia por metro quadrado, comparativamente com a região norte. No que diz respeito ao número de horas de sol anuais, rondam os valores compreendidos entre as 2000 e 3100 horas, sendo mais elevados na região do Algarve, Interior do Alentejo e na zona de Lisboa (Ramos & Ventura, 1999).



Figura 2 – Distribuição média anual da radiação horizontal em Portugal (fonte: Global Solar Atlas 2.0, 2019)

No entanto as instalações/equipamentos solares sofrem a variabilidade e intermitência da produção devido à sua localização no globo, às condições atmosféricas, aos ciclos dia-noite e aos dias nublados. Por este motivo a radiação solar não atinge o solo terrestre e os equipamentos apenas de forma direta. Ao nível do solo, a radiação total emitida pelo sol subdivide-se em três componentes, nomeadamente:

- **Radiação direta:** pertence à fração de energia que provém diretamente do sol;
- **Radiação difusa:** desviada pelos componentes da atmosfera tais como nuvens, poeiras ou outros obstáculos presentes na atmosfera;
- **Radiação refletida:** também designada por albedo, resulta da reflexão dos objetos circundantes como edifícios, solo, vegetação e a água, entre outros (Morais, 2009).

Na figura 2 está ilustrada a forma como são originados os três tipos de radiação solar apresentadas anteriormente, assim como os restantes elementos que constituem a radiação solar (Souza et al., 2018)

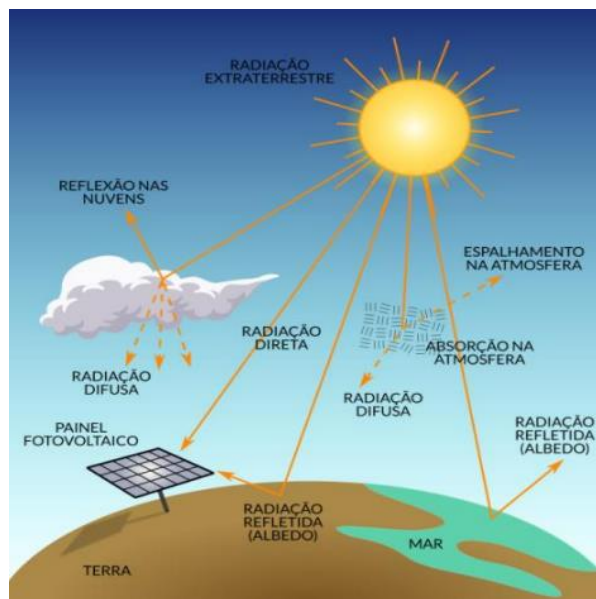


Figura 3 – Representação dos tipos de radiação obtidos a partir da radiação solar (fonte: Souza et al., 2018)

Esta fonte energética é empregue como um recurso que possui diferentes finalidades, dividindo-se em dois grandes grupos, em energia solar fotovoltaica e energia solar térmica. A energia fotovoltaica resulta da conversão dos raios solares em eletricidade através dos painéis fotovoltaicos (Reis, 2019a), e a energia solar térmica consiste na transformação da luz Solar em energia térmica. Um dos equipamentos que permite efetuar esta conversão de energia é o secador solar, que faz a desidratação de produtos usando a energia térmica proveniente do sol para que assim possa ser removida a água presente nos alimentos com a ajuda da convecção do ar.

2.3.2. Secadores solares

A secagem solar térmica distingue-se da secagem natural ao sol, pela utilização de equipamentos (secadores solares) que promovem o processo de secagem (Chua & Chou, 2003). A sua vantagem em relação a outras tecnologias de secagem mecânica deve-se principalmente à sua simplicidade e à reduzida necessidade de energia convencional quando se pretende obter um produto seco.

Os secadores solares de ar são dispositivos simples em que o ar é aquecido utilizando energia solar, sendo este utilizado na secagem de produtos que requerem temperaturas baixas e moderadas de secagem (por exemplo, produtos agrícolas). Os secadores solares para além de promoverem o processo de secagem, também protegem os produtos agrícolas de pragas de insetos, poeira e chuva (Tiwari, 2016).

Em comparação com a secagem natural ao sol, os secadores solares geram temperaturas mais elevadas, menor humidade relativa do ar no seu interior, permitindo assim obter um produto com um menor teor de humidade e a conseqüente redução da deterioração durante o processo de secagem.

Imre e Mujundar (2015) referem que os secadores solares possuem, como componentes principais:

- o espaço de secagem, no qual o material a ser seco é colocado e onde a secagem vai ser realizada;
- o recetor para converter a radiação solar em energia térmica;
- a fonte de energia auxiliar, que é opcional;
- o equipamento de transferência de energia térmica, que transfere a energia térmica ao ar de secagem ou ao produto;
- os meios que mantenham o ar de secagem em movimento;
- a unidade de armazenagem de energia térmica, também opcional;
- o equipamento para o controlo e para a obtenção de dados (opcional);
- os dutos, tubos e outros elementos.

2.3.2.1. Tipos de secadores solares

A classificação dos secadores solares gera algumas discordâncias, uma vez que existem várias configurações e muitas delas resultam de construções experimentais. Assim, estes podem ser classificados conforme o tipo de secador, a temperatura de operação, o material a ser seco, o tipo de operação (por exemplo em lote ou em contínuo), entre outros (Belessiotis & Delyannis, 2011).

Tal como pode ser verificado na figura 4, os secadores solares podem também ser classificados em dois grandes grupos: secadores ativos e secadores passivos. Dentro de cada um destes grupos existem três subclasses, nomeadamente: os secadores solares diretos (secadores integrais), os secadores solares indiretos (secadores distribuídos) e secadores mistos (Ekechukwu & Norton, 1999).

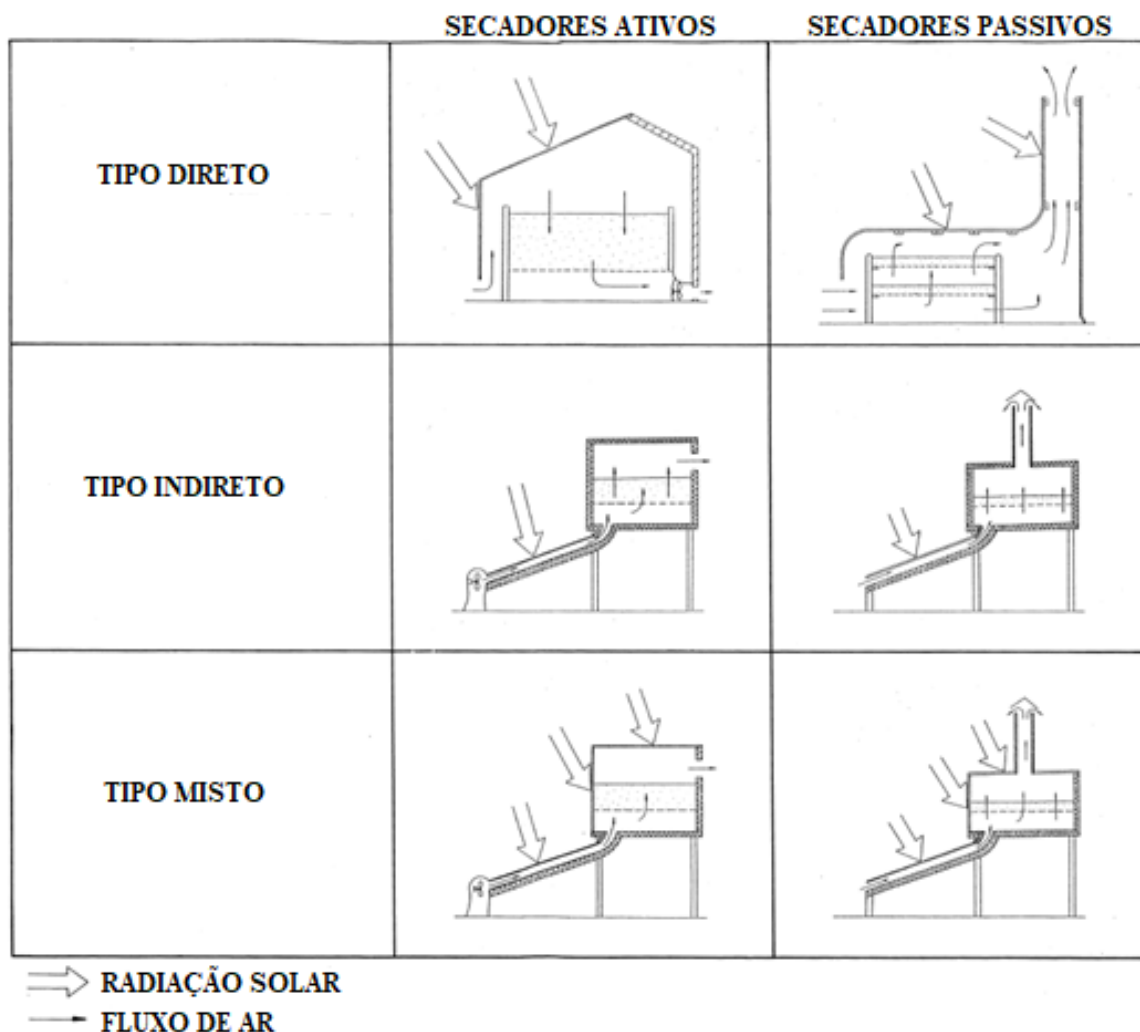


Figura 4 – Tipos de secadores solares (Adaptado de: Ekechukwu & Norton, 1999)

Secador solar passivo

Nos secadores passivos a circulação do ar é feita por convecção natural, isto é, sem o recurso a equipamentos mecânicos (Tiwari, 2016).

Estes sistemas são de pequena dimensão e simples de construir e servem para conservar quantidades reduzidas de frutas, vegetais, peixe e carne (Ekechukwu & Norton, 1999). São geralmente utilizados por pequenos agricultores não sendo necessário um investimento inicial elevado, apenas sendo considerados os custos de funcionamento, nomeadamente, a mão de obra para funcionamento.

A sua estrutura é tipicamente composta por uma ou duas câmaras isoladas, com superfície envidraçada e orifícios na base e na parte superior das paredes do secador. A radiação solar que é necessária para o processo incide diretamente no vidro e é absorvida pelos produtos e pelas superfícies internas do secador. A circulação do ar quente e húmido é feita pelas aberturas superiores enquanto o ar fresco entra pela base da caixa (Ekechukwu & Norton, 1999).

Estes sistemas têm algumas limitações, nomeadamente a dificuldade em contrariar condições climáticas desfavoráveis e conseqüentemente um tempo elevado de secagem.

Secador solar ativo

Os secadores ativos não dependem apenas da energia solar para o processo de secagem, possuindo outro sistema de aquecimento de apoio ao sistema solar, baseado em energia elétrica, combustíveis fósseis, biomassa ou bombas de calor. Possuem igualmente ventiladores promovendo a circulação do ar. Todos os secadores solares ativos são denominados também por secadores a convecção forçada, pois utilizam mecanismos que permitem forçar a circulação do ar utilizado para a secagem (Ekechukwu & Norton, 1999).

Quando o ar presente no interior do secador solar não está suficientemente quente para realizar a secagem, este inicia o sistema de aquecimento de apoio para aumentar a temperatura até aos valores necessários. Estes sistemas podem ser controlados automaticamente para permitir uma secagem ideal (Ekechukwu & Norton, 1999).

Secador solar direto

O secador solar direto é composto por um único equipamento/estrutura, onde a radiação solar é transmitida a partir de uma cobertura transparente e absorvida pelo produto colocado no secador. O ar existente no interior do secador é aquecido por efeito de estufa e a circulação do ar é feita por convecção natural ou por circulação forçada (A Ferreira & Candeias, 2005).

Para Ekechukwu & Norton (1999) os secadores solares diretos possuem a vantagem de serem de baixo custo e de construção simples. No entanto Belessiotis & Delyannis (2011) considera como desvantagens a perda de qualidade dos produtos por exposição direta à radiação solar e a taxa de secagem reduzida.

Neste tipo de secador, o produto absorve diretamente a radiação solar, portanto, não são necessários coletores solares.

Na secagem em grande escala são utilizados os secadores solares de convecção forçada, tal como está ilustrado na figura 5. Nesta figura está representado um secador com ventilador de insuflação. Outros secadores possuem um ventilador de extração que retira o ar do interior do secador para o exterior, e ainda existem secadores de convecção, em que a ventilador está equipada com aquecimento auxiliar enviando ar quente para o interior do secador (Ekechukwu & Norton, 1999).

Adicionalmente, Tiwari (2016) defende que este método de secagem potencia condições de temperatura elevada, movimento do ar e humidade relativa reduzida, sendo estes, fatores que permitem o aumento da taxa de secagem e a redução do risco de deterioração do produto por microrganismos.

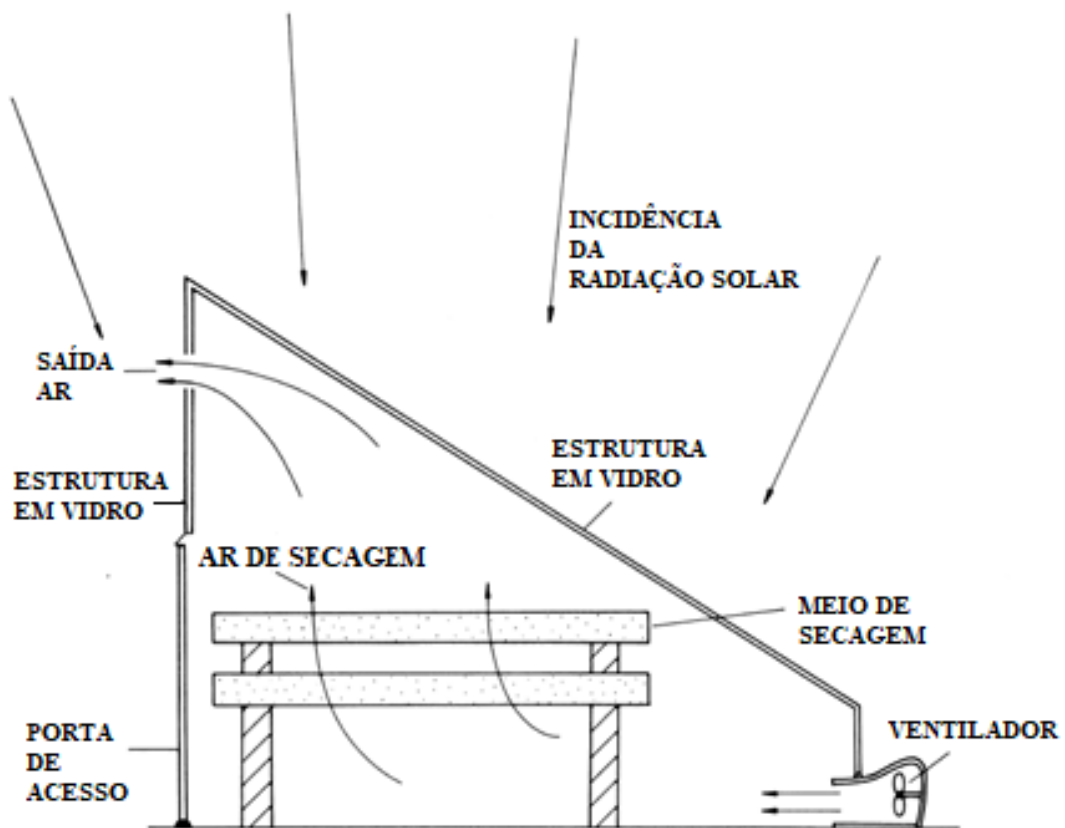


Figura 5 - Secador solar direto com convecção forçada (Adaptado de: Ekechukwu & Norton, 1999)

Secador solar indireto

Tal como pode ser observado na figura 6, estes secadores são constituídos por um coletor solar e uma câmara de secagem ligados por uma conduta bem isolada, podendo ter ou não uma chaminé. O princípio de funcionamento deste secador consiste no aquecimento do ar através da incidência da radiação solar sobre o coletor, sendo o ar, posteriormente, direcionado para a câmara de secagem do secador por meio de uma convecção forçada ou natural (Lima & Guerra, 2017).

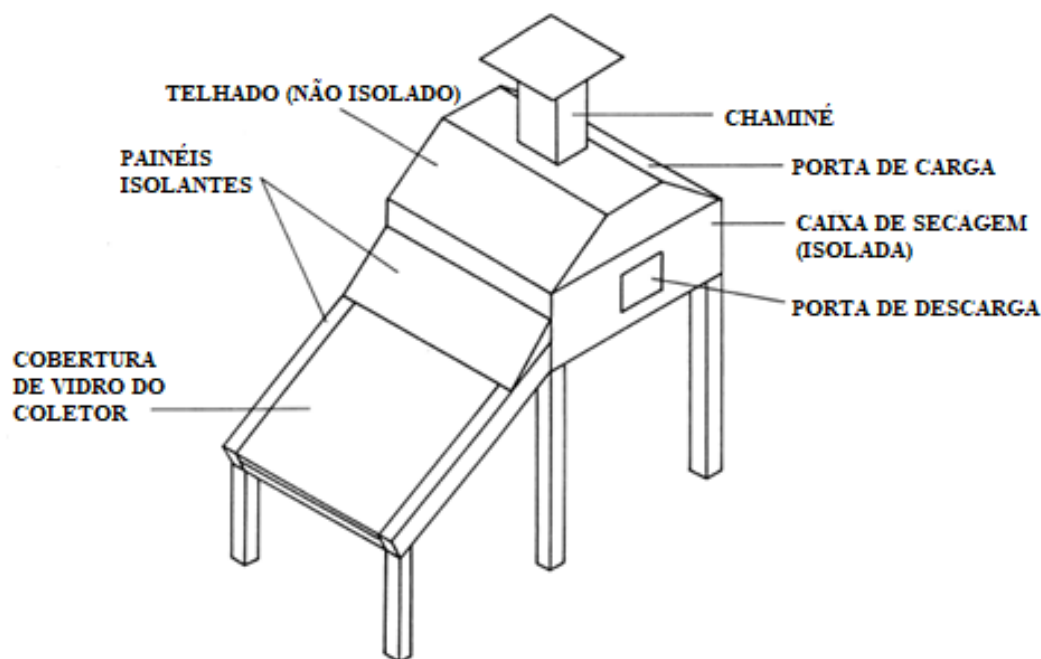


Figura 6 - Secador solar indireto com convecção natural (Adaptado de: Ekechukwu & Norton, 1999)

Os secadores solares indiretos atingem temperaturas de operação elevadas quando comparados com os secadores diretos, proporcionando assim uma secagem mais rápida do produto. Em contrapartida, ao atingir temperaturas elevadas, a secagem pode levar à perda de qualidades do produto. Nestes secadores verifica-se uma elevada variação da temperatura do ar no seu interior tornando assim mais difícil manter as condições de secagem constantes (Ekechukwu & Norton, 1999).

Segundo Belessiotis & Delyannis (2011), o investimento inicial de construção ou aquisição do secador é elevado.

Secador solar misto

Este tipo de secador resulta da combinação do secador direto e do secador indireto. Nestes secadores existe o efeito combinado da incidência direta da radiação solar sobre o produto a ser seco em conjunto com um pré-aquecimento do ar, recorrendo a um coletor solar.

A estrutura deste secador, representado na figura 7 é semelhante à de um secador indireto, isto é, possui um coletor solar, uma câmara de secagem, podendo ter, ou não, uma chaminé. Para além disso, as paredes da câmara de secagem são envidraçadas, de modo que a radiação solar incida diretamente sobre o produto permitindo uma secagem mais rápida (Ekechukwu & Norton, 1999).

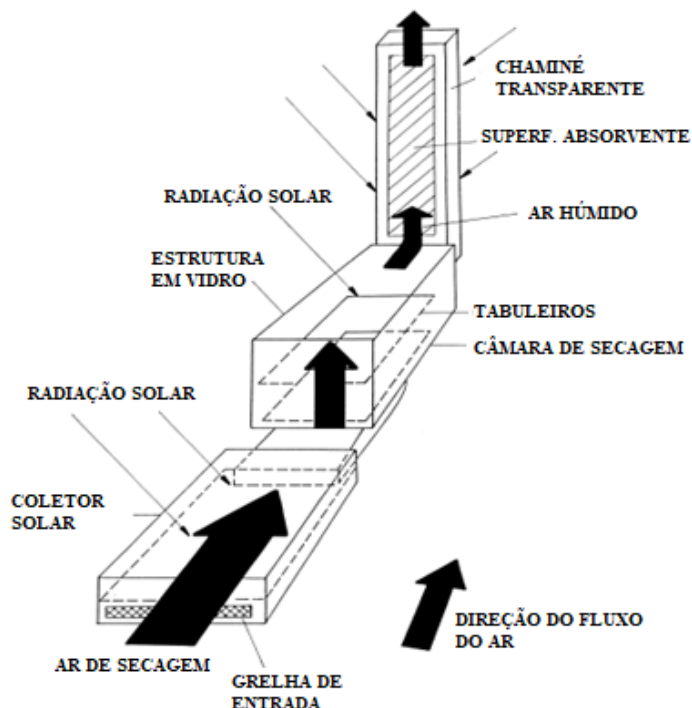


Figura 7 - Secador solar misto com convecção natural (Adaptado de: Ekechukwu & Norton, 1999)

Apesar dos custos elevados do equipamento e da sua reduzida capacidade, este sistema apresenta pontos positivos, nomeadamente, proporciona uma maior taxa de secagem atingindo um teor de humidade ideal do produto e o reduzido tempo de secagem (Sontakke & Salve, 2015).

Secador solar híbrido

O secador solar híbrido recorre a uma energia de apoio, com o objetivo de manter a temperatura constante no secador e forçando a circulação do ar. A energia solar é utilizada apenas para pré-aquecimento do ar à entrada da câmara de secagem. A fonte de energia de apoio, se necessária, complementa o aquecimento até à temperatura desejada. Este tipo de secador funciona independentemente das condições atmosféricas, permite um melhor controlo da secagem e um aumento da produção por ter a vantagem de trabalhar a qualquer hora do dia (Ferreira & Candeias, 2005).

Este tipo de sistema, como o que está demonstrado na figura 8, é constituído, tipicamente, por um coletor, uma câmara de secagem, um ventilador e um aquecedor auxiliar (Fudholi et al., 2010).

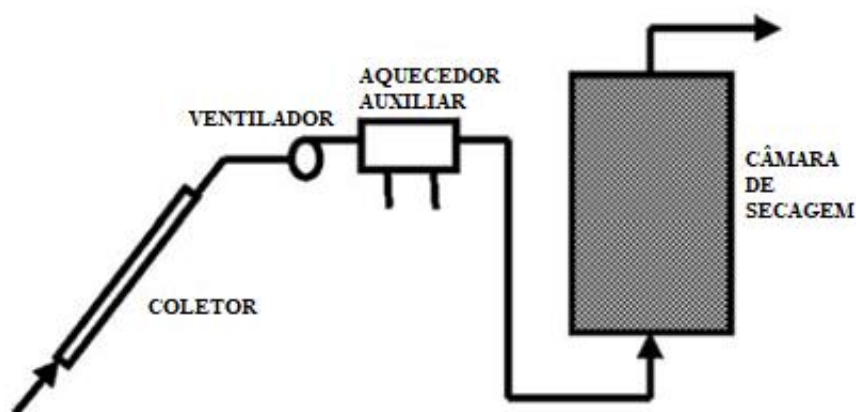


Figura 8 - Secador solar híbrido (Fonte: Fudholi et al., 2010)

O seu princípio de funcionamento assenta no aquecimento do ar através do coletor solar e do aquecedor auxiliar para esse efeito, por este motivo é designado de secador solar híbrido. Desta forma, são responsáveis por manter as condições constantes no interior da câmara de secagem durante todo o processo. O aquecedor auxiliar entra em funcionamento quando as condições climáticas não são favoráveis (Fudholi et al., 2010).

Este secador é utilizado em pequenas aplicações (Fudholi et al., 2010) e o seu custo de produção é elevado, pois necessita de outras fontes de energia como os combustíveis fósseis, eletricidade, gás ou resíduos agrícolas para o aquecedor (Ferreira & Candeias, 2005).

2.4. Secagem artificial

A secagem artificial é um processo de remoção da humidade dos produtos, que implica a utilização de equipamentos de condicionamento do ar de secagem para controlo da temperatura, humidade relativa e velocidade do ar de secagem.

Apesar dos secadores artificiais fornecerem uma melhor qualidade dos produtos secos e uma maior rapidez de secagem, estes consomem uma quantidade significativa de energia para a secagem (Ferreira et al., 2008). Apesar do referido, a secagem artificial é economicamente viável, sobretudo quando é utilizada na secagem de grandes quantidades de produtos. Usualmente, face aos custos de secagem, os preços dos produtos secos podem aumentar (Ferreira et al., 2008).

Para o processo de secagem artificial são utilizadas fontes de energia como combustíveis fósseis, biomassa ou eletricidade (Tanko et al., 2005).

2.4.1. Secadores por convecção

O calor sensível do meio gasoso chega à superfície do produto através da convecção que, ao passar pelo produto ou através dele, provoca a mudança de fase líquido para gasoso da água livre e transporta-a para fora do secador. A transferência de calor por convecção surge através do contato entre um fluido em movimento e uma superfície, com os dois a temperaturas diferentes. Para que haja a remoção da humidade do produto, o ar quente entra em contacto com o produto, sendo de extrema importância a diferença de temperatura entre o fluido e a superfície para que ocorra a troca de calor, na medida em que a convecção só acontece se esta existir (Bergman & Lavine, 2014). Os mesmos autores referem ainda que a forma de transferência de calor por convecção consiste na transferência de energia que decorre no interior de um fluido por causa dos efeitos combinados da condução e do escoamento macroscópico do fluido. A energia a ser transferida acaba por ser a energia interna do fluido. Mencionam também o modo de troca de calor latente, que se associa à alteração da fase entre os estados de líquido e vapor, um processo que acontece no momento em que ocorre a secagem do produto no interior da câmara. Por sua vez, a água que se encontra no interior do produto evapora em contacto com o ar quente, dissipando a humidade para o ar.

Bergman e Lavine (2014) referenciam dois tipos de transferência de calor por convecção: (i) a convecção forçada que ocorre no momento em que o escoamento resulta de fatores externos, como, por exemplo, os ventiladores e as bombas; (ii) a convecção natural que ocorre por causa das forças de impulsão, provocadas a partir da diferença de densidades decorrentes das variações de temperatura no fluido.

2.4.2. Secadores por contacto ou por difusão

Neste tipo de secadores o calor é provido ao produto húmido por condução, por meio da “superfície de placas, cilindros ou paredes do secador”. Nos secadores por contacto, o calor é transmitido ao produto por condução, por meio do contacto deste com uma superfície aquecida. O aquecimento da superfície pode ocorrer através do vapor, da eletricidade ou do contacto direto com fogo. A quantidade de calor que é transportada para o produto em secagem não depende unicamente da “condutividade térmica do material de que é feita a superfície de aquecimento, mas também do coeficiente de transferência de calor do meio de aquecimento e do próprio material de secagem”. As vantagens destes secadores comparativamente aos adiabáticos (sistemas em que não há transferência de calor para o exterior) é que não necessitam de grandes volumes de ar aquecido e podem fazer a secagem sem oxigénio (Puhl & Nitzke, 2010). Assim, existem:

- Secador do tipo tambor, como está representado na figura 9, possui dois cilindros metálicos ocios que giram horizontalmente. No seu interior circula o meio de aquecimento, habitualmente vapor, e a superfície dos cilindros atingem temperatura entre os 120°C e os 170°C. O produto a secar é depositado sob esses cilindros e depois esmagado entre os cilindros.

Assim o produto esmagado vai aderir à superfície dos mesmos e posteriormente raspados pelas lâminas. O parafuso sem fim arrasta o produto seco e separa possíveis aglomerados conferindo a característica de pó fino ao produto final.

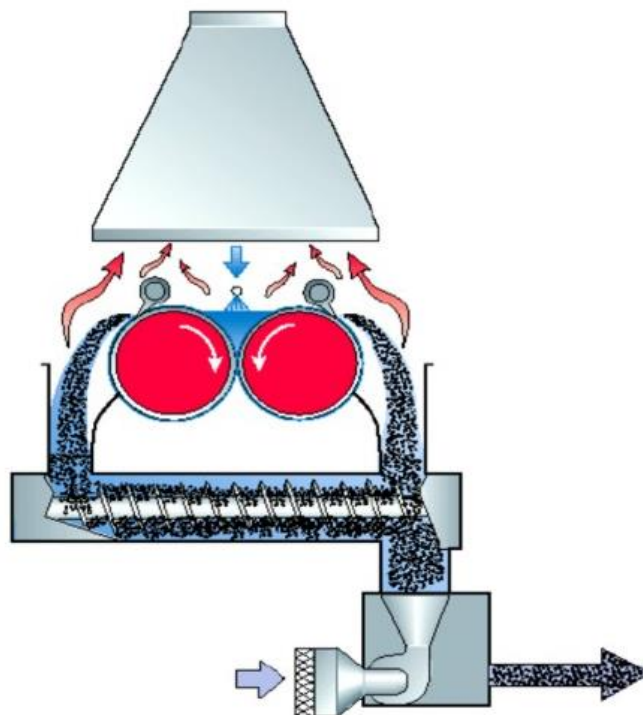


Figura 9 - Secador do tipo tambor (Fonte: Puhl & Nitzke, 2010)

- Secador tubular: que consiste em tubos de grandes dimensões ou cilindros cuja parede é aquecida através de vapor ou diretamente por gases de combustão. O produto a ser desidratado percorre o interior do tubo, o qual gira e tem uma leve inclinação em direção à saída. O produto vai perdendo a humidade no contacto com as paredes e o ar húmido é retirado por convecção ou ventilação forçada;

- Secador a vácuo de placas: este é possivelmente o equipamento a vácuo, de entre os outros tipos que existem, o mais simples e funciona de forma descontínua. A particularidade está no vácuo que baixa a pressão parcial de vapor no ar à volta do produto. Isto corresponde a baixar a concentração da água no ar, levando ao aumento da taxa de transferência de água do produto para o ar. Na câmara deste secador, dispõem-se placas ocas horizontais e paralelas, que são aquecidas no seu interior pela circulação de água quente ou vapor de água, sobre as quais se dispõe o produto em camadas uniformes e finas. Esta técnica é adequada para a secagem de produtos sensíveis que seriam destruídos ou degradados caso a secagem fosse realizada por outro processo de secagem. É utilizado quer em produtos líquidos, quer sólidos (Puhl & Nitzke, 2010).

2.4.3. Secadores por radiação

A secagem por radiação é um método de baixo custo adequado para aplicação em espaços rurais e de cultivo, e é designada por secagem por radiação infravermelha (IR). A utilização e a eficácia deste sistema nos alimentos traz algumas vantagens, nomeadamente, a versatilidade, a simplicidade do equipamento necessário, a resposta rápida de aquecimento e de secagem, a fácil instalação em qualquer câmara de secagem e o baixo custo de capital (Chua & Chou, 2003).

Durante este processo, a energia proveniente da radiação infravermelha é transferida do elemento de aquecimento para a superfície do produto sem aquecimento do ar circundante. Na figura 10 é possível observar a constituição de um secador IR de design simples que pode ser facilmente construído. Este é constituído por um funil de entrada para os produtos alimentares e um tapete rolante onde o material é seco enquanto se move paralelamente às lâmpadas IR. O nível de irradiação pode ser ajustado através do respetivo potenciômetro, enquanto a secagem IR intermitente pode ser implementada rodando o botão do relé-temporizador (Chua & Chou, 2003).

A eficácia da secagem é aumentada quando é aplicada a radiação intermitente. Para os materiais mais sensíveis ao calor, o tratamento de radiação intermitente é benéfico no que diz respeito à diminuição da duração da secagem e à melhoria da qualidade do produto (Chua & Chou, 2003).

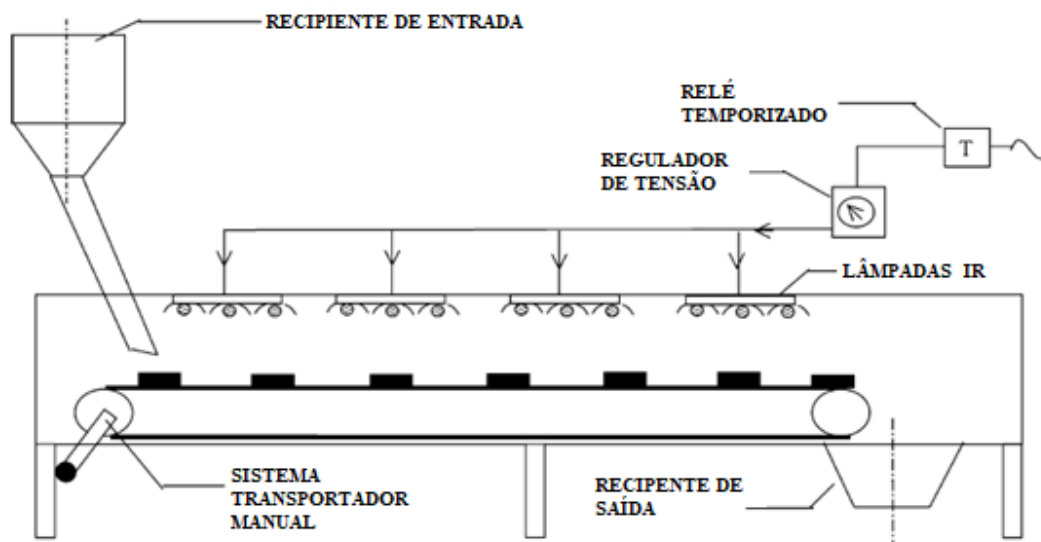


Figura 10 - Esquema de secador IR de design simples (Adaptado de: Chua & Chou, 2003)

2.4.4. Secadores dielétricos

Os métodos de secagem dielétrica com energia de micro-ondas (MW) e radiofrequência (RF) assim como, as outras tecnologias de secagem emergentes, têm captado a atenção da comunidade de pesquisa e da indústria nas últimas décadas. Se as micro-ondas e as radiofrequências forem corretamente aplicadas, o mecanismo pode ser eficiente em termos de energia e de grande potencial para ser utilizado em uma grande variedade de materiais (Wang et al., 2011).

O aquecimento dielétrico consiste no aquecimento por radiofrequência (RF) ou por micro-ondas (MW). As ondas RF e MW correspondem a uma parte do espectro eletromagnético. Para o aquecimento por ondas RF, a frequência aplicada está entre 10 a 300 MHz, enquanto no aquecimento através das ondas MW a frequência está entre 300 a 30.000 MHz (Wang et al., 2011).

A diferença principal entre secadores por MW e por RF reside no gerador e na forma da propagação das ondas-eletromagnéticas que é transmitida sob os produtos. As ondas RF têm um comprimento de onda maior que as ondas MW, assim conseguem atravessar o material permitindo um aquecimento mais lento dos produtos mais espessos e mais delicados. Já as ondas MW possuem um comprimento de onda mais pequeno e são utilizadas para aquecer e secar rapidamente os produtos como por exemplo os que têm uma forma irregular.

De forma geral, o secador dielétrico é constituído por um gerador que produz ondas dielétricas, um adaptador ou dispositivo compatível entre o gerador e a carga, o aplicador e os dispositivos auxiliares de controlo e de manuseio. Este equipamento de produção de ondas dielétricas pode integrado em diferentes estruturas, dependendo das características específicas dos produtos, e pode ser combinado com outros métodos (ar quente, vácuo, infravermelho ou liofilização), podendo ser utilizado quer em processos de secagem contínua ou em cargas (Wang et al., 2011).

2.4.5. Secadores de liofilização

No processo da liofilização, muitas vezes designada de desidratação por congelação, a água numa primeira fase é congelada e posteriormente atinge a sublimação sem passar pelo estado líquido, isto sob condições especiais de pressão e temperatura definidas, deixando o material seco (Guiné, 2018).

O método em causa é mais lento e apresenta custos elevados, devido às etapas de congelação, produção de vácuo e até o próprio equipamento é caro. Na indústria tem um papel importante na desidratação de alimentos de alto valor e aroma delicado, como por exemplo, os cogumelos, as ervas e as especiarias, os sucos de frutas, as carnes, os frutos do mar ou as dietas para uso militar ou para atletas desportivos, bem como para a preservação de culturas microbianas. A liofilização é principalmente utilizada para converter materiais sensíveis ao calor em pó porque é melhor na preservação dos constituintes dos produtos. No entanto, o baixo

rendimento de produção, o elevado tempo do processo, o modo de produção em lote e possível dano por frio associado à congelação podem desencadear características desfavoráveis nos produtos (Guiné, 2018).

2.4.6. Secadores por vapor sobreaquecido

O branqueamento é uma técnica de conservação utilizada nos produtos, antes de serem congelados. Os alimentos são colocados em água a ferver por tempo determinado, e depois mergulhados imediatamente em água gelada, provocando um choque térmico. Desta forma, é possível inativar as enzimas que causam alterações indesejáveis nos produtos. No entanto, este processo traz algumas desvantagens como a perda de nutrientes e a poluição causada pelos resíduos da água utilizada durante o branqueamento. Para aliviar esses problemas, o método tradicional de branqueamento deve ser substituído por novas tecnologias sem utilizar a água como meio térmico (Xiao et al., 2014).

No sistema de secagem por vapor sobreaquecido (figura 11), o secador é cheio com ar quente, dando início à convecção. Ao longo do processo, a humidade evaporada começa a circular com o ar quente, fazendo com que a pressão interna aumente e ocorra a ativação de uma válvula de controlo de pressão, a qual regula qualquer sobrepressão, resultando na gradual eliminação do ar que ainda está no secador. Deste modo, a secagem ocorre por contacto com o vapor sobreaquecido. Usar vapor sobreaquecido como meio de secagem em vez de ar quente pode melhorar a eficiência energética deste processo. A reutilização da energia deste vapor evita ainda, a emissão de gases para a atmosfera. (Xiao et al., 2014).

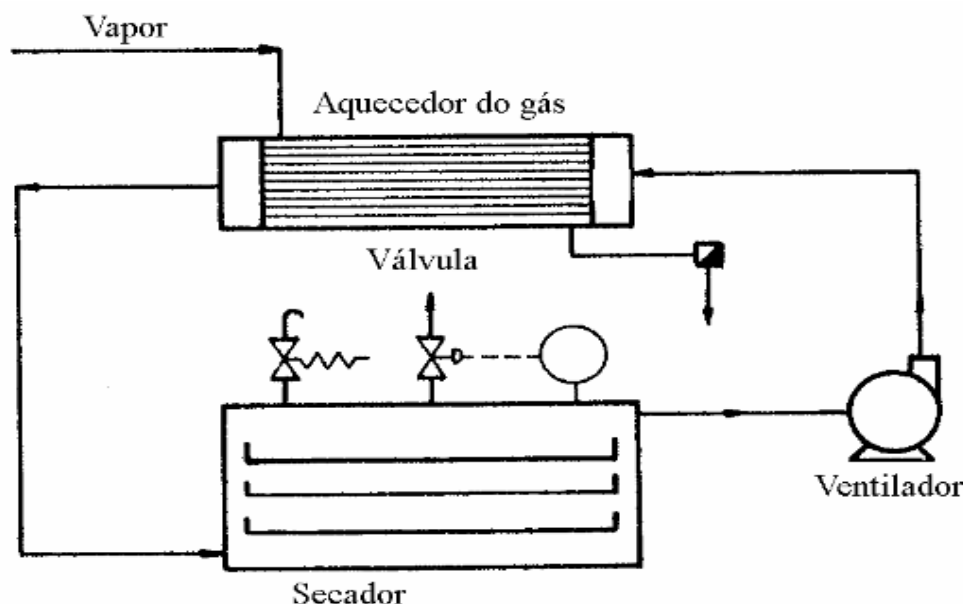


Figura 11 - Secagem por vapor superaquecido (Fonte: Park et al., 2007)

2.4.7. Secadores por spray

A secagem por spray é uma técnica muito empregue para transformar um material no estado líquido em pó. Pode ser utilizada para soluções ou pastas que passam por um atomizador ou spray para dividir o material em partículas com dimensões entre 10-200 μm . A qualidade final das microcápsulas secas por pulverização está muito dependente dos parâmetros definidos de processamento do secador e das propriedades ou composição da solução de alimentação (Guiné, 2018).

Como o tempo de secagem é curto (1–20 s) e dado ao tamanho reduzido do material, os danos são limitados e por isso pode ser aplicado para tratar materiais sensíveis ao calor. O atomizador é o componente mais importante, isto porque determina a dimensão das gotas e condiciona a eficiência do processo. Este processo de microencapsulação é o mais comum e mostrou ser uma tecnologia eficiente na proteção de compostos bioativos e probióticos. A secagem por spray é basicamente o resultado da conversão de suspensões aquosas em micropartículas polvorentas, compostas por um material de parede (casca) e no seu interior, um núcleo (material encapsulado). (Guiné, 2018).

2.4.8. Secadores de leitos fluidizados ativos

A secagem em leito fluidizado (SLF) é um processo de secagem de baixo custo e tem muitas aplicações práticas na secagem de sólidos granulares na alimentação, na cerâmica, nos produtos farmacêuticos e nas indústrias agrícolas. Possui algumas vantagens, nomeadamente, permite altas taxas de secagem devido à grande superfície de contacto das partículas com o gás e à alta miscibilidade do material, levando a alta eficiência de transferência de calor e massa, elevada eficiência térmica, custos baixos de capital e manutenção e é de fácil de controlo. Alguns dos produtos alimentares adequados para (SLF) incluem as ervilhas, os feijões, os vegetais em cubos, os grãos de frutas, a cebola, os flocos de cereais e o sumo de frutas em pó (Chua & Chou, 2003).

Num sistema SLF típico (figura 12), o ar quente é forçado através de um leito de partículas do produto a uma velocidade suficientemente grande capaz de superar o efeito da gravidade sobre as partículas ou produto, garantindo que as partículas ficam suspensas de forma fluidificada. O SFL tem ganho grande destaque por permitir a otimização de volumes de secagem limitados (Chua & Chou, 2003).

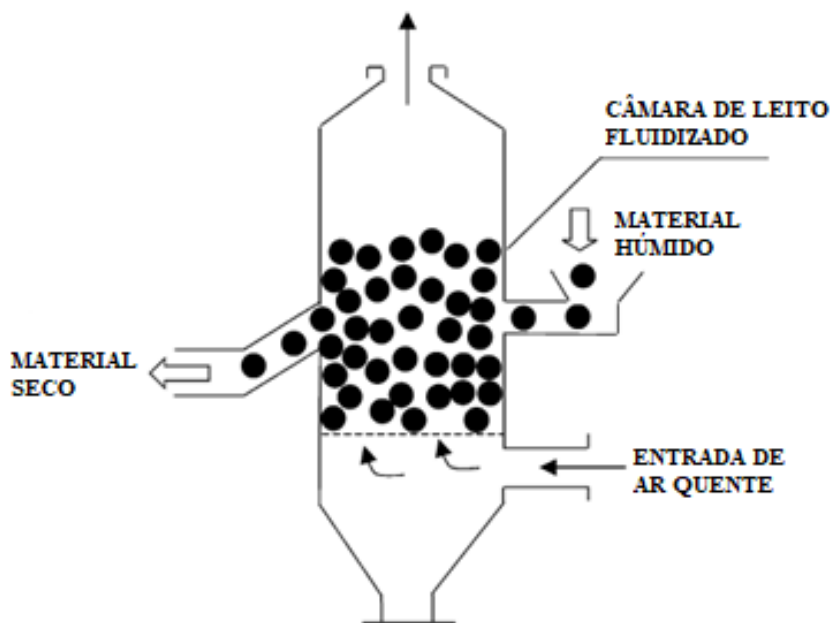


Figura 12 - Configuração típica de um sistema SLF simples (Adaptado de: Chua & Chou, 2003)

2.5. Fatores que influenciam a secagem

O potencial de uso de energia solar no setor agrícola tem vindo a aumentar devido à flutuação dos preços dos combustíveis fósseis, às preocupações ambientais e ao esgotamento esperado dos fósseis que originam o combustível. O sistema de secagem que utiliza como principal fonte de energia solar é um dos mais atraentes e com aplicações promissoras que permitem um melhor aproveitamento dos produtos pós-colheita (Fudholi et al., 2010).

As condições atmosféricas são bastante importantes na secagem solar, pois têm uma elevada influência na capacidade e no tempo de secagem de um produto. A intensidade da radiação solar nos materiais varia consoante as estações do ano, a hora do dia, a duração da exposição solar, a temperatura do ar ambiente e a velocidade do vento, que são um conjunto de fatores importantes neste processo (Pardhi & Bhagoria, 2013).

Segundo Rocha et al. (2011), o método de secagem utilizado, a temperatura e a velocidade do ar de secagem afetam a qualidade e quantidade dos constituintes ativos que se encontram nos alimentos.

Em contrapartida, os secadores artificiais vieram substituir os secadores solares, com o aparecimento de uma vasta gama de secadores e por permitirem uma secagem mais eficaz e controlo dos fatores que influenciam todo o processo. Estes fatores tem um papel importante e por isso torna-se necessário identificá-los e saber como tirar o melhor proveito deles para se alcançar o produto final desejado.

Neste processo é essencial o controlo das condições do ar de secagem e as do produto a secar, nomeadamente: a temperatura, a humidade relativa e a velocidade do ar, teor de humidade e a área superficial do produto.

Relativamente às condições do ar de secagem, a temperatura e a velocidade do ar são fáceis de serem controladas durante o processo, e por isso os secadores realizam esse controlo. Por sua vez, a humidade relativa do ar consiste numa variável mais difícil de ser controlada, resultando no aumento da complexidade e do custo dos equipamentos usados (Martins, 2015).

O mesmo autor refere que os estudos laboratoriais sobre a secagem de produtos agrícolas avaliam frequentemente o efeito da temperatura do ar no processo de secagem pois a maioria destes estudos são realizados em estufas de circulação forçada de ar, o que apenas permite controlar a temperatura, sem que seja possível controlar a velocidade do ar de secagem e a humidade relativa do ar.

Temperatura

A temperatura é um fator importante na secagem dos produtos alimentares, e quando devidamente controlada, possibilita a preservação dos valores nutricionais, da cor, do sabor e da textura.

Num secador solar, as variações de temperatura estão diretamente dependentes da intensidade da radiação solar. A temperaturas baixas, a taxa de secagem é lenta e há risco de deterioração do produto. Em situações de elevada intensidade de radiação, a taxa de secagem é mais rápida, no entanto podem ser atingidas temperaturas que causem danos nos produtos. Assim, a temperatura desejada pode ser obtida conjugando o ar do secador com ar quente de um sistema de apoio (no caso de ser necessário maiores temperaturas) ou com ar fresco atmosférico (no caso de ser necessário temperaturas mais baixas) (Wankhade et al., 2013). De um modo geral, grande parte dos alimentos pode ser seco a uma temperatura de aproximadamente 60°C (Belessiotis & Delyannis, 2011).

Humidade relativa do ar

A humidade relativa do ar é também um fator importante na secagem dos produtos alimentares, sendo que as taxas de secagem mais elevadas são alcançadas com valores reduzidos de humidade relativa do ar de secagem (Dryden, 1982).

O aumento da humidade relativa do ar, a uma dada temperatura, reduz a sua capacidade de reter mais vapor de água, sendo que este efeito é mais significativo a temperaturas reduzidas e quando o ar se encontra saturado, e menos significativo à medida que a temperatura aumenta (Dryden, 1982).

Apesar do referido, em aplicações práticas de processos de secagem, a humidade do ar elevada não é um fator limitante significativo no desempenho do secador. Em termos de eficiência energética, a humidade relativa do ar anda normalmente à volta dos 80% na saída de

ar, sendo que este nível é conseguido através da recirculação de uma fração do ar interior, reduzindo assim a entrada de ar fresco que deve ser primeiramente aquecido para a temperatura e velocidades do ar do secador (Dryden, 1982).

Teor de humidade do produto

A água é o principal elemento a garantir a vitalidade, a aparência e o sabor aos alimentos, mas, em contrapartida, favorece a sua deterioração química, enzimática e microbiológica. Por isso, quanto maior for a quantidade de água disponível nos alimentos, mais vulneráveis estarão à deterioração. Assim, em determinadas situações torna-se necessário removê-la para garantir uma maior longevidade dos produtos.

A água é o mais relevante, e abundante, componente de todos os alimentos, podendo encontrar-se na forma de água livre e água ligada. O teor de humidade de um alimento é a soma água livre com a água ligada.

A água livre está presente no interior dos poros e nos espaços intergranulares dos alimentos, preenchendo os espaços vazios, ou seja, funciona como um solvente e encontra-se livre para reações químicas e microbiológicas, necessitando de pouca energia para ser removida (Martins, 2019).

Por sua vez, a água ligada é a que se encontra à volta dos compostos não aquosos, tais como os solutos (proteínas, sais, açúcar, entre outros) que apresentam propriedades distintas da água. A água ligada possui uma reduzida pressão de vapor, elevada energia de ligação, reduzida mobilidade molecular e não está disponível como solvente (Damodaran et al., 2010).

O parâmetro mais utilizado na definição da disponibilidade da água num produto é a atividade da água

Segundo Oliveira (2015), a atividade de água (a_w) dos produtos alimentares é um dos fatores mais importantes no estudo dos processos de secagem, armazenamento e embalagem de alimentos. A a_w avalia, com exatidão, o grau de ligação da água presente nos alimentos e, consequentemente, a sua disponibilidade para agir como solvente e participar nas transformações químicas, bioquímicas e microbiológicas destes. A atividade de água é dada pela relação entre a pressão de vapor de água em equilíbrio do alimento e a pressão de vapor de água pura, à mesma temperatura, de acordo com a expressão abaixo:

$$a_w = \frac{P}{P_0} \quad (2-1)$$

Em que:

a_w é atividade de água (%);

P é pressão de vapor de água no alimento (Pa);

P_0 é pressão de vapor de água pura (Pa).

Um valor elevado de atividade de água indica que o alimento possui água livre dentro da matriz, portanto, a camada de gás em equilíbrio com o alimento apresentará uma maior pressão parcial de vapor de água. Para valores de a_w entre 0 e 0,20 significa que a água está fortemente ligada e para o intervalo 0,7 e 1,0 a maioria da água encontra-se livre. Quando existem sais ou açúcares dissolvidos na água, o valor da pressão parcial do vapor da água no sistema diminui e conseqüentemente a atividade de água fica reduzida (Velezmoro, 1999).

Relativamente ao teor de humidade de um produto, este é expresso em relação à sua massa total (teor de humidade na base húmida) ou em relação à massa seca (teor de humidade na base seca), e pode ser definido das seguintes formas:

- Teor de humidade na base húmida:

$$TH_{bh}(\%) = \frac{m - m_s}{m} \times 100 \quad (2-2)$$

- Teor de humidade na base seca:

$$TH_{bs}(\%) = \frac{m - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2-3)$$

Onde m é a massa total do produto (massa da água + massa seca do produto), m_s é a massa seca do produto, em que os valores do teor de humidade na base húmida TH_{bh} e do teor de humidade na base seca TH_{bs} são expressos em percentagem.

Velocidade do ar

A velocidade do ar de secagem que atinge a superfície do produto favorece a evaporação da água que se encontra na superfície. Ao aumentar a velocidade do ar a evaporação na superfície é reforçada por maiores taxas de transferência de massa de água.

Como o teor de humidade é indiretamente controlado através do ajuste da temperatura e da humidade relativa, a variável que poderá ser ajustada para o efeito de secagem que se pretende é a velocidade do ar (Martin et al., 2002).

A velocidade do ar pode ser determinada através da relação:

$$v = \frac{\dot{m}_v}{\rho A c} \quad (2-4)$$

Onde \dot{m}_v é caudal mássico em (Kg/s) , ρ é a massa volúmica do ar em (Kg/m³), A_c área de secção da conduta (m²) ((Pardhi & Bhagoria, 2013).

Área superficial do produto

Durante o período de secagem a uma taxa constante, que ocorre num material com a superfície da água saturada, a taxa de secagem é controlada pela temperatura do ar, pela área de exposição do produto e pelas condições do fluxo (El-Beltagy et al., 2007).

Para que seja possível acelerar o processo é fundamental a forma como é colocado e posicionado o produto no interior do secador, de modo a que seja possível a exposição máxima da sua superfície ao ar (Pastrana, 2014).

Por isso, quanto maior for a área de exposição do produto mais rápido será o processo de secagem, facilitando a evaporação da água existente no seu interior (El-Beltagy et al., 2007).

2.6. Mecanismos de transferência de massa na secagem

No processo da secagem, a transferência de massa de água do interior dos alimentos para o seu exterior ocorre essencialmente através dos processos de difusão e de convecção e resulta de uma diferença de concentrações. O gradiente de concentração é a força motriz para ocorrer a transferência de massa (Bergman & Lavine, 2014).

A figura 13 demonstra, de modo geral, os mecanismos envolvidos para que ocorra a movimentação da água livre do interior do alimento para o seu exterior. As características específicas de cada produto, nomeadamente, a sua estrutura física, a sua composição e o seu teor de humidade inicial, associadas às propriedades do ar de secagem (temperatura, humidade relativa e velocidade do escoamento), determinam como se irá processar este mecanismo até ser atingido o equilíbrio.

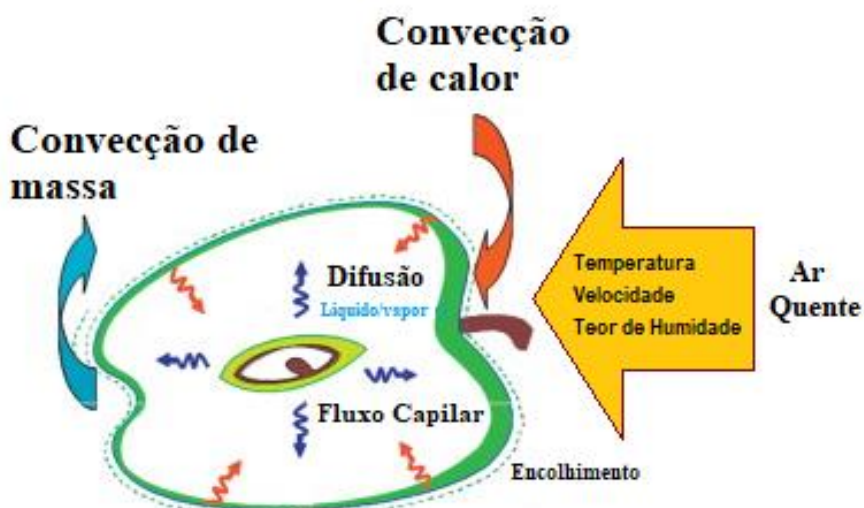


Figura 13 – Processo de transferência de massa num alimento (Fonte: adaptado de Sabarez, 2015)

Durante a secagem, para que haja a evaporação de água da superfície do alimento para o ambiente, a água deve migrar do interior do produto até à sua superfície. Este mecanismo físico é explicado pela lei de Fick da difusão, que afirma que a razão da difusão de uma espécie química num espaço ocupado por uma mistura gasosa, ou uma solução líquida, ou sólida é proporcional ao gradiente de concentração dessa mesma espécie nesse mesmo lugar (Brod, 2003), e pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{\partial TH_t}{\partial t} = \nabla(D_{ef} \nabla TH_t) \quad (2-5)$$

Em que:

TH_t - Teor de humidade no instante t (Kg H₂O/ Kg massa seca)

D_{ef} - Difusividade efetiva de massa (m²/s)

t - Tempo (s)

Desta forma, o processo de migração da água do interior do produto para a sua superfície é distinto do escoamento da massa que ocorre a nível macroscópico quando ocorre a transferência de um fluido, de um local para outro. O processo de difusão, implica a existência de duas regiões distintas, com diferentes concentrações de uma espécie química, e que ocorra o movimento da mesma espécie química a partir de uma região de concentração mais elevada em direção a uma região de concentração mais reduzida. Neste sentido, a principal força motriz para a transferência de massa resulta da diferença de concentrações, enquanto que para o escoamento de massa depende da diferença de pressões (Çengel & Ghajar, 2012).

Apesar de um produto conter água em toda a sua estrutura, a secagem só ocorre, quando se evapora a água que se encontra à superfície do produto. Por isso, para desidratar um produto é necessária a transferência da água para a superfície por difusão e posteriormente a evaporação para o ar circundante por convecção.

A transferência de massa por convecção é o mecanismo de transferência que ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento. Para o estudo da secagem, interessa a remoção da água presente na superfície do produto para o ar que circula à volta do mesmo. A circulação do ar é fundamental para a transferência de massa, afastando o ar com elevada concentração da superfície e renovando por ar de menor concentração (Çengel & Ghajar, 2012).

O processo da convecção pode ter origem natural, isto é, se o movimento for provocado por diferenças de densidades do fluido através dos meios naturais, ou forçada, se o movimento for provocado por agentes externos, como por exemplo, um ventilador.

2.7. Curvas de secagem

As informações contidas nas curvas de secagem são fundamentais para o desenvolvimento dos processos e para o dimensionamento dos equipamentos de secagem. A partir das curvas pode estimar-se o tempo de secagem de um determinado produto e, com essa informação, pode obter-se uma estimativa do gasto energético do processo, que será refletido no preço final do produto. Permitem também determinar as taxas de secagem e o teor de humidade final dos produtos quando estes são submetidos a condições fixas de temperatura e humidade relativa do ar. Permitem ainda conhecer a evolução do processo de secagem e assim garantir um produto final de qualidade e seguro ao consumidor final.

As curvas de secagem de um produto dependem da sua composição, estrutura, quantidade, dimensões, teor de humidade e da forma como são colocados e expostos os produtos no secador. Também varia dependendo das condições do ar no interior do secador, tais como a temperatura, a sua humidade relativa e velocidade (Pastrana, 2014).

No Gráfico 1 estão representadas curvas de secagem de acordo com a evolução do teor de humidade do produto (curva a), a evolução da taxa de secagem do produto (curva b) e a evolução da temperatura do produto (curva c), considerando as propriedades do ar constantes (Park et al., 2014).

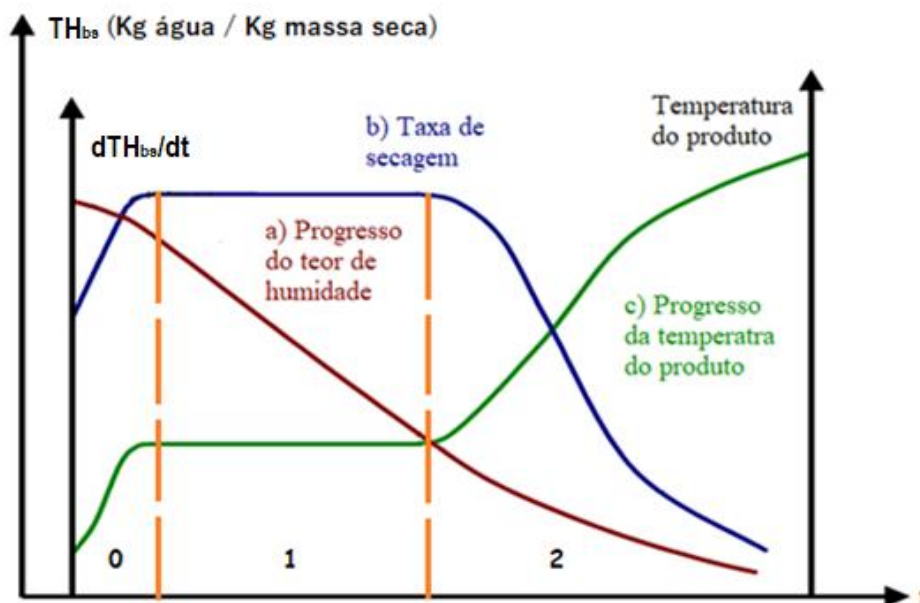


Gráfico 1 – Curvas de secagem (Adaptado de Park et al., 2014)

As curvas de secagem podem ser divididas em três períodos. O primeiro período (período 0 do Gráfico 1) corresponde ao momento inicial da secagem em que é elevada a temperatura e a pressão de vapor de água no produto. No segundo período (período 1 do Gráfico 1) a taxa de secagem é constante, o ar recupera, sob a forma de vapor o que perdeu sob a forma de calor. Assim a temperatura do produto é semelhante à do ar de secagem. Enquanto houver umidade à superfície do produto para ocorrer a evaporação, a taxa de secagem será constante e a temperatura mantém-se também constante. No terceiro período (período 2 do Gráfico 1), a transferência de calor do ar para o produto não é compensada pela transferência de vapor de água e, conseqüentemente, a temperatura do produto aumenta, tendendo a atingir a temperatura do ar que o envolve. Neste período a taxa de secagem decresce significativamente. Estas alterações persistem até ao instante em que o produto atinge o equilíbrio com o ar de secagem (Brooker et al., 1992).

O teor de umidade de um alimento varia ao longo do tempo durante o processo de secagem, essa evolução pode ser esquematizada de acordo com a informação do Gráfico 2 (Celestino, 2010).

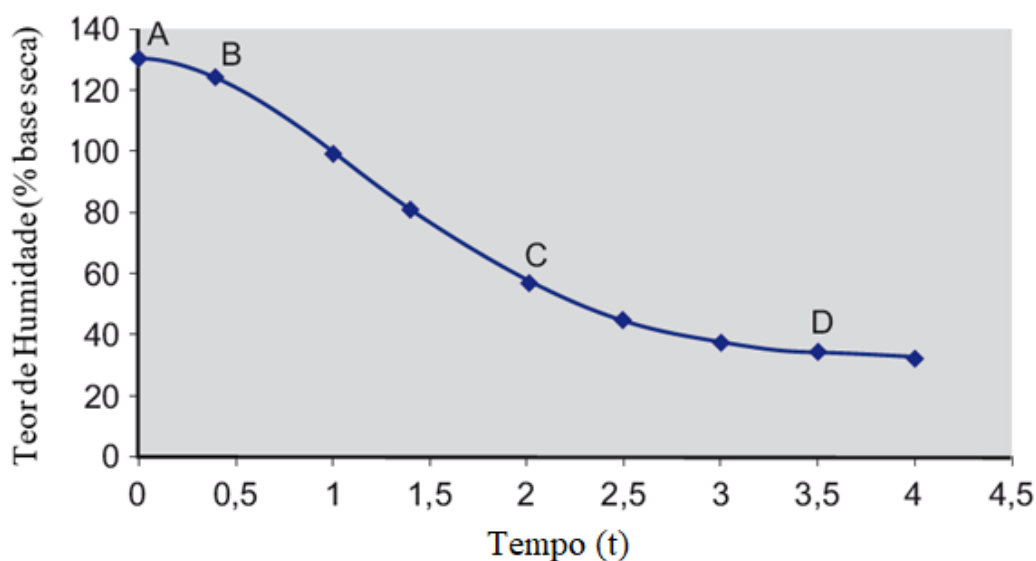


Gráfico 2 – Exemplo de uma curva de evolução do teor de humidade de um produto ao longo do tempo de secagem (Adaptado de: Celestino, 2010)

A evolução resultante das transferências de calor e de massa entre o alimento e o ar durante o processo de secagem faz com que seja estudado com mais pormenor o seu comportamento nos diferentes períodos do processo (Park et al., 2014).

O intervalo AB do Gráfico 2 corresponde ao período em que o alimento entra no regime operacional. No início do processo, o produto é geralmente mais frio que o ar, e a pressão parcial do vapor de água na superfície do produto é reduzida e conseqüentemente a velocidade de secagem e a transferência de massa também são reduzidas. A temperatura do ar ao aumentar vai provocar um aumento de temperatura no produto ocorrendo uma elevação da pressão e da taxa de secagem. O fenómeno continua até que a transferência de calor compense a transferência de massa. Este momento ocorre exatamente a partir do ponto B do Gráfico 2 (Park et al., 2014).

Durante o período BC, o produto possui uma quantidade de água significativa no seu interior. A pressão do vapor de água na superfície é constante e é igual à pressão de vapor de água pura à temperatura do produto. Por sua vez, a temperatura do produto também é constante sendo igual à temperatura do ar húmido, que acontece quando as transferências de calor e de massa se compensam. Devido a estas condições a taxa de secagem é constante. Este período dura até que a água existente no interior do produto seja extraída para a sua superfície acompanhando a perda por evaporação de água que se encontra na sua superfície (Park et al., 2014).

Quando é atingido o ponto C, termina o período de secagem contante e a humidade é designada por teor de humidade crítico. É a partir deste ponto que ocorre um aumento da resistência interna e o movimento da água do interior para a superfície do produto torna-se insuficiente (Celestino, 2010).

No intervalo CD, existe cada vez menos água à superfície do produto para evaporar, e ao longo do tempo tende a desaparecer, provocando por vezes fendas na superfície dos alimentos (Celestino,2010).

Do ponto D do Gráfico 2 até ao final do período de secagem, a troca de calor não é mais compensada, e desta forma, a temperatura do produto aumenta assintoticamente até à temperatura do ar (Park et al., 2014). A humidade do produto diminui até atingir o denominado teor de humidade de equilíbrio. Quando se alcança o teor de humidade de equilíbrio, o processo de secagem está concluído (Celestino,2010).

A autora Celestino (2010), acrescenta ainda, que o teor de humidade de equilíbrio só é obtido quando o produto é deixado o tempo suficiente sob as condições de temperatura e de humidade relativa do ar que o envolve. No produto sujeito a estas condições, a pressão parcial de vapor de água na sua superfície é igual à pressão parcial de vapor de água que está presente no ar.

2.8. Modelação matemática das curvas de secagem

A determinação das curvas de secagem é fundamental para o estudo da evolução da secagem de um produto sujeito a condições de temperatura e humidade do meio que envolve. Para obter essas curvas, vários autores recorrem ao mesmo procedimento, entre os quais se destacam Pornpraipech et al. (2017), referindo que através dos valores experimentais da evolução do teor de humidade, obtidos durante a secagem de um produto, é possível determinar a fração evaporável ou razão de humidade (RH) pela seguinte equação:

$$RH = \frac{TH_t - TH_e}{TH_0 - TH_e} \quad (2-6)$$

Em que as variáveis representam:

TH_t – Teor de humidade em qualquer momento do intervalo de tempo da secagem (%);

TH_0 – Teor de humidade inicial da amostra (%);

TH_e – Teor de humidade de equilíbrio da amostra (%).

O processo de secagem ou da humificação pode ser explicado pela teoria da camada fina, no que se refere à modelação dos processos, que pressupõe que as partículas secam ou humificam como uma estrutura de camada fina, isto é, numa estrutura tipo fatia, assumindo uma distribuição de temperaturas uniforme (Lopes, 2013).

Os modelos de camada fina podem ser classificados em teóricos, semi-teóricos e empíricos. Os modelos teóricos analisam o processo de secagem considerando apenas a resistência interna à transferência de humidade entre os produtos e o ar. Já os modelos semi-teóricos e os empíricos consideram apenas a resistência externa à transferência de humidade. Para este trabalho foram utilizados os modelos semi-teóricos por terem sido identificados vários estudos no que toca a modelação dos processos de secagem de produtos agrícolas (Lopes, 2013). Alguns dos modelos matemáticos testados no presente estudo são os presentes na Tabela 1.

Tabela 1 - Modelos matemáticos de camada fina (Adaptado de: Sallam et al., 2015)

MODELO	EQUAÇÃO	
Newton	$RH = \exp(-kt)$	(2-7)
Page	$RH = \exp(-kt^n)$	(2-8)
Henderson e Pabis	$RH = a \exp(-kt)$	(2-9)
Logarítmico	$RH = a \exp(-kt) + c$	(2-10)
Dois termos	$RH = a \exp(-k_1 t) - b \exp(-k_2 t)$	(2-11)
Exponencial de dois termos	$RH = a \exp(-kt) - (1 - a) \exp(-kat)$	(2-12)
Wang e Singh	$RH = 1 + at + bt^2$	(2-13)
Henderson e Pabis modificado	$RH = a \exp(-kt) - b \exp(-gt) + c \exp(-jt)$	(2-14)

Através dos valores experimentais da evolução do teor de humidade obtidos durante a secagem de um produto, e por comparação destes com os modelos de camada fina, é possível obter informação sobre qual o modelo matemático que melhor representa os valores experimentais.

Assim, foram avaliados alguns modelos semi-teóricos de secagem, dos quais foram identificados em Sallam et al. (2015), nomeadamente, o modelo de Newton (Akbulut & Durmus, 2009), o modelo de Page (Vijayaraj et al., 2007), o modelo Henderson e Pabis (Arslan et al., 2010), o modelo Logarítmico (Midilli & Kucuk, 2003), o modelo de dois termos e o modelo Exponencial de dois termos (El-Sebaili & Shalaby, 2013) e o modelo Henderson e Pabis modificado (Akpınar, 2010).

Para avaliar o modelo matemático que melhor representa os valores experimentais é realizada uma análise de regressão não linear para determinação das constantes do modelo com base nos valores experimentais e posteriormente é obtido um conjunto de indicadores

estatísticos que caracterizam a regressão realizada, nomeadamente o coeficiente de determinação (R^2) o erro médio absoluto (MAE) e a raiz do erro médio quadrático (RMSE):

- Coeficiente de determinação (R^2)

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (RH_{pre,i} - RH_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{RH}_{pre,i} - RH_{exp,i})^2} \right] \quad (2-15)$$

- Erro médio absoluto (MAE)

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |RH_{exp,i} - RH_{pre,i}|}{N} \quad (2-16)$$

- Raiz do erro médio quadrático (RMSE)

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RH_{exp,i} - RH_{pre,i})^2 \right]^{1/2} \quad (2-17)$$

Onde N corresponde ao número de observações, $RH_{exp,i}$ são os valores experimentais e $RH_{pre,i}$ os valores teóricos da razão da humidade (RH).

O coeficiente de determinação descreve a fração da variabilidade total dos dados que pode ser explicado pelo modelo.

O erro médio absoluto representa o desvio médio entre os dados experimentais e os previstos.

O RMSE corresponde à raiz quadrada da média dos quadrados dos erros. Estes erros correspondem à diferença entre os valores experimentais e os previstos. Assim as diferenças entre os valores experimentais e os previstos mais elevadas tem maior influência no resultado do valor RMSE do que as menores.

O modelo com o maior valor de coeficiente de determinação (R^2) e os menores valores médios de MAE e RMSE é considerado o melhor modelo da curva de secagem.

3. Estudo de caso

A avaliação e o estudo da secagem de produtos e subprodutos agrícolas constituem-se como um projeto abrangente para o qual contribuem um conjunto de estudos experimentais realizados no Instituto Politécnico de Viseu (IPV) nos quais são avaliados vários aspetos relacionados com tema, nomeadamente, a qualidade dos produtos secos, o desempenho energético dos sistemas de secagem, a cinética da secagem, entre outros. Esta última procura descrever os mecanismos macroscópicos e microscópicos de transferência de calor e massa que ocorrem combinados durante a secagem (Jideani & Anyasi, 2020), e é para tal que este trabalho contribui. O foco principal deste trabalho é o conhecimento dos fatores que influenciam a taxa de secagem e o desenvolvimento de um modelo matemático que permita prever a velocidade da secagem dos produtos a determinadas condições (Cardão & Nogueira 2020, Catorze et al. 2021).

Através da monitorização do processo de secagem é possível avaliar a quantidade de água que existe nos produtos e aquela que é removida. Recorrendo a estufas para este efeito e à pesagem de amostras, a massa de água removida é obtida da diminuição na massa do produto entre duas pesagens sucessivas e a diferença entre a massa do produto inicial e a massa seca do produto, obtida no final de um processo de secagem completa, permite saber o seu conteúdo em água.

Os produtos selecionados para presente estudo foram submetidos a diferentes ensaios de secagem, para determinar o seu teor de humidade inicial, a evolução do teor de humidade ao longo do tempo de secagem com condições definidas, as curvas de secagem e o teor de humidade de equilíbrio. Com a obtenção destes dados, foi feita a comparação da evolução da taxa de secagem correspondente a cada produto para as diferentes condições de temperatura e de humidade.

Desta forma, para que fosse possível efetuar os ensaios com maior eficácia e rigor foi essencial uma escolha correta da metodologia e dos produtos que se pretendiam analisar.

De acordo com os desperdícios agrícolas provenientes de algumas empresas da região de Viseu, assim como de acordo com as características físicas, as espécies escolhidas foram os mirtilos e as framboesas.

3.1. Seleção dos produtos a estudar

Para a determinação dos produtos a utilizar para este trabalho, teve-se em consideração o seu valor comercial e nutricional e o volume de desperdício que geram, provocado pela dificuldade de escoamento associada a uma elevada perecibilidade.

Os frutos vermelhos exigem um elevado controlo e cuidado na sua colheita, armazenamento e transporte, por se deteriorarem rapidamente e assim chegarem ao mercado, por vezes, com um aspeto indesejável (rachadelas, maduros/moles, pisados ou contendo bolor), transformando-se desta forma em subprodutos.

Assim, dado todo o processo minucioso até chegar ao consumidor final e tendo em conta as suas características nutricionais, estes possuem um elevado valor comercial, e daí a necessidade de criar novos mecanismos para evitar a perda destas qualidades, mesmo nas situações em que já eram considerados como desperdícios e assim atribuir-lhes maior prazo de validade.

No presente estudo foram analisados os aspetos relacionados com a valorização dos frutos vermelhos, tais como: a produção anual, a disponibilidade ao longo do ano, o custo final para o consumidor, os benefícios alimentares e os dados fornecidos por empresa de produção e de distribuição relativos às quantidades desperdiçadas de produtos agrícolas.

A evolução da produção de frutos de vermelhos em Portugal, na última década, é um caso de sucesso. As razões para este sucesso devem-se ao facto destes frutos se adaptarem bem ao clima de Portugal, permitindo a proliferação das explorações do norte ao sul do país. Neste contexto destaca-se a região do litoral alentejano, por ter as melhores condições climáticas da Europa para a produção destes produtos.

A época de produção convencional dos mirtilos pode decorrer durante os meses de abril a agosto, já a produção de framboesas ocorre de julho a outubro, mas recorrendo a determinadas técnicas de cultivo adequadas, pode produzir-se durante todo o ano em algumas regiões, como é o caso na região do litoral alentejano (GPP, 2016).

Para além da disponibilidade dos pequenos frutos ao longo do ano, a sua inclusão nos hábitos alimentares dos consumidores é significativa, o que tem levado ao seu maior consumo (GPP, 2016).

O nível de produção no ano 2010, correspondia a 220 hectares e, hoje em dia, atingiu quase 4200 hectares, na sua maioria pertencente à produção de mirtilo e de framboesa. Tal como pode ser observado no Gráfico 3, no ano 2020 a quantidade de frutos vermelhos

produzidos em Portugal, atingiu um máximo de quase 44000 toneladas, das quais 25276 toneladas correspondem à produção de framboesa e 15418 toneladas à produção de Mirtilo (Millennium AgroNews, 2021).

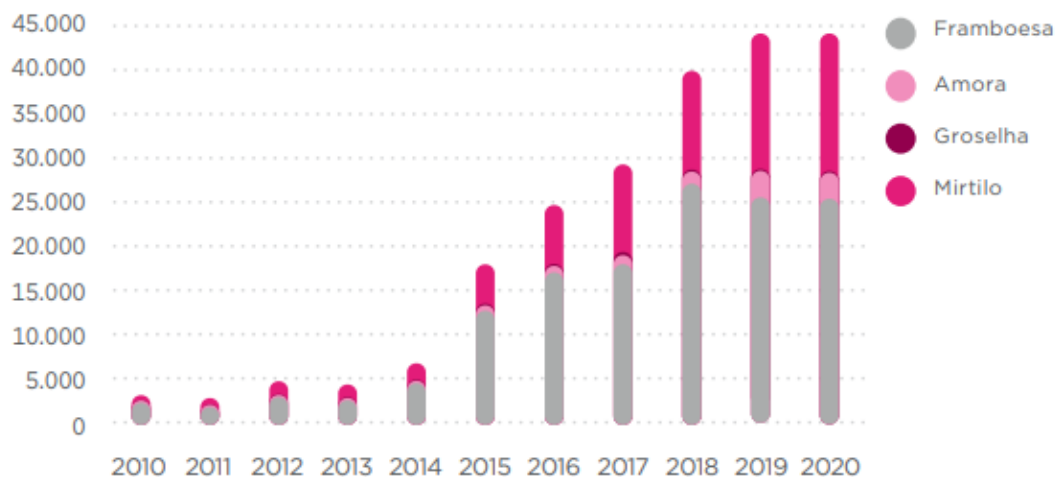


Gráfico 3 - Evolução da produção (ton) de frutos vermelhos por tipo de cultura (Fonte: Millennium AgroNews, 2021)

O preço dos frutos vermelhos determina-se em função da oferta e da procura nos mercados, variando ao longo do ano, as condições climáticas influenciam não só a disponibilidade dos frutos, mas também influenciam a procura por parte do consumidor.

Como pode ser observado no Gráfico 4 e no Gráfico 5, em Portugal, o preço da framboesa tem vindo a diminuir ao longo dos anos, passando de 9,7€/Kg para 6,2€/Kg, com um preço médio de 7,5€/Kg nos últimos dez anos. No caso do mirtilo, o preço médio é de cerca de 5,5€/Kg.

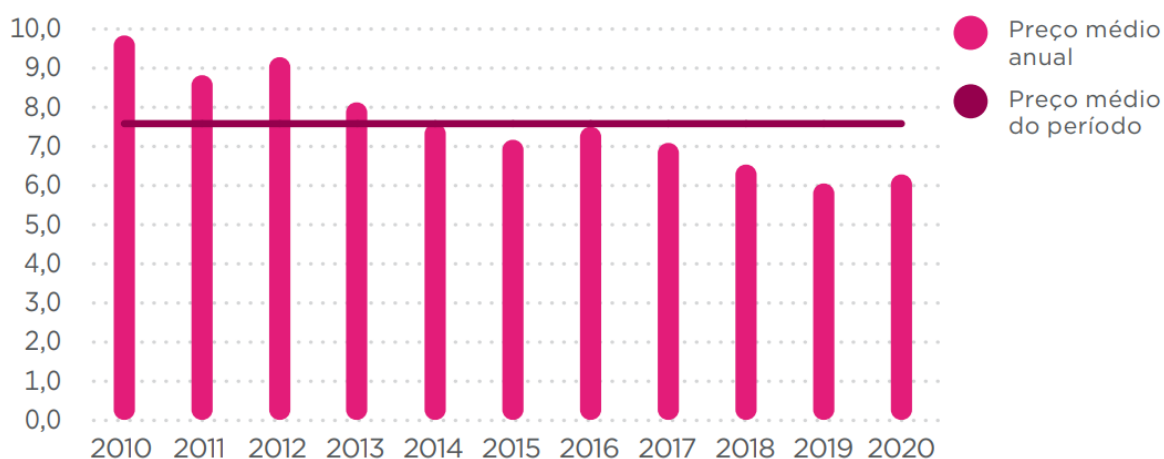


Gráfico 4 – Variação anual do preço (€/Kg) da framboesa (Fonte: Millennium AgroNews, 2021)

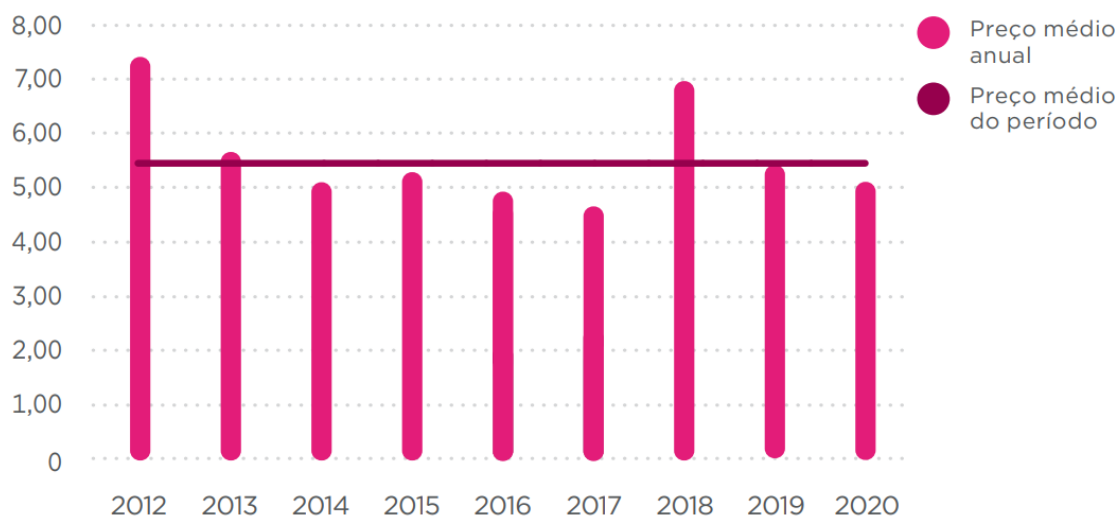


Gráfico 5 - Variação anual do preço (€/Kg) do mirtilo (Fonte: Millennium AgroNews, 2021)

É assim necessário procurar alternativas para combater os desperdícios destes frutos, nomeadamente os desperdícios provocados indiretamente pela pandemia Covid-19. Sanlez (2020) descreve que foram identificadas perturbações ao nível do escoamento da produção destes frutos devido à perda de canais de escoamento, tais como o setor hoteleiro. Refere ainda, a grande dificuldade ao nível das exportações, em virtude do fecho generalizado dos mercados de destino.

De entre as formas possíveis de aproveitamento destes produtos, a secagem demonstra ser um dos processos mais eficaz para colmatar estes prejuízos, precisamente por ser um processo que, através da estabilização dos produtos, aumenta o seu tempo de “prateleira” possibilitando a comercialização por prazos mais alargados, ao mesmo tempo que abre a porta a outros mercados enquanto produto individual ou processado, tal como os snacks.

Tal como referido anteriormente, uma das espécies utilizada para o presente estudo foi a framboesa (*Rubus Idaeus*). A framboesa é um pequeno fruto vermelho que apresenta vários compostos considerados benéficos para a saúde humana, contém nutrientes, como a fibra, a vitamina C, o ácido fólico e o manganês, e não-nutrientes, sobretudo compostos fenólicos e antocianinas que os destaca dos outros produtos.

As atividades fisiológicas potenciais dos constituintes da framboesa incluem efeitos antioxidantes, anti-inflamatórios, anticancerígenos, entre outros (Correia, 2016).

Este fruto fresco, regra geral perfumado e de sabor ligeiramente ácido, a cada 100 gramas é constituído principalmente por água (84,3 – 85,75g), fibra (3,7 – 6,7g) e açúcares (4,25 – 5,1g) como a sacarose, glucose e, sobretudo, frutose. Contém ainda os ácidos orgânicos (1,9g), principalmente ácido cítrico e ácido málico que são componentes minoritários da framboesa. A qualidade das framboesas frescas baseia-se essencialmente no tamanho, em

atributos sensoriais e em aspetos composicionais, como a humidade, o pH, teores em sólidos solúveis, vitamina C, teores em açúcares e ácidos orgânicos (Correia, 2016).

As framboesas têm características próprias de produtividade, de épocas de produção, hábitos de frutificação, de coloração dos frutos e de exigências climáticas. A elevada presença de água nestes frutos torna-os perecíveis, o que leva a procurar formas e alternativas de prolongar a sua vida útil.

Este estudo veio mostrar que através da secagem das framboesas é possível reduzir a presença de água nestes alimentos, conservando as suas qualidades.

Relativamente à segunda espécie analisada, estes foram os mirtilos (*Vaccinium myrtillus*). Este fruto tem um formato baciforme e globoso. É sumarento e tem um sabor agridoce. A sua cor é influenciada pela presença de pruína, que produz o efeito glauco responsável pela cor azul. O mirtilo apresenta, em média, cerca de 82% de água. O conteúdo de água nos tecidos depende da disponibilidade hídrica do solo na altura da colheita. A perda de água nestes frutos conduz ao emurchecimento e perda de massa, devido ao elevado teor de humidade torna-os suscetíveis à deterioração, aumentando a possibilidade de contaminação por crescimento microbiano. Os açúcares, como a glucose e a frutose, são dos principais componentes solúveis e representam cerca de 80% da matéria seca (Sousa, 2007).

Os mirtilos têm na sua composição substâncias bioativas, com ação antioxidante, anti-inflamatórias e anticancerígena, chamando a atenção aos consumidores que procuram melhor qualidade de vida. Podem ser consumidos de forma natural, congelados ou desidratados, mas também em extratos, vendidos como suplementos alimentares, para além de ser ingrediente de uma variedade de produtos processados (Goldmeyer et al, 2014).

3.2. Equipamentos e procedimento experimental

Para a seleção das amostras de cada espécie foram tomados alguns cuidados que garantissem resultados fiáveis, nomeadamente, que tivessem massas semelhantes, fossem homogéneas entre si, fossem representativas da espécie e se encontrassem à mesma temperatura que o meio ambiente.

Para tal, antes de serem iniciados os ensaios de secagem, os produtos foram retirados do seu local de conservação (frigorífico) e posteriormente foram expostos de forma a facilitar a transferência de calor com o meio ambiente durante uma hora aproximadamente. O objetivo deste procedimento foi deixar que os produtos atingissem o equilíbrio térmico com o ambiente ao mesmo tempo que se permitia que os condensados, que se formavam sobre a sua superfície devido à diferença de temperatura, evaporassem.



Figura 14 – Estabilização dos produtos testados em ambiente laboratorial

Antes de cada ensaio foram selecionadas seis amostras de cada produto. Na seleção das amostras foram tomados alguns cuidados que garantissem resultados fiáveis, nomeadamente: que as amostras tivessem massas semelhantes, fossem homogéneas entre si, fossem representativas da espécie a avaliar e que se encontrassem à mesma temperatura que o meio ambiente.

Das seis amostras, três destinavam-se à determinação do teor de humidade inicial do produto, enquanto que as outras três se destinavam ao ensaio da evolução do processo de secagem, em condições de temperatura e humidade relativa previamente especificadas. Foram sempre utilizadas três amostras em cada procedimento para verificar a repetibilidade dos resultados.

Assim, no mesmo momento em que se iniciava cada ensaio da evolução do processo de secagem de um conjunto de 3 amostras de um dos produtos, era também iniciada a determinação do teor de humidade inicial de um conjunto idêntico de 3 amostras do mesmo produto que se encontrassem nas mesmas condições. Deste modo, procurou-se que o teor de humidade inicial determinado fosse representativo do teor de humidade inicial das amostras colocadas no ensaio de secagem.

A determinação do teor de humidade inicial das amostras foi realizada por método gravimétrico com secagem em estufa. As amostras foram pesadas inicialmente, e colocadas numa estufa a uma temperatura 105°C e pesadas periodicamente, até atingir peso constante entre medições sucessivas. Antes de cada pesagem as amostras eram arrefecidas num exsiccador até, aproximadamente, à temperatura ambiente, e assim evitar erros de pesagem.

Relativamente aos ensaios da evolução do processo de secagem, em condições fixas de temperatura e humidade relativa, os produtos foram ensaiados em três condições de secagem diferentes. Foram utilizadas três temperaturas, 40°C, 50°C e 60°C, mantendo a humidade relativa do ar a 10%. De acordo com informações recolhidas junto de fabricantes e utilizadores de secadores solares, as condições de secagem selecionadas são representativas das condições que podem ser encontradas no interior dos secadores.

Para os ensaios da evolução do processo de secagem foi utilizada uma câmara climática que garantia a manutenção das condições fixas de temperatura e humidade relativa do ar de secagem. As amostras eram pesadas no exterior da câmara climática em intervalos de tempo, geralmente de uma hora, durante o dia. Não foram efetuados registos do peso durante a noite.

Durante o procedimento de pesagem, a temperatura e a humidade relativa do ar no interior da câmara mantiveram-se praticamente constantes ao longo do tempo. Para isso, procurou-se manter a porta da câmara fechada e fazer as pesagens das amostras na balança de forma rápida, para que estas não estivesse muito tempo expostas às condições exteriores, diferentes das do interior da câmara.

Conhecendo o teor de humidade inicial das amostras, e dessa forma a fracção de massa seca das amostras, foi determinado o teor de humidade em cada pesagem, e assim foram determinadas as curvas de secagem de cada espécie em função das condições de temperatura e de humidade relativa a que estava sujeita.

O ensaio terminava quando não se verificassem alterações da massa das amostras ao longo de um período mínimo de 6 horas. Considerou-se que o teor de humidade obtido no final das 6 horas era o teor de humidade de equilíbrio.

No presente estudo foi considerada a média dos valores da variação de massa das três amostras de cada espécie.

As amostras de framboesas e de mirtilos foram inseridas ao mesmo tempo no interior da câmara climática. Esta opção de secagem dos produtos ao mesmo tempo não teve influência na determinação das curvas de secagem, pois a câmara climática permite manter as condições do início ao fim do processo com as amostras referidas.

Tabela 2 - Descrição dos equipamentos utilizados

Equipamentos	Descrição	Foto
Balança analítica	<ul style="list-style-type: none">- Marca: Sartorius BP310P- Gama de medição: 0,001g – 310g;- Resolução: 0,001g;- Precisão: $\pm 0,002g$.	

Equipamentos	Descrição	Foto
<p>Balança analítica</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Marca: Kern ABJ-NM/ABS-N - Gama de medição: 0,001g-320g; - Resolução: 0,001g; - Precisão: $\pm 0,003g$. 	
<p>Estufa</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Marca: Venticell VC55 - Estufa com sistema de convecção forçada - Câmara interior feita em aço inoxidável, de volume de 55 litros (Dimensões 400x390x350mm); - Gama de temperaturas de operação: 10°C - 250/300°C; 	
<p>Câmara Climática</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Marca: Aralab FITOCLIMA 300EP10 Gama de temperaturas de operação: 10°C até 90°C Gama de humidade relativa de operação: 10% até 98% 	

3.3. Resultados

Na Tabela 3 é apresentado um resumo dos resultados obtidos nos testes de secagem de mirtilo e framboesa realizados no âmbito do presente estudo.

Tabela 3 - Tabela resumo dos ensaios efetuados

Espécie	Humidade Relativa (%)	Temperatura (°C)	TH Inicial	TH Equilíbrio (%) (base húmida)	Duração do teste (h)
			(%) (base húmida)		
Framboesa	10	40	89,7	16,5	210,5
		50	87,0	13,2	382,5
		60	85,9	9,7	142,3
Mirtilo		40	87,5	14,1	210,5
		50	88,0	10,2	382,5
		60	87,8	8,3	142,3

Tal como referido anteriormente, o ensaio terminava quando não se verificassem alterações da massa das amostras ao longo de um período mínimo de 6 horas. Considerou-se que o teor de humidade obtido no final das 6 horas era o teor de humidade de equilíbrio.

No Gráfico 6 e no Gráfico 7 estão representadas as curvas de secagem da framboesa e mirtilos, respetivamente, resultantes dos ensaios efetuados, com a humidade relativa a 10% e às temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.

No gráfico 6 pode observar-se que as amostras de framboesa possuíam um teor de humidade inicial elevado, entre os 85,9% a 89,7%. A perda de humidade do produto é mais acentuada no início do processo para as temperaturas maiores. O ponto do teor de humidade crítico da secagem foi atingido mais rapidamente a temperaturas mais elevadas. O teor de humidade de equilíbrio mais reduzido foi obtido no ensaio à temperatura de 60°C, de aproximadamente 9,7%, e o mais elevado foi obtido no ensaio à temperatura de 40°C, de aproximadamente 16,5%.

Relativamente aos mirtilos, no gráfico 7 pode observar-se que as amostras possuíam um teor de humidade inicial elevado, entre os 87,5% a 88%. O teor de humidade de equilíbrio mais reduzido foi obtido no ensaio à temperatura de 60°C, de aproximadamente 8,3% e o mais elevado foi obtido no ensaio à temperatura de 40°C, de aproximadamente 14,1%.

O menor tempo de secagem para as duas espécies foi obtido à temperatura de 60°C, nomeadamente 142,3 horas.

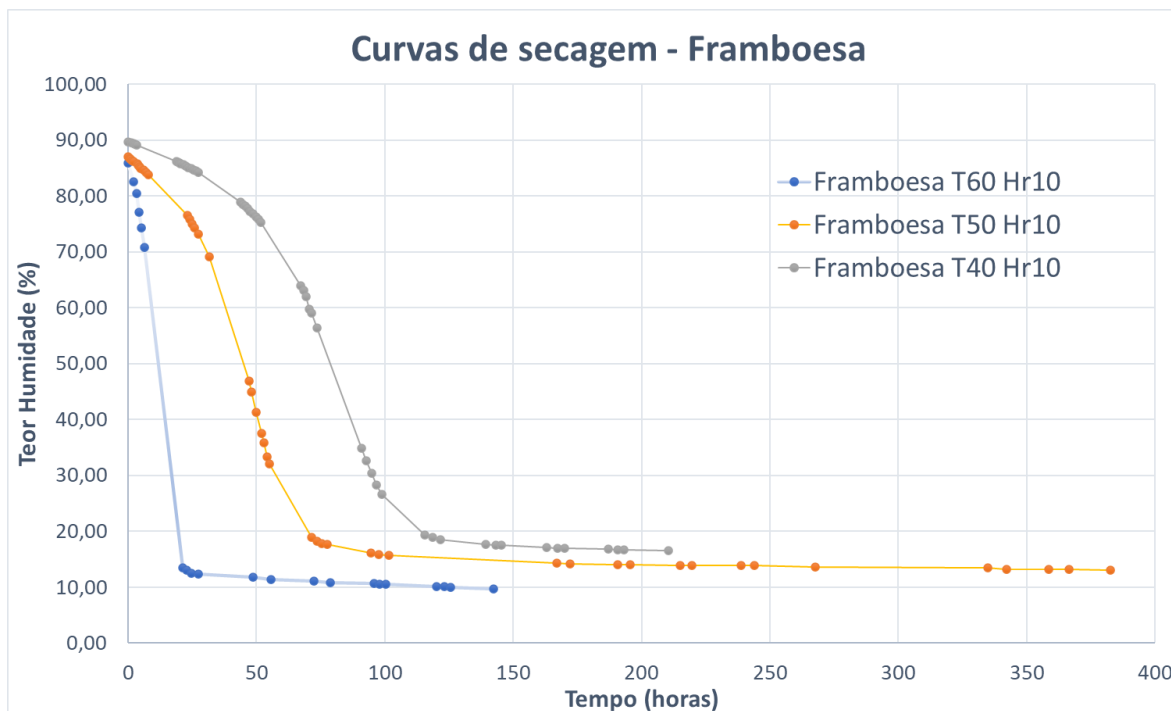


Gráfico 6 - Curvas de secagem da framboesa resultantes dos ensaios efetuados, com a humidade relativa a 10% e às temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.

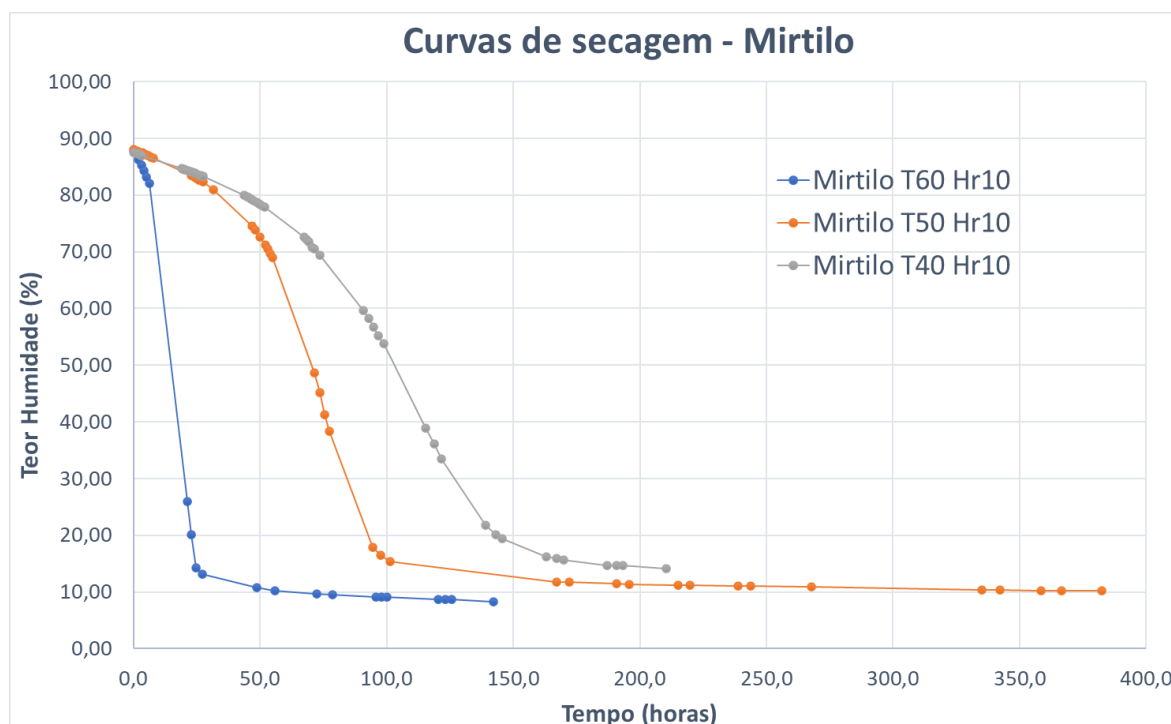


Gráfico 7 - Curvas de secagem do mirtilo resultantes dos ensaios efetuados, com a humidade relativa a 10% e às temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.

No Gráfico 8 e no Gráfico 9 está representada a variação da fração de água evaporável da framboesa e mirtilos, respetivamente, resultantes dos ensaios efetuados, com a humidade relativa a 10% e às temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.

De forma geral, as curvas da cinética de secagem da framboesa e dos mirtilos possuem um comportamento esperado. É identificado um primeiro período de adaptação dos produtos à temperatura e humidade relativa definidos para cada ensaio, e onde ocorreu a uma baixa taxa de secagem. Posteriormente as curvas de secagem apresentam uma taxa de secagem quase constante com uma diminuição significativa da humidade, até o valor da fração de água evaporável atingir o valor igual a zero.

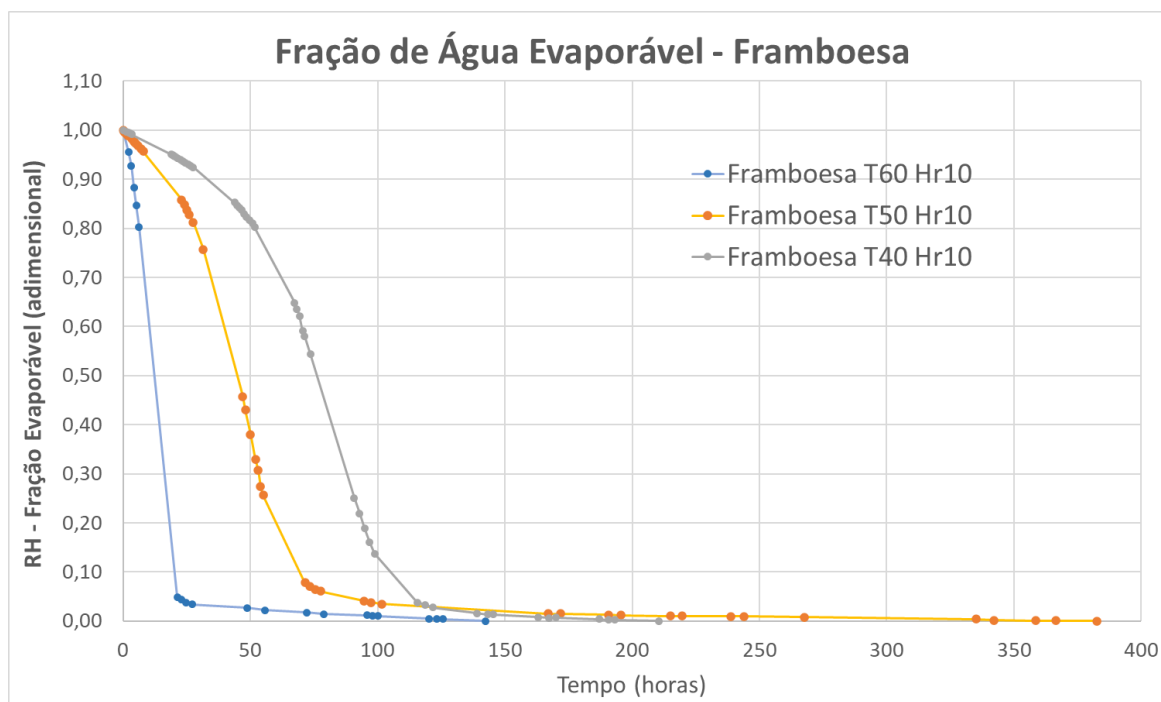


Gráfico 8 - Variação da fração de água evaporável da framboesa resultantes dos ensaios efetuados, com a humidade relativa a 10% e às temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.

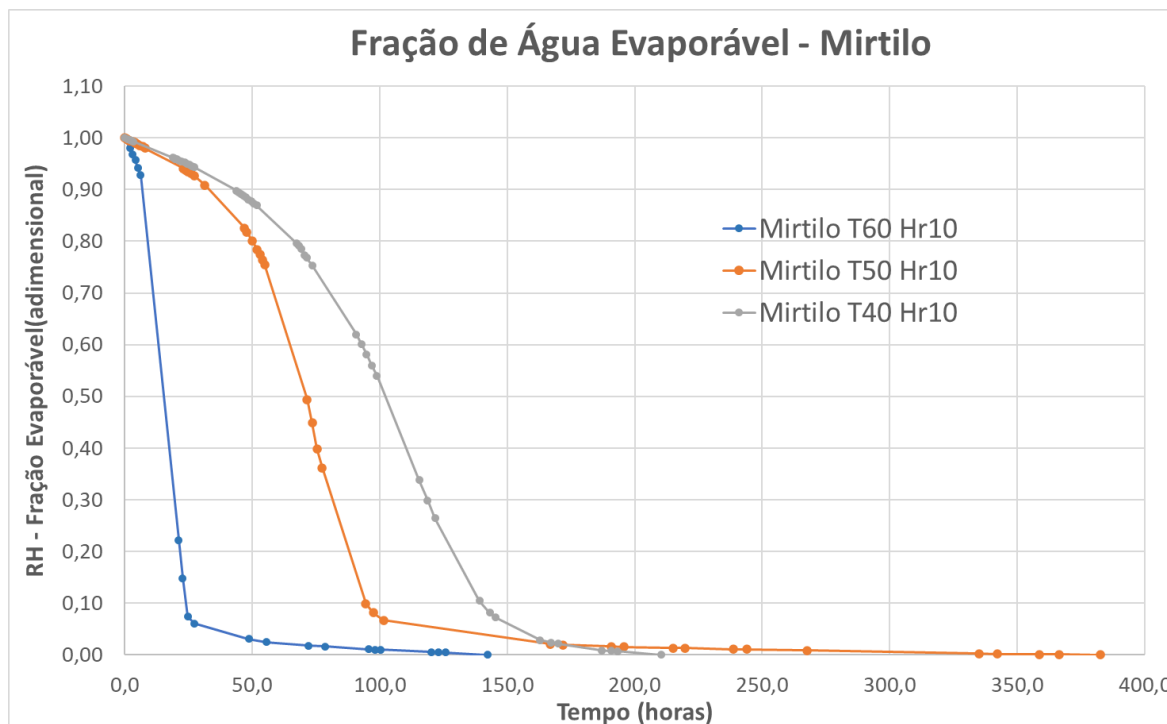


Gráfico 9 - Variação da fração de água evaporável do mirtilo resultantes dos ensaios efetuados, com a humidade relativa a 10% e às temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.

Após a realização dos ensaios, os dados experimentais obtidos foram sujeitos a uma análise matemática, de forma a determinar qual o modelo matemático que melhor representa os valores experimentais.

Assim, foram analisados os modelos de Newton, Henderson e Pabis, logarítmico e exponencial de dois termos descritos na tabela 5 e foi realizada uma análise de regressão não linear no SPSS STATISTICS para determinação das constantes do modelo com base nos valores experimentais. Para se determinar o melhor ajuste de cada modelo aos valores experimentais foram utilizados os coeficientes de determinação (R^2), o erro médio absoluto (MAE) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE).

Na Tabela 4 e na Tabela 5 é apresentado o teor de humidade de equilíbrio, as constantes dos modelos e os parâmetros estatísticos para os ensaios com framboesa e mirtilos, respetivamente, a uma humidade relativa a 10% e às temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C

Como pode ser observado na Tabela 4 e na Tabela 5, considerando o maior valor de R^2 e os menores valores de MAE e RSME, o modelo que demonstra o melhor ajuste global aos dados experimentais, corresponde ao modelo Logarítmico. Por sua vez, o modelo que demonstra o pior ajuste aos dados experimentais, corresponde ao modelo de Newton.

Tabela 4 - Teor de humidade de equilíbrio, constantes dos modelos e parâmetros estatísticos para os ensaios com framboesa a uma humidade relativa a 10% e às temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C

Modelo	Temperatura do ar (°C)	TH _e (%)	Constantes do modelo			Parâmetros Estatísticos		
			k	a	c	R ²	MAE	RMSE
Newton	40	15,991	0,031			0,94640	0,05093	0,06414
	50	13,806	0,072			0,99670	0,00970	0,01232
	60	8,423	0,009			0,97949	0,02286	0,02296
Herderson e Pabis	40	16,026	0,046	1,012		0,99048	0,01376	0,02034
	50	13,809	0,072	1,001		0,99664	0,00945	0,01213
	60	8,844	0,004	0,922		0,99304	0,01131	0,01137
Logarítmico	40	16,027	0,050	0,961	0,053	0,99051	0,01378	0,02034
	50	13,814	0,070	1,017	-0,018	0,99671	0,00983	0,01242
	60	8,999	0,153	0,105	0,835	0,99335	0,00886	0,00896
Exponencial dois termos	40	16,026	0,046	1,006		0,99048	0,01375	0,02033
	50	13,809	0,072	1,001		0,99657	0,00934	0,01196
	60	8,844	0,004	0,961		0,99305	0,01130	0,01136

Tabela 5 - Teor de humidade de equilíbrio, constantes dos modelos e parâmetros estatísticos para os ensaios com o mirtilo a uma humidade relativa a 10% e às temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C

Modelo	Temperatura do ar (°C)	TH _e (%)	Constantes do modelo			Parâmetros Estatísticos		
			k	a	c	R ²	MAE	RMSE
Newton	40	10,795	0,027			0,9912	0,0354	0,0429
	50	9,721	0,031			0,9818	0,0392	0,0563
	60	9,406	0,3			0,9439	0,0125	0,0156
Herderson e Pabis	40	11,234	0,030	1,023		0,9921	0,0374	0,0462
	50	9,905	0,033	1,021		0,9821	0,0263	0,0445
	60	8,816	0,015	0,634		0,9797	0,0083	0,0090
Logarítmico	40	11,339	0,142	0,535	0,564	0,9937	0,0317	0,0387
	50	9,057	0,059	0,7	0,331	0,9827	0,0275	0,0451
	60	8,637	32,059	18,438	0,617	0,9828	0,0062	0,0070
Exponencial dois termos	40	11,234	0,030	1,012		0,9920	0,0386	0,0471
	50	9,905	0,033	1,011		0,9818	0,0258	0,0445
	60	8,816	0,014	0,817		0,9798	0,0083	0,0090

No Gráfico 10 e no Gráfico 11 estão representadas as curvas de secagem da framboesa e mirtilo, respectivamente, resultantes da aplicação do modelo Logarítmico estimado para uma humidade relativa de 10% e temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.

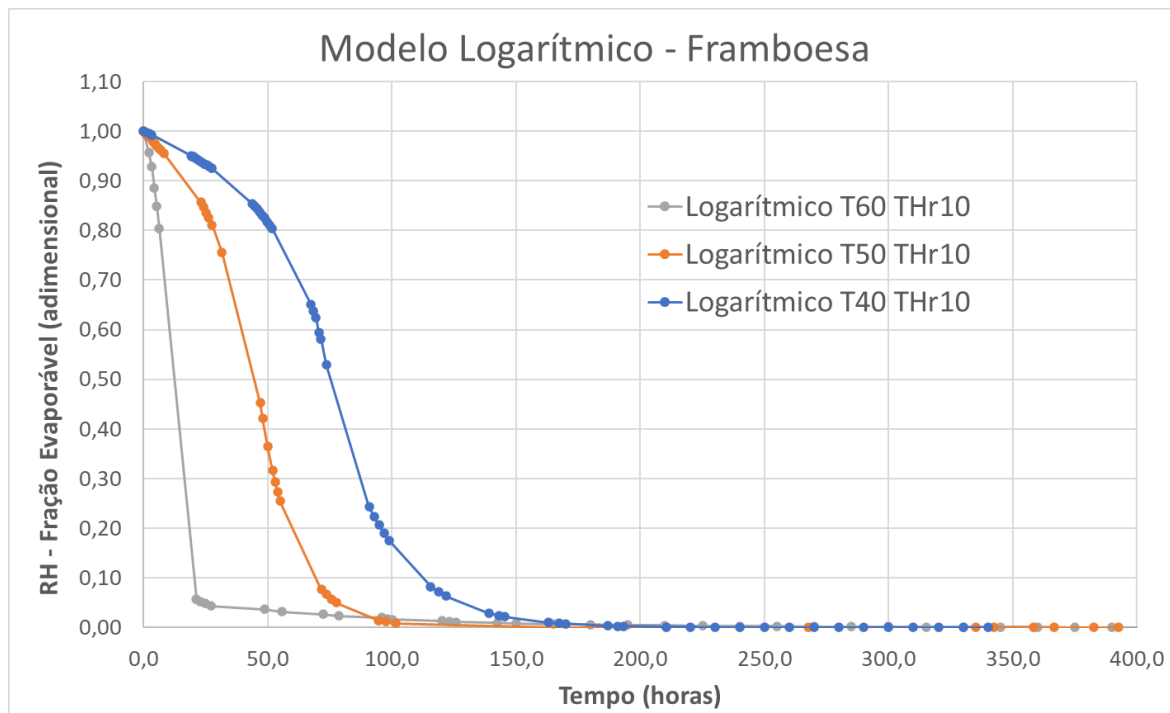


Gráfico 10 – Curvas de secagem da framboesa resultantes da aplicação do modelo Logarítmico estimado para uma humidade relativa de 10% e temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.

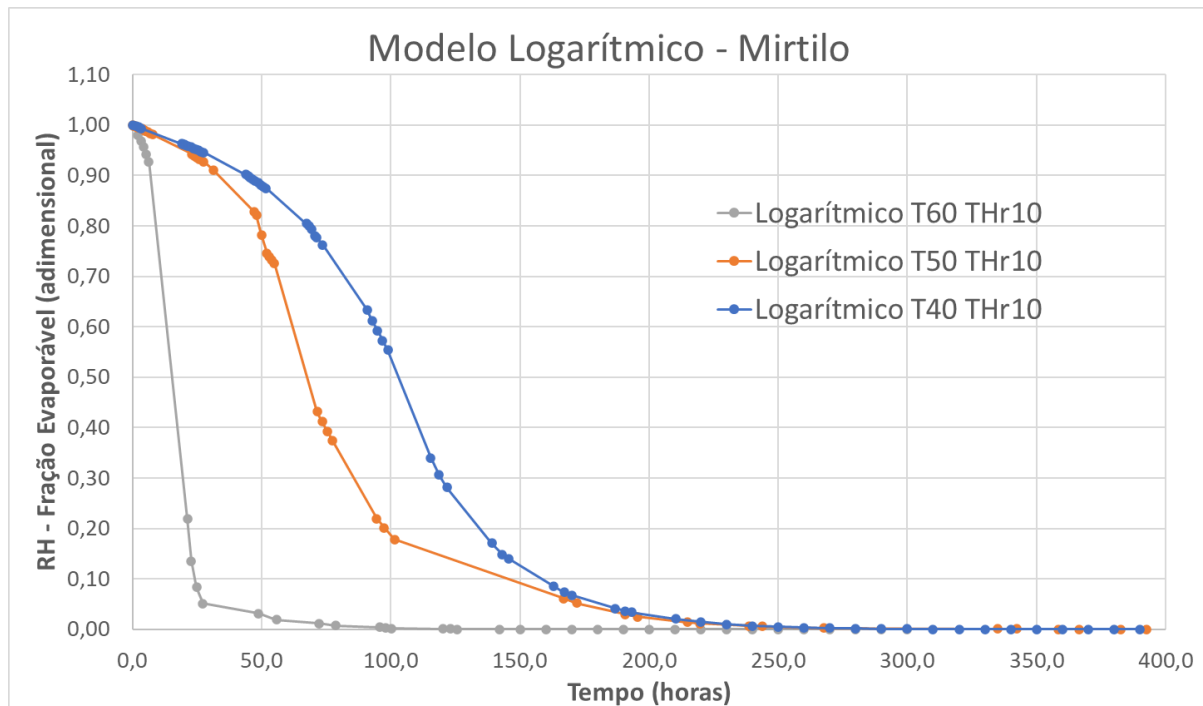


Gráfico 11 - Curvas de secagem do mirtilo resultantes da aplicação do modelo Logarítmico estimado para uma humidade relativa de 10% e temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.

4. Conclusões finais

4.1. Conclusões sobre os resultados obtidos

O aumento da qualidade dos produtos alimentares desidratados passa pela otimização das condições de operação dos métodos de secagem a utilizar. Para a determinação das condições ideais de secagem para um determinado produto, é necessário conhecer o comportamento de um conjunto de propriedades físicas, químicas e organoléticas, que definem a qualidade desses produtos. Estes fatores de qualidade são sensíveis não só à temperatura, mas também à quantidade de água presente nos produtos.

O estudo experimental visou, por um lado, a comparação de resultados obtidos entre o mirtilo e a framboesa, assim como, a aquisição de dados da cinética de secagem em diferentes condições operatórias e a influência da temperatura no processo da secagem.

Os ensaios efetuados revelaram uma redução significativa da massa dos produtos. Esta redução pode ser vista como uma grande vantagem, na medida em que permite maior facilidade no transporte e no armazenamento.

A análise dos resultados mostra a importância da temperatura de secagem durante o processo. Com o aumento da temperatura o tempo de secagem diminui, bem como o teor de humidade de equilíbrio alcançado. Para as mesmas condições de ensaio, as framboesas levaram menos tempo para iniciar a fase de secagem constante e a atingir o teor de humidade de equilíbrio do que os mirtilos. Os dois produtos apresentaram ainda um elevado teor de humidade inicial, no caso das framboesas, entre 85,93 a 89,74%, e o mirtilo entre 87,50 a 88,04%.

Como o modelo matemático da operação é reconhecido como o elemento principal da otimização da secagem, este trabalho expõe neste domínio uma contribuição pela apresentação dos diversos modelos matemáticos que podem ser ajustados às curvas de secagem obtidas para cada espécie.

No caso da framboesa os melhores ajustes dos ensaios aos modelos matemáticos estudados, foram no ensaio de secagem à temperatura de 50°C e humidade relativa do ar a 10%. Todos os modelos apresentaram um coeficiente de determinação superior a 0,99 e valores baixos do erro médio absoluto (MAE) e da raiz do erro quadrático médio (RSME). Já no caso do mirtilo, foi no ensaio de secagem à temperatura de 40°C e humidade relativa constante (10%). Apesar de apresentarem os valores do MAE e do RSME elevados comparativamente aos ensaios a 50°C e 60°C, mostraram um coeficiente de determinação superior a 0,99.

Após analisados os dados obtidos experimentalmente e o ajuste dos mesmos aos modelos matemáticos de Newton, de Herderson e Pabis, do Logarítmico e o do Exponencial de dois termos o que melhor se ajustou aos dados foi o modelo matemático do Logarítmico às diferentes temperaturas (40, 50 e 60 °C) e humidade relativa constante (10%), tanto para o mirtilo como para a framboesa. O ajuste deste modelo aos dados experimentais, mostrou-se satisfatório, na medida em que se obtiveram bons resultados do coeficiente de determinação R^2 e baixos valores do erro médio absoluto (MAE) e da raiz do erro quadrático médio (RSME). As curvas de secagem obtidas mostraram-se com um aspeto semelhante as curvas de secagem dos dados experimentais.

4.2. Sugestões para trabalhos futuros

Com o presente trabalho pretendeu dar-se um contributo para o conhecimento dos processos de secagem da framboesa e do mirtilo, no que toca à sua modelização e simulação a partir das variáveis estudadas. Contudo, dada a natureza tão inconstante das diferentes variáveis que influenciam o processo durante a secagem em condições reais, é necessário o estudo de como as mesmas permitem uma secagem eficaz dos produtos.

Assim, os trabalhos futuros serão importantes de forma a dar continuidade a este trabalho, por isso sugere-se: a realização de ensaios variando a humidade relativa do ar de secagem para os mesmos produtos, o estudo da influência da velocidade do ar de secagem no processo, a diferentes velocidades; a realização de ensaios utilizando amostras com o tamanho e forma diferentes.

O estudo da cinética de secagem de frutos, por si só, é relevante, mas pode não ser o mais importante. É também de grande importância o estudo da influência das condições de secagem sobre a composição, as propriedades nutricionais e as características organolépticas dos produtos.

REFERÊNCIAS

- Afolabi, I.S. (2014). Moisture Migration and Bulk Nutrients Interaction in a Drying Food Systems: A Review. *Food and Nutrition Sciences*, vol.4, 5, 692-714
<http://dx.doi.org/10.4236/fns.2014.58080>
- Akbulut, A., Durmus, A. (2009). Thin layer solar drying and mathematical modeling of mulberry. *International Journal Of Energy Research*, 33, 687-695.
<https://doi.org/10.1002/er.1504>
- Akpinar, E.K. (2010). Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: Modelling, performance analyses. *Energy Conversion and Management*, 51, 2407-2418.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.05.005>
- Anand, C., Sukesha, S., & Thangjam, S. (2012) FPGA Based Remote Monitoring System for Food Preservation. *International Journal of Advances in Electronics Engineering*; 2, 50-55.
- Arslan, D., Ozcan, M.M., Menges, H.O. (2010). Evaluation of drying methods with respect to drying parameters, some nutritional and colour Characteristics of peppermint (*Mentha x piperita* L.). *Energy Conversion and Management*, 51, 2769-2775.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.013>
- Associação de Desenvolvimento Dão Lafões e Alto Paiva (2017). Inovação para a Agricultura. Acedido em https://inovacao.rederural.gov.pt/grupos-operacionais/13-projectos-groupos-operacionais/46-waste2value-integracao-da-valorizacao-de-subprodutos-da-atividade-agricola-com-a-producao-de-alimentos-compostos-para-animais-plasticos-biodegradaveis-e-tratamento-de-efluentes-animais?cookie_4edc832c64da52717aa377e8ae55a36b=accepted
- Ayala, J., Vega, V., Rosas, C., Palafox, H., Villa, J., Siddiqui, W., et al. (2011). Agroindustrial potential of exotic fruit byproducts as a source of food additives. *Food Res. Int.*; 44, 1866–1874. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.02.021>
- Barnwal, P., & Tiwari, G.N. (2008). Grape drying by using hybrid photovoltaic-thermal (PV/T) greenhouse dryer: an experimental study. *Sol. Energy*, 82, 1131-1144.
- Belessiotis, V., & Delyannis, E. (2011). Solar drying. *Solar Energy* 85, 1665–1691.

- Bergman T. L., & Lavine, A. (2014). *Incropera - Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. Gen LTC. ISBN: 9788521625049.
- Brod, F. P. R., (2003). *Avaliação de um secador vibro-fluidizado*. Universidade de Campinas. Campinas, Brasil. p.20. Tese de Doutorado.
- Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W., Hall, C.W., (1992). *Drying and storage of grains and oilseeds*. Westport. The AVI Publishing Company
- Cardão, P., & Nogueira, P. (2020). *Verão com Ciência “Aplicação da Impressão 3D a Projetos de I&D” - Projeto I&D: Waste2Value e Desidratador S2D*.
- Catorze, C., Tavares, A. P., Cardão, P., Castro, A., Silva, M. E., Wessel, D., Lopes, S., & Brás, I. (2021). *Study of a Solar Energy Drying System—Energy savings and effect in dried food quality*. ICEER 2021.
- Celestino, S. M. C. (2010). *Princípios de Secagem de Alimentos*. Embrapa. Acedido em <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/77765/1/doc-276.pdf>.
- Çengel, Y., & Ghajar, A. (2012). *Transferência de Calor e de Massa: Uma Abordagem Prática (4ª EDIÇÃO)*. AMGH EDITORA LTDA. ISBN: 9780073398129.
- Chua, K. J., & Chou, S. K. (2003). *Low-cost drying methods for developing countries*. *Trends in Food Science & Technology*, 14, 519–528. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.07.003>.
- Cordeiro, A.I., Moreno, L., Espejo, A., Machuca, S. , Almeida, T., Santos, M., Mondragão-Rodrigues, F., Pacheco de Carvalho, G., Paulo, M., & Sanchez, R. (2020). *Os subprodutos produzidos nas indústrias transformadoras de tomate na zona EUROACE*. Acedido em <http://www.agronegocios.eu/noticias/os-subprodutos-produzidos-nas-industrias-transformadoras-de-tomate-na-zona-euroace/>.
- Correia, M. M. M. B. C. (2016). *Caracterização química e avaliação da atividade biológica da framboesa (Rubus idaeus L.)*. Contribuição para o desenvolvimento de uma alegação de saúde. [Doutoramento]. Universidade de Lisboa - Faculdade de Farmácia.
- Damodaran, S., Parkin, K. L., & Fennema, O. R. (2010). *Química de Alimentos de Fennema (4ª)*. Artmed.
- Dryden, I. G. C. (1982). *The Efficient Use of Energy (2º ed.)*

REFERÊNCIAS

- Ekechukwu, O. V., & Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energy Conversion*, 41.
- El-Beltagy, A., Gamea, G., & Amer Essa, A. (2007). Solar drying characteristics of strawberry. *Journal of Food Engineering*, 78, 456–464.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.015>
- El-Sebaei, A.A., Shalaby, S.M. (2013). Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint. *Energy Conversion and Management*, 74, 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.05.006>
- Ferreira, A., & Candeias, M. (2005). SECAGEM SOLAR DE FRUTOS E PLANTAS AROMÁTICAS. *REVISTA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS*, 363–370.
- Ferreira, A., Maia, C., Cortez, M., & Valle, R. (2008). Technical feasibility assessment of a solar chimney for food drying. *Solar Energy*, 82, 198–205.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.08.002>
- Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M. H., Alghoul, M. A., & Sulaiman, M. Y. (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.032>
- Gabinete de Planeamento, Políticas e Administração Geral (2016). Pequenos Frutos Vermelhos - Mirtilo e Framboesa, Amora e Groselha. Acedido: <https://www.gpp.pt/images/gam/1/fi/PequenosFrutosVermelhosFI.pdf>
- Global Solar Atlas 2.0. (2019). Carta da radiação solar em Portugal Continental. Acedido em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_solar_em_Portugal
- Goldmeyer, B., Penna, N. G., Melo, A., Rosa, C. S. (2014), Características Físico-químicas e propriedades funcionais tecnológicas do bagaço do mirtilo fermentado e suas farinhas. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 36 (4), 980-987. <https://doi.org/10.1590/0100-2945-380/13>
- Guiné, R. (2018). The Drying of Foods and Its Effect on the Physical-Chemical, Sensorial and Nutritional Properties. *International Journal of Food Engineering*, Vol. 4(No.2), 93–100. <https://doi.org/10.18178/ijfe.4.2.93-100>
- Gunathilake, D.M.C.C., Senanayaka, D.P., Adiletta, G., & Senadeera, W. (2017). Drying of Agricultural Crops. In *Advances in Agricultural Machinery and Technologies* (pp. 331-365). <https://doi.org/10.1201/9781351132398-14>

- Hamdi, I.; Kooli, S., Elkhadraoui, A., Azaizia, Z.; Abdelhammid, F., Guizani, A. (2018). Experimental study and numerical modeling for drying grapes under solar greenhouse. *Renewable Energy*, v.127, p.936-946. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.027>
- Imre, L., & Mujundar, A. S. (2015). Solar drying. *Handbook of industrial drying*, 4th ed., chap.14, p. 303-350
- Jideani, A. I. O., & Anyasi, T. A. (2020). *Banana Nutrition—Function and Processing Kinetics*.
- Leitão, A.E.B. (1998). Estudos de secagem solar de produtos agro-alimentares. Dissertação apresentada ao Instituto de Investigação Científica Tropical. Centro de Estudos de Produção e Tecnologia Agrícolas. https://www.researchgate.net/publication/236011904_ESTUDOS_DE_SECAGEM_SOLAR_DE_PRODUTOS_AGROALIMENTARES/link/00463515aea1d87c51000000/download
- Lima, K. da S., & Guerra, F. K. de O. M. V. (2017). SECADOR SOLAR DE BAIXO CUSTO NO SEMIÁRIDO POTIGUAR: ANÁLISE DO DESEMPENHO. http://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/2132/1/KelianySL_ART.pdf
- Link, J., Tribuzi, G., & Laurindo, J. (2017). Improving quality of dried fruits: A comparison between conductive multi-flash and traditional drying methods. *LWT - Food Science and Technology*, 84, 717–725.
- Lopes, S. M. G. (2013). Modelos de previsão do teor de humidade de combustíveis florestais [Dissertação de Doutoramento]. Universidade de Coimbra.
- Martin, D., Grant, J.-, & Ringwood, K. (2002). Evaluation of a prototype thermal anemometer for use in low airspeed drying measure calculations. *Flow Measurement and Instrumentation*, 12, 385–396.
- Martins, D.B. (2019). Análise da secagem convectiva em condições externas constantes de fatias de maçã do tipo golden delicious. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro Campus Macaé. Engenharia Mecânica. Acedido em http://engenharias.macaee.ufrj.br/images/testetcc/2019/TCC_-_Douglas_B._Martins.pdf
- Midilli, A. Kucuk, H. (2003). Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management*, 44, 1111-1122. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00099-7](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00099-7)

REFERÊNCIAS

- Millennium AgroNews (2021). Revista nº 9: Fileira dos Frutos Vermelhos. Acedido em: https://www.millenniumbcp.pt/pt/apoio_as_empresas/Documents/Millennium_AgroNews_9_21102021.pdf
- Morais, J., 2009. Sistemas Fotovoltaicos da Teoria à Prática, PUBLINDUSTRIA.
- Oliveira, J. F., Moreira, G. C., Steinmcher, N. C., Corso, M. P., & Zanatta, E. R. (2021). Composição centesimal de subprodutos de frutas in natura e após processo de secagem. *Brazilian Journal of Development*, 7(6), 53996–54004. <https://doi.org/10.34117/bjd.v7n6-005>
- Oliveira, J.R.A. (2015). Secagem solar de folhas de coentro e salsa: uma alternativa para o pequeno produtor. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Acedido em <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/5551/1/JOS%C3%89%20DIORGENES%20ALVES%20OLIVEIRA%20-%20TCC%20ENG.%20DE%20BIOSSISTEMAS%202015..pdf>
- Oliveira, R.A. de (2009). Estudo da secagem em dois tipos de secadores: avaliação dos parâmetros operacionais e comportamento do material seco. (Tese de Doutorado). Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas. Acedido em <https://core.ac.uk/download/pdf/296853928.pdf>
- Organização das Nações Unidas Para a Alimentação e a Agricultura (2016). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2016. Contributing to Food Security and Nutrition for all*. Rome: FAO.
- Oyinloye, T.M., & Yoon, W.B. (2020). Effect of Freeze-Drying on Quality and Grinding Process of Food Produce: A Review. *Processes*; 8, 354, 2-23. doi:10.3390/pr8030354
- Pardhi, C., & Bhagoria, J. (2013). Development and performance evaluation of mixed-mode solar dryer with forced convection. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*.
- Park, B. K. J., Alonso, L. F. T., Cornejo, F. E. P. Maria, I. D. F., (2014). Secagem: fundamentos e equações. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, 16(1), pp.93–126.
- Park, K. J., Antonio, G. C., Oliveira, R. A., & Park, K. J. B. (2007). Conceitos de processo e equipamentos de secagem.
- Pastrana, A. (2014). NOPAL (*Opuntia Lasiacantha*) DRYING USING AN INDIRECT SOLAR DRYER. *Energy Procedia* 57, 2984–2993.

- Peske, S.T., Rosenthal, M.D., & Rota, G.R.M. (2012). *Sementes: Fundamentos científicos e tecnológicos*. 3ª edição. Pelotas: Editora rua Pelotas.
- Pires, G. R., Lima, A., Sales, J. H. O., & Portugal, A. A. (2015). Sistema alternativo para secagem de cacau e geração de energia. <https://doi.org/10.7198/geintec.v5i1.352>
- Pornpraipech, P., Khusakul, M., Singklin, R., Sarabhorn, P., & Areeprasert, C. (2017). Effect of temperature and shape on drying performance of cassava chips. *Agriculture and Natural Resources*, 51, 402–409. <https://doi.org/10.1016/j.anres.2017.12.004>
- Puhl, J. & Nitzke, J. A. (2010). Secagem de Vegetais Acedido em https://www.ufrgs.br/alimentus1/objetos/veg_desidratados/secagem_contato.html
- Quiles, A., Hernando, I., Pérez-Munuera, I., Larrea, V., Llorca, E., & Lluch, M. Á. (2005). Polyphenoloxidase (PPO) activity and osmotic dehydration in Granny Smith apple: PPO activity and osmotic dehydration in apple. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(6), 1017–1020. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2062>
- Reis, P. (2019a). Energia Solar—Tudo o que deve saber. Notícias e empregos sobre Energias Renováveis. Acedido em: <https://www.portal-energia.com/energia-solar/>
- Reis, P. (2019b). Manual e Guia Técnico de Energia Solar Fotovoltaica. Acedido em: <https://www.portal-energia.com/manual-e-guia-tecnico-de-energia-solar-fotovoltaica-tecnologias-projecto-e-instalacao/>
- Ramos C., Ventura J.E. (1999). III Congresso da Geografia Portuguesa. pp 453-461. Edições Colibri e Associação Portuguesa de Geógrafos. Lisboa, Portugal.
- Rocha, R. P., Melo, E. C., & Radünz, L. L. (2011). Influence of drying process on the quality of medicinal plants: A review. *Journal of Medicinal Plants Research*, VOL. 5(33), 7076–7084. <https://doi.org/10.5897/JMPRx11.001>
- Sabarez, H.T. (2015). *Modelling of drying processes for food materials*. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, 95–127. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-284-6.00004-0>
- Sahu, T. K., Gupta, D. V., & Singh, A. K. (2016). A Review on Solar Drying Techniques and Solar Greenhouse Dryer. 13, 31–37. <https://doi.org/10.9790/7388-1303033137>

REFERÊNCIAS

- Sallam, Y. I., Aly, M. H., Nassar, A. F., & Mohamed, E. A. (2015). Solar drying of whole mint plant under natural and forced convection. *Journal of Advanced Research*, 6, 171–178. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jare.2013.12.001>
- Sanlez, A. (2020). Morangos e framboesas já podem ser retirados do mercado com apoio do Governo. *Jornal de Negócios*. Acedido em: <https://www.jornaldenegocios.pt/empresas/agricultura-e-pescas/detalhe/morangos-e-framboesas-ja-podem-ser-retirados-do-mercado-com-apoio-do-governo#loadComments>
- Sontakke, M. S., & Salve, S. P. (2015). *Solar Drying Technologies: A review*. vol.4, 29–35.
- Sousa, M. B. (2007). Mirtilo – Qualidade Pós-colheita (Âmbito do Projecto PO AGRO DE&D N° 556 “Diversificação da produção frutícola com novas espécies e tecnologias que assegurem a qualidade agro-alimentar). *DIVULGAÇÃO AGRO 556*. Acedido em: https://www.inia.vpt/images/publicacoes/livros-manuais/mirtilo_qualidade_pos_colheita.pdf
- Souza, M.B., Tonolo, E.A., Yang, R.L (2018), “Determinação da Irradiação Difusa a partir da Irradiação Global Horizontal – Estudo para a cidade de Curitiba”, *Smart Energy*, Paraná
- Tanko, H., Carrier, D., Duan, L., & Clausen, E. (2005). Pre- and post-harvest processing of medicinal plants. *Plant Genetic Resources*, 56, 1–11. <https://doi.org/10.1079/PGR200569>
- Tiwari, A. (2016). A Review on Solar Drying of Agricultural Produce. *Journal of Food Engineering*, 7, 623, doi: 10.4172/2157-7110.1000623
- Tribuna, M. (2020). Desperdício alimentar em Portugal. 1 milhão de toneladas de alimentos vão para o lixo por ano. Acedido em: <https://executivedigest.sapo.pt/desperdicio-alimentar-em-portugal-1-milhao-de-toneladas-de-alimentos-vao-para-o-lixo-por-ano/>
- Unidade de Nutrição Clínica do Hospital Lusíadas Lisboa (2018). Fruta desidratada: As vantagens e os inconvenientes. Acedido em: <https://rotasaude.lusiadas.pt/prevencao-e-estilo-de-vida/nutricao-e-dieta/fruta-desidratada-vantagens-desvantagens>
- Valente, J.M.L.D. (2015). *Subprodutos Alimentares: Novas Alternativas e Possíveis Aplicações Farmacêuticas*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Fernando Pessoa. Faculdade de Ciências da Saúde. Acedido em: https://bdigital.ufp.pt/bitstream/10284/5312/1/PPG_23519.pdf

- Velezmoro, C.E. (1999). Modelagem e predição de atividade de água em fluidos alimentícios. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.
- Vijayaraj, B., Saravanan, R., Renganarayanan S. (2007). Studies on thin layer drying of bagasse. *International Journal Of Energy Research*, 31, 422-437. <https://doi.org/10.1002/er.1237>
- Wang, Y., Li, Y., Wang, S., Zhang, L., Gao, M., & Tang, J. (2011). Review of dielectric drying of foods and agricultural products. *Int J Agric & Biol Eng*, 4(1), 1–19.
- Wankhade, P. K., Sapkal, R. S., & Sapkal, V. S. (2013). Drying Characteristics of Okra slices on drying in Hot Air Dryer. *Procedia Engineering*, 51, 371–374.
- Xiao, Hong-Wei, Bai, Jun-Wen, Sun, Da-Wen, & Gao Zhen-Jiang (2014). The application of superheated steam impingement blanching (SSIB) in agricultural products processing – A review. *Journal of Food Engineering*; Vol. 132, 39-47, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.01.032>.