



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Trabalho efetuado sob a orientação de



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Trabalho efetuado sob a orientação de

RESUMO

O desperdício alimentar é uma das maiores preocupações mundiais. A procura de soluções sustentáveis tem vindo a aumentar nos últimos anos e a desidratação de produtos alimentares com recurso a energia solar parece der ser uma das opções mais atrativas.

No presente trabalho foram efetuados diversos ensaios de secagem em diversos produtos em condições laboratoriais e em condições reais.

Em laboratório foram realizados ensaios em câmara climática com dois produtos agro-alimentares, nomeadamente mirtilos e framboesas, e com diferentes valores de temperatura (40, 50, 60°C) e com uma humidade relativa do ar de 10%. O objetivo principal destes ensaios foi encontrar as condições de secagem ideais. Para tal, foram realizadas análises químicas aos produtos, antes e após a sua secagem, para comparar a perda de propriedades durante o processo. Destes ensaios retirou-se a conclusão de que os ensaios a 40°C e 10% HR produziam os melhores resultados em termos do teor de humidade alcançado e da qualidade do produto final seco.

Em condições reais realizaram-se ensaios num secador solar indireto e híbrido, da empresa Chatron, com vários produtos agro-alimentares, tendo sido analisados apenas os ensaios com couve-galega e bagaço de maçã. O objetivo principal destes ensaios foi determinar a contribuição da energia solar para o processo de secagem. Para tal, foi desenvolvido um balanço de energia ao secador que teve em conta os fluxos de energia do ar que entra e que sai, da água transferida do produto para o ar, a energia elétrica e as perdas térmicas. Estes ensaios revelaram que o balanço aplicado não é adequado ao período inicial transiente do processo, mas dá bons resultados no restante que corresponde à maior parte do tempo e energia envolvida. Sem considerar o regime transiente, concluiu-se que a contribuição da energia solar para o processo de secagem foi de 10,5%, no caso do ensaio realizado em condições de inverno, e de 27,2%, para o caso do ensaio realizado em condições de verão.

ABSTRACT

Food waste is one of the world's biggest concerns. The demand for sustainable solutions has been increasing in recent years and the dehydration of food products using solar energy seems to be one of the most attractive options.

In the present work, several drying tests were carried out on different products in laboratory conditions and in real conditions.

In the laboratory, tests were carried out in a climatic chamber with two agro-food products, namely blueberries and raspberries, and with different temperature values (40, 50, 60 °C) and a relative humidity of 10%. The main objective of these tests was to find the ideal drying conditions. For this, chemical analyzes were carried out on the products, before and after drying, to compare the loss of properties during the process. From these tests, the conclusion was drawn that the tests at 40° C and 10% RH produced the best results in terms of the achieved moisture content and the quality of the final dry product.

Under real conditions, tests were carried out in an indirect and hybrid solar dryer, from the company Chatron, with various agro-food products, with only the tests with kale and apple pomace being analyzed. The main objective of these tests was to determine the contribution of solar energy to the drying process. To this end, an energy balance was developed for the dryer that took into account the energy flows of the incoming and outgoing air, the water transferred from the product to the air, electrical energy and thermal losses. These tests revealed that the applied balance is not suitable for the transient initial period of the process, but gives good results for the remainder, which corresponds to most of the time and energy involved. Without considering the transient regime, it was concluded that the contribution of solar energy to the drying process was 10.5%, in the case of the test carried out in winter conditions, and 27.2%, in the case of the test carried out in summer conditions.

PALAVRAS-CHAVE

Secagem agro-alimentar;
Conservação agro-alimentar;
Desperdício agro-alimentar;
Subprodutos;
Secador Solar;
Avaliação energética;
Energia solar;
Energia renovável;
Sustentabilidade.

KEYWORDS

Agro-food drying;
Agro-food conservation;
Agro-food waste;
By-products;
Solar dryer;
Energy assessment;
Solar energy;
Renewable energy;
Sustainability.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus orientadores, ao Professor Doutor Carlos Alberto Catorze Pereira e ao Professor Doutor Sérgio Miguel Gomes Lopes, pela total disponibilidade e apoio ao longo de todo o trabalho desenvolvido.

Ao Departamento de Ambiente do IPV pela disponibilidade nas análises físico-químicas feitas e pelos equipamentos fornecidos ao longo do período dos ensaios

Ao colega Pedro Cardão que esteve presente no Projeto I&D: Desidratador S2D e no projeto das Escolas de Verão do IPV, por colaborar comigo durante os diversos ensaios realizados em câmara climática e secador solar.

À minha família, em especial aos meus tios e à minha madrinha, pelo imenso apoio, pelo encorajamento, paciência e sabedoria que sempre me deram e que me permitiu concluir este projeto.

Aos meus amigos de licenciatura e mestrado, que me acompanharam e apoiaram ao longo da minha vida académica no IPV.

Por fim, a todas as pessoas que contribuíram diretamente e indiretamente para a realização deste projeto.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE tabelas	xvii
ABREVIATURAS E SIGLAS	xix
NOMENCLATURA.....	xxi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 A importância da secagem.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estrutura do trabalho.....	4
2. SISTEMAS DE SECAGEM	5
2.1 Secagem a temperatura elevada.....	5
2.1.1 Secagem a temperatura reduzida	6
2.2 Secagem a energia solar.....	7
2.2.1 Secagem solar passiva	8
2.2.2 Secagem solar ativa	9
2.2.3 Sistemas de secagem solar tipo distribuído	10
2.2.4 Sistemas de secagem solar tipo integral	11
2.2.5 Sistemas Mistos	13
3. ANÁLISE ENERGÉTICA DA SECAGEM	15
3.1 Balanço de energia ao secador.....	17
3.1.1 Energia que o ar transporta.....	20
3.1.2 Energia da água transferida para o ar	22
3.2 Água nos produtos	22
3.2.1 Teor de humidade	23
3.3 Transferência de calor.....	24
3.3.1 Convecção	25
3.3.2 Condução	25

3.3.3	Radiação.....	26
3.3.4	Perdas térmicas para o exterior	27
3.3.5	Radiação Solar	28
4.	DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL.....	31
4.1	Ensaio de secagem.....	31
4.1.1	Preparação das amostras	34
4.2	Secador Solar.....	35
4.3	Determinação da humidade inicial	42
5.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	45
5.1	Ensaio em Câmara climática.....	45
5.1.1	Curvas de secagem.....	45
5.1.2	Análises Químicas.....	47
5.2	Ensaio em Secador Solar	49
5.2.1	Ensaio com Bagaço de Maçã	50
5.2.2	Ensaio com Couve-Galega.....	54
5.2.3	Determinação do coeficiente global de transferência de calor	57
5.2.4	Análise energética dos ensaios.....	58
5.2.5	Contribuição da energia solar	61
6.	CONCLUSÃO	63
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	64
	Referências.....	66
	Apêndice A	72
	Apêndice B.....	74
	Apêndice C.....	75
	Apêndice D	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Designs de Secadores Solares (Ekechukwu & Norton, 1999).....	7
Figura 2 - Secador solar passivo distribuído típico (Ekechukwu & Norton, 1999)	10
Figura 3 - Secador solar ativo distribuído típico-(Ekechukwu & Norton, 1999)	11
Figura 4 - Sistema solar passivo direto típico (Ekechukwu & Norton, 1999).....	12
Figura 5 - Secador solar ativo direto típico (Ekechukwu & Norton, 1999)	12
Figura 6 - Secador solar passivo misto típico-(Ekechukwu & Norton, 1999).....	13
Figura 7 - Secador solar ativo misto típico (Ekechukwu & Norton, 1999).....	13
Figura 8 - Processo de transferência de calor e de massa num alimento.....	16
Figura 9 - Análise energética do volume de controlo.....	18
Figura 10 - Representação esquemática do circuito de resistências térmicas na parede do secador.....	27
Figura 11 - Incidência média diária de energia solar na região de Viseu, Portugal (Weatherspark.com, 2023)	28
Figura 12 - Câmaras climáticas utilizadas nos ensaios	32
Figura 13 - Cadinhos utilizados na pesagem	33
Figura 14 - Aparato para o ensaio de medição contínua do peso das amostras.	33
Figura 15 - Balanças de precisão utilizadas nos ensaios.	34
Figura 16 - Preparação das amostras	35
Figura 17 - Protótipo Secador Solar AVATAR 20.....	36
Figura 18 - Painel Solar do Secador	36
Figura 19 - Entrada de ar do secador e ventilador de insuflação.....	36
Figura 20 - Saída de ar do secador perspetiva interior e exterior	37
Figura 21 - Resistência e ventilador interior do secador	37
Figura 22 - Painel de controlo do secador	37
Figura 23 - Secador Solar Chatron Lda, modelo AVATAR 20 (800l).....	40
Figura 24 - Sensores utilizados nos ensaios	40
Figura 25 - Placas de aquisição utilizadas	40
Figura 26 - Balança de precisão utilizada nos ensaios, Balança PRECISA modelo 6200D	41
Figura 27 - Analisador de energia SHELLY EM utilizado nos ensaios.....	41
Figura 28 - Montagem ensaios secador solar	41
Figura 29 - Estufa Venticell VC55 utilizada nos ensaios.....	43
Figura 30 - Balança Sartorius BP 310P.....	43
Figura 31 – Exsicador utilizado.....	43
Figura 32 - Curvas de secagem de mirtilos a 10% de humidade relativa e 40, 50 e 60°C (Catorze et al., 2022).	46
Figura 33 - Curvas de secagem de framboesas a 10% de humidade relativa e 40, 50 e 60°C (Catorze et al., 2022).	46

Figura 34 - Evolução de Temperatura, Humidade e Massa no ensaio de secagem do Bagaço de Maçã.....	52
Figura 35 - Evolução de Radiação solar e Potência Média no ensaio de secagem de Bagaço de Maçã.....	53
Figura 36 - Evolução de Temperatura, Humidade e Massa no ensaio de secagem de Couve-Galega	55
Figura 37 - Evolução de Radiação solar e Potência Média no ensaio de secagem de Couve-Galega.	56
Figura 38 - Energia Elétrica e Ganhos Solares do Ensaio de Bagaço de Maçã.....	59
Figura 39 - Ganhos Solares e Energia Elétrica do Ensaio de Couve-Galega	61
Figura 40 - Pesos padrão	72
Figura 41 - Sistema de ligação de fonte de alimentação a secador solar.	74
Figura 46 - Sistema de calibração de Termopares	75
Figura 43 - Ensaio de determinação do caudal de ar	77

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros das curvas de secagem de mirtilos e framboesas	47
Tabela 2 - Variação dos parâmetros químicos dos produtos secos (base seca).....	48
Tabela 3 - Valores de $U \times A$ no ensaio de bagaço de maçã	58
Tabela 4 - Contributo da Energia Solar para a Secagem.....	62
Tabela 5 - Valores obtidos para diferentes pesos padrão	73
Tabela 6 - Resumo dos valores obtidos para pesos padrão	73

ABREVIATURAS E SIGLAS

IPV	Instituto Politécnico de Viseu
A.C	Antes de Cristo
ONU	Organização das Nações Unidas

NOMENCLATURA

Th	Teor de humidade	(g/g)
\dot{m}	Taxa de fluxo de massa	(kg/s)
m	massa	(kg)
A	Área	(m^2)
C	Concentração	(mol/m^3)
ω	Humidade absoluta	(g/g)
ϕ	Humidade relativa	(g/g)
P	Pressão	(kPa)
R	Constantes gases perfeitos	(kJ/kg.K)
T	Temperatura	(K)
V	Volume	(m^3)
Q	Calor	(J)
C_p	Calor específico	(kJ/kg.K)
k	Condutividade	(W/m.K)
ε	Emissividade	
σ	Constante Stefan-Boltzmann	(W/m^2k^4)
h	Entalpia	(kJ/kg)

1. INTRODUÇÃO

1.1 A importância da secagem

De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), o crescimento da população mundial para 9,7 mil milhões, previsto para 2050, é uma preocupação não só da União Europeia como das organizações mundiais principalmente no que se refere à necessidade de alimentos, ao aumento da fome em países menos desenvolvidos e ao excesso de alimentos e consequente desperdício em países mais desenvolvidos. Mesmo atualmente, apesar da produção de alimentos ser suficiente para suprimir as necessidades da população mundial, os problemas referidos anteriormente verificam-se de igual forma devido à desigual distribuição de alimentos.

Na Europa, em 2016, estimava-se um desperdício alimentar de 88 milhões de toneladas anuais sendo que cerca de metade deste desperdício era da responsabilidade das famílias. Este valor equivalia a um desperdício anual de 173 kg de alimentos por pessoa (Stenmarck et al., 2016). Nos Estados Unidos da América o desperdício de comida representava 15% dos resíduos sólidos urbanos (Thyberg & Tonjes, 2016). Este desperdício reflete uma enorme perda económica e de recursos.

Em países asiáticos, tais como a Índia, em certas estações do ano, existe uma produção excessiva de alimentos, o que causa uma maior oferta do que a procura, levando a uma diminuição de preços e desperdício de alimentos. Por sua vez, noutras estações, acontece o contrário, em que a produção não suprime a procura e os preços dos produtos sobem de forma exponencial. A preservação de alimentos entre estações reduz o desperdício de produtos alimentares, provocando assim um impacto económico e ambiental positivo (Nukulwar & Tungikar, 2021).

INTRODUÇÃO

Uma das soluções apontadas como fundamental para preservar produtos alimentares e assim combater o seu desperdício é a desidratação de alimentos através do processo de secagem (Gaspar et al., 2017; Thyberg & Tonjes, 2016). O uso da secagem para a conservação de vegetais como forma de melhorar a sua preservação e armazenamento já vem a ser usada à séculos. A primeira instalação foi encontrada no Sul de França em 8000 A.C. A secagem de carne e peixe já é usada desde 2000 A.C.

A utilização da secagem para a preservação de alimentos possui diversas vantagens, nomeadamente: inibe o crescimento de microrganismos e evita modificações enzimáticas, reduzindo degradação dos alimentos; os alimentos secos têm a capacidade de ser armazenados durante um período alargado sem que ocorra a perda dos seus nutrientes, o mesmo não acontecendo com os alimentos frescos, e não necessitam de sistemas de refrigeração para a sua preservação, reduzindo assim o custo de equipamentos auxiliares e de energia; por outro lado, a secagem de certos alimentos frutícolas e hortícolas, tais como, espinafres, mirtilos, alface, causa uma diminuição significativa no seu volume o que facilita o seu armazenamento e diminui custos de transporte.

Outra grande vantagem é a possibilidade da diversificação e desenvolvimentos de novos alimentos, permitindo satisfazer as necessidades do mercado de consumo de alimentos desidratados (Guiné & Barroca, 2017). Isto pode-se verificar pelo mercado para frutas secas que tem vindo a crescer e que se prevê que continue o seu crescimento. Um exemplo são os frutos vermelhos, como mirtilos e framboesas, que têm vindo a adquirir uma elevada importância na agricultura portuguesa devido a propriedades organoléticas e medicinais. Podem ser plantados em regiões especiais como Algarve e Alentejo devido às condições climáticas aí verificadas (Chen & Martynenko, 2013).

No entanto, como todos os processos a secagem também possui diversas desvantagens, uma delas é a energia consumida no processo, pois apesar da secagem ser uma das operações mais antigas e mais comuns, é também das mais intensivas em termos de consumo energético (Islam et al., 2021). É extremamente relevante em diversas indústrias, tais como a agrícola, cerâmica, química, alimentar, biotecnológica, polimérica, farmacêutica, mineral, têxtil, entre outras (Erbay & Icier, 2010; Mujumdar & Devahastin, 2000)

Numa grande parte dos países mais desenvolvidos, a secagem representa cerca de 10 a 20% da energia industrial total utilizada (Mujumdar, 2012). Estima-se que nos Estados Unidos da América a despesa de capital para secadores seja na ordem dos 800 milhões de dólares

anuais. Grande parte deste valor provêm do custo da energia e não do investimento inicial em equipamento (Mujumdar & Devahastin, 2000). É possível diminuir esta despesa utilizando a energia solar, sendo esta uma fonte de energia renovável.

A energia solar pode ser utilizada de forma direta, ou de forma indireta, como a única fonte energética ou como uma fonte energética complementar.

O uso mais comum de energia solar de forma direta na secagem é a secagem a céu aberto. Apesar disso, não é uma solução fiável em grande parte das regiões devido às suas numerosas limitações, nomeadamente a redução de qualidade dos produtos resultado da influência do vento, animais, elevada humidade noturna ou presença de poeiras. Os secadores a céu aberto requerem um clima quente e seco para que o produto possa ser seco e em seguida rapidamente armazenado, logo o interesse neste método tem vindo a aumentar apenas nessas regiões (Ekechukwu & Norton, 1997, 1999; Nukulwar & Tungikar, 2021).

A secagem com recurso a energia solar de forma indireta utiliza ar previamente aquecido para retirar humidade ao produto. O ar de secagem pode circular de forma natural ou de forma forçada através da utilização de ventiladores (Ekechukwu & Norton, 1999). A utilização indireta de energia solar resolve algumas dos problemas da secagem com secadores convencionais, no entanto, ainda não foi amplamente utilizada, principalmente devido à sua baixa capacidade de produção e à disponibilidade intermitente do recurso solar (Belessiotis & Delyannis, 2011; Guiné & Barroca, 2017; Nukulwar & Tungikar, 2021)

1.2 Objetivos

Apesar de existirem números trabalhos com os mesmos objetivos, o estudo do processo de secagem para diferentes produtos utilizando diferentes métodos e fontes de energia é essencial para aprofundar, desenvolver e melhorar o processo de secagem.

Assim, o presente trabalho tem como objetivos principais: 1) encontrar as condições de secagem ideais para obter o produto final pretendido; 2) avaliar a contribuição da energia solar para o processo de secagem num secador industrial.

Pretende-se alcançar estes objetivos através do estudo da realização de ensaios de secagem em condições laboratoriais controladas e através da realização da desidratação de produtos e subprodutos agrícolas com recurso a energia solar utilizando um secador solar industrial.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho encontra-se estruturado num conjunto de 6 capítulos. O presente capítulo apresenta o enquadramento do trabalho, a sua atualidade e pertinência, os principais objetivos e uma descrição da estrutura da dissertação.

No capítulo 2 apresentam-se os diferentes tipos de sistemas de secagem para os diferentes métodos e diferentes fontes de energia. No capítulo 3 realiza-se uma análise energética ao secador e introduzem-se os conceitos envolvidos na análise energética do processo de secagem. No capítulo 4 descrevem-se os diversos ensaios de secagem realizados em diferentes dispositivos e em diferentes condições. No capítulo 5 apresentam-se e analisam-se os dados obtidos dos ensaios de secagem realizados e os resultados obtidos da análise energética aos ensaios. No capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões alcançadas sobre os objetivos definidos e sugestões para trabalhos futuros. Por fim, são apresentados em apêndices a descrição de alguns procedimentos em detalhe.

2. SISTEMAS DE SECAGEM

Os sistemas de secagem são classificados de acordo com o seu intervalo de temperaturas, nomeadamente secadores de elevada e de reduzida temperatura (Ekechukwu & Norton, 1999), mas também de acordo com a fonte de energia utilizada, nomeadamente secadores que utilizam combustíveis fósseis (secadores convencionais) e secadores que utilizam energia solar (Chojnacka et al., 2021).

2.1 Secagem a temperatura elevada

A secagem a temperatura elevada é normalmente utilizada para processos de secagem rápida, sendo que o produto é desidratado até ao teor de humidade requerido e depois arrefecido. Devido às elevadas temperaturas a que estes operam, a grande maioria dos secadores a temperaturas elevadas utilizam combustíveis fósseis ou eletricidade (Ekechukwu & Norton, 1999).

Os secadores a temperaturas elevadas são habitualmente utilizados em contexto industrial e podem ser divididos em 3 tipos: diretos, indiretos e secadores que utilizam outras fontes de energia (Chojnacka et al., 2021).

Os secadores diretos transferem energia para o material por convecção, possuindo uma elevada eficiência de transferência de calor, no entanto os seus custos de operação também são elevados. Alguns exemplos são os secadores de leito fluidizado, secadores pneumáticos, secadores de tambores rotativos (Chojnacka et al., 2021).

Os secadores indiretos transferem energia para o material por condução normalmente através de uma parede aquecida por vapor, água quente ou eletricidade. Estes secadores previnem o risco de contaminação e por isso são utilizados para secar produtos sensíveis, tais como produtos farmacêuticos e materiais inflamáveis. Alguns exemplos de secadores indiretos são os secadores de tambor e secadores de correia (Chojnacka et al., 2021).

Os secadores que utilizam outras fontes de energia são utilizados na tentativa de maximizar o processo de secagem. Alguns exemplos deste tipo de secadores são os secadores de radiação que utilizam infravermelhos ou radiação ultravioleta, os secadores dielétricos que utilizam campo elétricos de alta frequência e os secadores acústicos que utilizam ultrassons (Chojnacka et al., 2021).

A nível industrial os secadores podem operar em dois modos distintos: em lote e em fluxo contínuo (Ekechukwu & Norton, 1999).

Nos secadores em lote, uma quantidade fixa de produto, é colocada dentro do secador, sendo que esta quantidade depende da capacidade do secador. O produto depois de seco é retirado e um novo lote entra novamente no secador. Estes tipos de secadores possuem um baixo volume de produção.

Nos secadores em fluxo contínuo, é mantido um fluxo contínuo de produto ao longo da sua operação. O material é continuamente movimentado e seco ao longo do secador. Os produtos secos podem depois ser recolhidos num depósito ou movimentados diretamente para a próxima operação. Estes secadores são utilizados sempre que existe grandes volumes de produto a secar.

Para demonstrar o uso prático e as vantagens de um secador de elevadas temperaturas Wiset et al. (2001) estudaram a secagem de arroz a dois estágios. O primeiro estágio consistia numa secagem a uma temperatura de 150°C até que o produto atingisse um teor de humidade de 18%. O segundo estágio consistia numa secagem, à temperatura ambiente, até que o produto atingisse um teor de humidade de 14%, valor este adequado para a armazenagem ou moagem do arroz. Este processo em dois estágios permitia uma elevada capacidade de secagem no primeiro estágio a temperatura elevada e um baixo consumo de energia no segundo estágio.

2.1.1 Secagem a temperatura reduzida

Na secagem a temperatura reduzida, o teor de humidade de equilíbrio é normalmente atingido através da ventilação permanente do ar de secagem a uma temperatura reduzida sobre os produtos a secar. É um processo adequado para a secagem de grandes volumes de produto. Os seus secadores são capazes de operar com um fornecimento de calor de forma intermitente e por isso ideais para aplicações a energia solar. Uma parte significativa dos projetos que

envolvem secadores de baixa temperatura são secadores solares havendo algumas exceções na utilização de secadores convencionais (Ekechukwu & Norton, 1999).

Ayensu, (1997) construiu e testou um secador de baixa temperatura, baixo custo, compacto e fácil de operar. De acordo com o estudo, o coletor solar instalado era capaz de transferir $118W / m^2$, sendo que com esta potência o secador tinha capacidade de aquecer o ar ambiente de $32^{\circ}C$ e 80% de humidade relativa do ar para $45^{\circ}C$ e 40% de humidade relativa do ar. O secador produziu resultados satisfatórios tendo permitido desidratar o produto abaixo dos 14% de teor de humidade e o cultivo seco foi preservado durante 1 ano sem deterioração.

2.2 Secagem a energia solar

A secagem que utiliza energia solar pode ser classificada de acordo com a forma de aquecimento e a forma como a energia é utilizada. De uma forma geral, pode ser dividida em dois grupos: secagem solar ativa e passiva. Os secadores que se enquadram em uma destas categorias podem ser representados em uma de 3 subclasses: secadores tipo integrais (diretos), distribuídos (indiretos) e mistos (Ekechukwu & Norton, 1999).

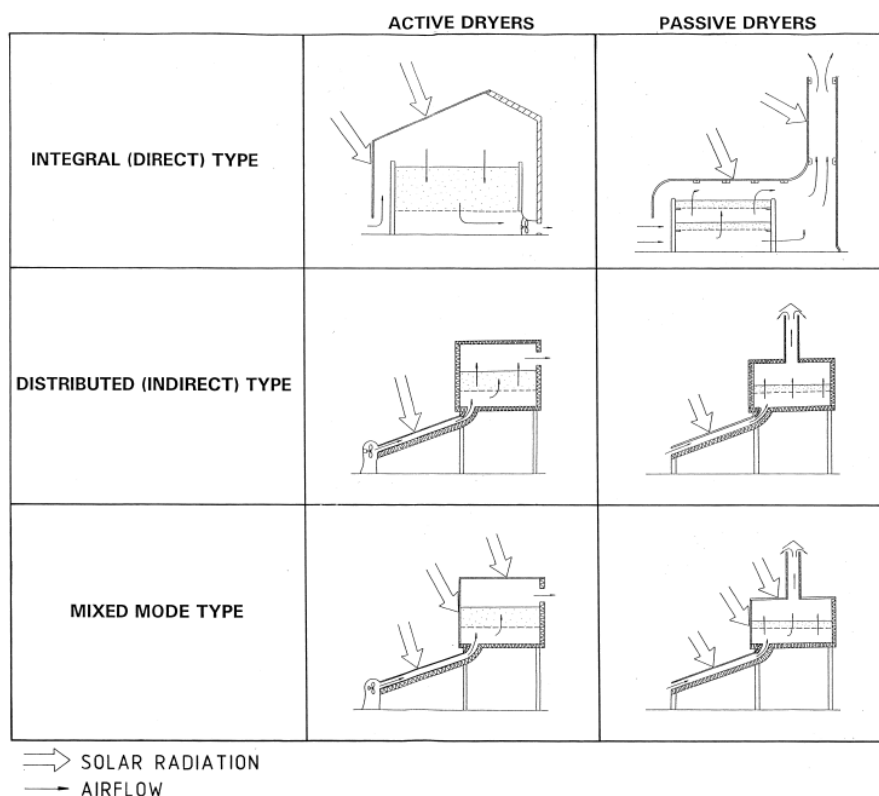


Figura 1 - Designs de Secadores Solares (Ekechukwu & Norton, 1999)

2.2.1 Secagem solar passiva

2.2.1.1 Secagem natural a céu aberto

A secagem natural a céu aberto, apesar de rudimentar, é ainda muito usada, particularmente em países em desenvolvimento (Ekechukwu & Norton, 1997, 1999). Existem dois processos tradicionais que utilizam a secagem a céu aberto. No primeiro processo, os produtos são deixados a secar no local onde foram obtidos, quer estejam em contacto com o solo ou não. No segundo processo, os produtos recolhidos são expostos diretamente à radiação solar, podendo ser espalhados no solo, em piso cimentado, em tapetes ou colocados em prateleiras horizontais ou verticais. Os produtos são virados, ocasionalmente, de forma a expor diferentes partes do produto ao sol, acelerando desta forma o processo de secagem, tornando, no entanto, o processo mais manual (Ekechukwu & Norton, 1997, 1999).

Como já foi mencionado anteriormente este método de secagem possui alguns aspetos positivos, mas algumas limitações. Os aspetos positivos consistem no baixo custo de instalação e baixo custo operacional. Relativamente aos aspetos negativos, pode verificar-se perda de produtos ou a redução da sua qualidade devido a:

- Secagem inadequada durante o período noturno;
- Infestação de insetos e fungos;
- Atividade de pássaros e roedores;
- Efeitos meteorológicos;
- Mudança de cor indesejada do produto;

Mesmo com todas as limitações identificadas, uma grande parte do fornecimento mundial de frutos e vegetais secos, provêm da secagem a céu aberto (Ekechukwu & Norton, 1997, 1999).

2.2.1.2 Secadores solares de circulação natural

Na secagem solar passiva, os secadores solares, também denominados por secadores solares de circulação natural, são sistemas que dependem inteiramente de energia solar. Nestes secadores, o ar de secagem aquecido por radiação solar, circula dentro do sistema devido a forças de impulsão, pressão do vento ou uma combinação de ambas. Os secadores são

denominados como passivos de forma a distinguir daqueles que utilizam ventiladores para forçar a circulação de ar. Ekechukwu & Norton (1997, 1999) identificam alguns aspetos positivos relativamente a estes secadores, nomeadamente:

- A área requerida é diminuta, enquanto o método de secagem a céu aberto exige terrenos extensos para espalhar os produtos para a secagem, os secadores passivos apenas necessitam uma área reduzida para secar a mesma quantidade;
- A quantidade e a qualidade do produto após a secagem é superior aos produtos obtidos por secagem a céu aberto;
- Existe uma menor probabilidade de infestação de insetos, fungos e roedores;
- Existe um maior rendimento, pois os períodos de secagem são inferiores à secagem a céu aberto;
- As utilizações de coberturas, muitas vezes em vidro, proporcionam proteção contra condições meteorológicas desfavoráveis.

2.2.2 Secagem solar ativa

Ao contrário dos secadores solares passivos, os ativos dependem parcialmente de energia solar. Estes sistemas utilizam bombas e ventiladores para provocarem a circulação de ar, sendo que desta forma, a transferência de calor e consequente secagem ocorre por convecção forçada.

A fonte de energia utilizada para aquecer e fazer circular o ar de secagem poderá ser energia solar isoladamente ou combinada com a utilização de eletricidade ou de combustíveis fósseis, sendo que estes sistemas são mais conhecidos como secadores solares híbridos.

Se o ar aquecido por radiação solar estiver à temperatura necessária, este pode ser usado diretamente para o processo de secagem, sendo que a eletricidade ou os combustíveis fósseis apenas serão necessários em períodos de ausência parcial ou total de sol.

Como, habitualmente, o uso de energia solar é insuficiente para secadores industriais, opta-se normalmente por utilizar a energia solar como fonte complementar para sistemas alimentados maioritariamente a combustíveis fósseis. A utilização da energia solar diminui o consumo de energia mas mantém o controlo das condições de secagem (Ekechukwu & Norton, 1999; Koyuncu, 2006). Em secadores de menor capacidade a energia solar é mais uma vez

utilizada como fonte complementar para sistemas alimentados a maioritariamente a eletricidade.

2.2.3 Sistemas de secagem solar tipo distribuído

Em sistemas de secagem solar tipo distribuído o produto é colocado em prateleiras dentro de uma câmara e secado pelo ar circulante, que terá sido aquecido por um coletor solar. A energia solar não incide diretamente no produto pelo que se torna mais fácil obter uma secagem uniforme do produto. São sistemas ideais para produtos perecíveis em que a exposição direta ao sol provoca uma perda de nutrientes e vitaminas e uma alteração indesejada da sua cor. Possuem uma temperatura de operação superior às suas contrapartes e produzem produtos de maior qualidade. Apesar disso, carregam algumas limitações. É difícil controlar a temperatura com que o ar sai do coletor solar, destabilizando o processo de secagem dentro da câmara. Um secador solar passivo indireto típico possui três componentes fundamentais: um coletor solar, uma câmara de secagem e isolamento apropriado. Dependendo se o secador é passivo ou ativo, também terá uma chaminé ou ventiladores respetivamente (Ekechukwu & Norton, 1999).

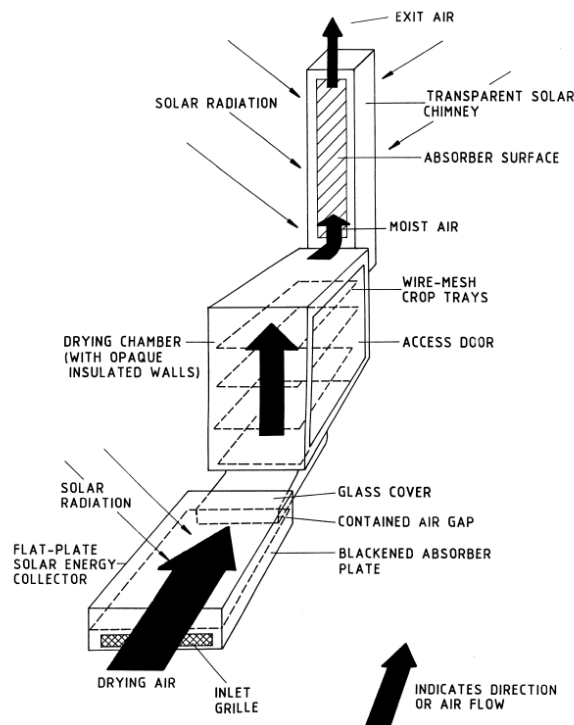


Figura 2 - Secador solar passivo distribuído típico (Ekechukwu & Norton, 1999)

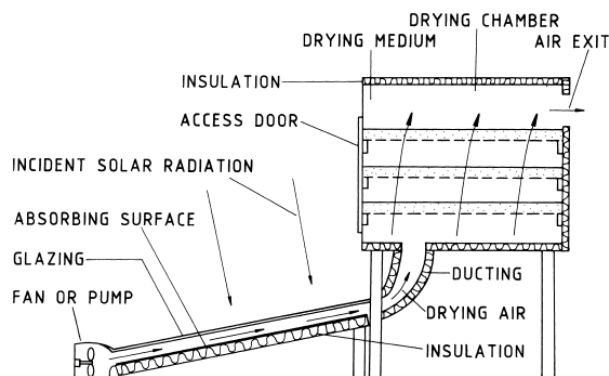


Figura 3 - Secador solar ativo distribuído típico-(Ekechukwu & Norton, 1999)

Para o sistema de secagem solar passivo indireto grande parte das modificações realizadas ao modelo típico provêm de dois componentes: absorvedores equipados com armazenamento térmico e aquecedores de ar solares. Para o sistema de secagem solar ativo indireto grande parte dos exemplos possuem uma estrutura semelhante ao modelo típico. Onde existem modificações é nas seguintes funcionalidades: coletor solar, recirculação do ar e localização dos ventiladores e bombas (Ekechukwu & Norton, 1999).

2.2.4 Sistemas de secagem solar tipo integral

Em sistemas de secagem solar tipo integral o produto é colocado em câmaras de paredes transparentes onde a radiação solar atinge o produto diretamente. A energia transmitida para dentro da câmara causa um aumento da temperatura que por consequência provoca a extração da humidade do produto e a expansão do ar de secagem gerando a sua circulação. Com este movimento o ar sai da câmara levando consigo a humidade do produto. A exposição da colheita a radiação solar é muitas vezes essencial para desenvolvimento da cor do produto como é o caso das uvas e tâmaras (Ekechukwu & Norton, 1999).

Sistemas diretos são mais económicos que sistemas indiretos para a mesma capacidade pois a sua construção não envolve estruturas complexas como coletores de aquecimento de ar. No entanto a velocidade de remoção do ar húmido de secagem é lenta o que limita a taxa máxima de secagem possível. De forma a contornar este problema pode ser adicionada uma chaminé solar ou ventilador, aumentando a força de impulsão e melhorando a velocidade do fluxo de ar. Na seguinte figura estão apresentados sistemas diretos genéricos (Ekechukwu & Norton, 1999):

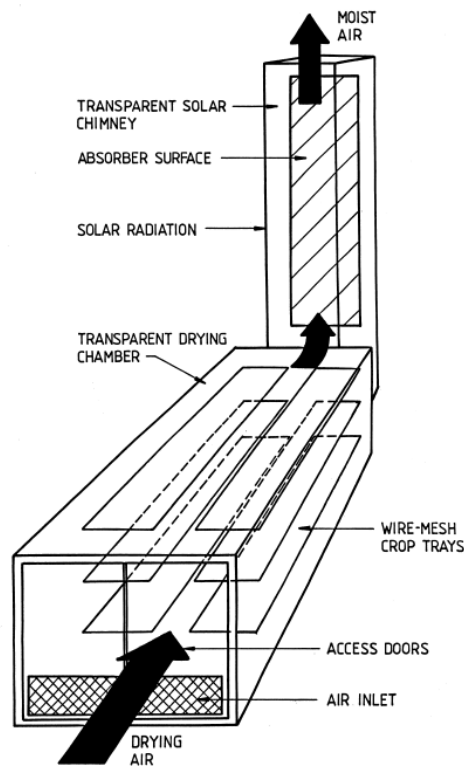


Figura 4 - Sistema solar passivo direto típico (Ekechukwu & Norton, 1999)

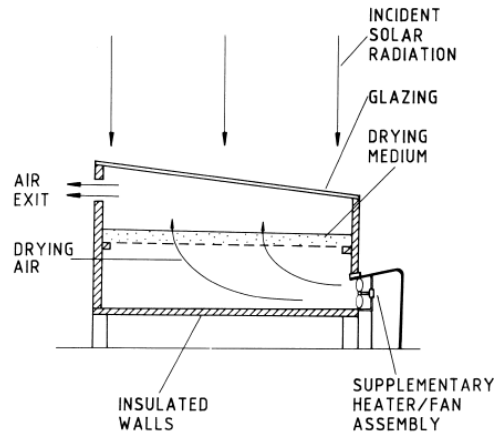


Figura 5 - Secador solar ativo direto típico (Ekechukwu & Norton, 1999)

Para o sistema de secagem solar passivo direto temos dois exemplos: secador solar passivo de cabine e secador de estufa de circulação natural. Para o sistema de secagem solar ativo direto é possível identificar 3 exemplos: secador de absorção direta, coletor solar de parede/teto e secador de estufa com câmara de absorção interna (Ekechukwu & Norton, 1999).

2.2.5 Sistemas Mistos

Como o nome indica estes secadores combinam as características do sistema direto e indireto. A secagem ocorre com a incidência direta da radiação solar na colheita em conjunto com o ar pré-aquecido também através da radiação solar. Um sistema misto típico possui todos os elementos de um secador solar tipo distribuído, coletor solar, câmara de secagem, isolamento e chaminé ou ventilador, no entanto as paredes da câmara são envidraçadas de forma a permitir a incidência da radiação solar no produto tal como no secador solar tipo integral (Ekechukwu & Norton, 1999).

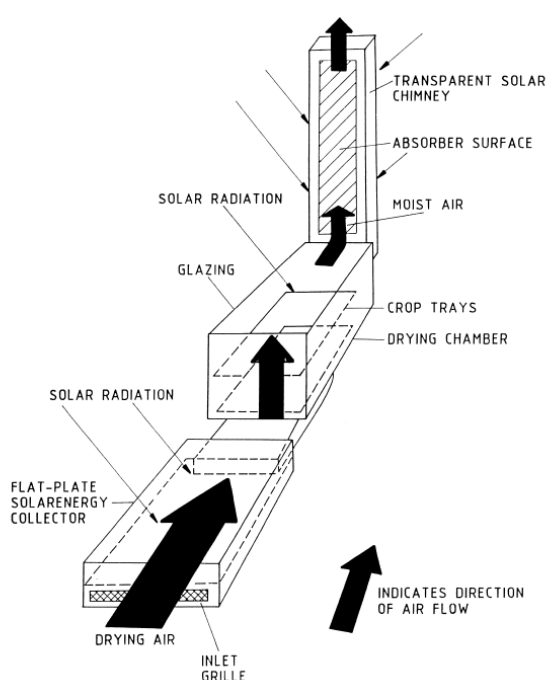


Figura 6 - Secador solar passivo misto típico-(Ekechukwu & Norton, 1999)

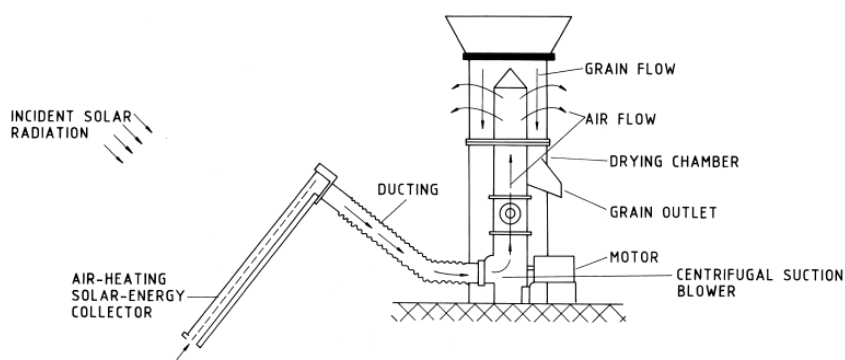


Figura 7 - Secador solar ativo misto típico (Ekechukwu & Norton, 1999)

3. ANÁLISE ENERGÉTICA DA SECAGEM

A desidratação de produtos alimentares pode ser realizada por diferentes métodos, nomeadamente: secagem, liofilização, desidratação mecânica, entre outros.

A secagem é um processo complexo que envolve a transferência de energia sob a forma de calor e de massa em regime transiente, e que, em conjunto com outros processos físicos e químicos, pode causar alterações na qualidade do material, nomeadamente a sua contração, expansão, cristalização, mudança de cor, mudança de textura, mudança de odor, entre outros (Mujumdar & Devahastin, 2000).

A secagem é também uma operação em que ocorre a conversão de uma matéria-prima num estado sólido, semissólido ou líquido num produto final sólido com um teor de humidade significativamente mais baixo conseguido através da evaporação do líquido (normalmente água) para uma fase de vapor através da aplicação de calor (Erbay & Icier, 2010). Existem exceções como secagem por congelamento em que vapor de água é formado por sublimação de gelo quando levado abaixo do ponto triplo, ponto este onde as três fases (líquido, sólido e gasoso) se encontram em equilíbrio termodinâmico. Existem ainda outros métodos de desidratação que envolvem transferência de calor e que são mais parecidos com a destilação, tal como a desidratação azeotrópica (Erbay & Icier, 2010; Keey, 1972).

Existem diversos fatores que condicionam o processo de secagem, nomeadamente: a forma do material a secar, a sua porosidade, a sua condutibilidade, a temperatura e humidade relativa do ar, o tempo de secagem necessário para obter o teor de humidade pretendido, a qualidade do produto final exigida, entre outros (Mujumdar & Devahastin, 2000).

A transferência de calor no processo de secagem pode ocorrer de várias formas, sendo que as mais comuns utilizam os fenómenos de transferência de calor por convecção (seja esta natural ou forçada), condução e radiação. Existem, no entanto, outras menos comuns, mas

também viáveis, tais como a utilização de micro-ondas ou ondas de rádio. Estes mecanismos podem atuar isoladamente, em conjunto ou podem alternar ao longo do processo de secagem (Mujumdar & Devahastin, 2000). No presente trabalho, a convecção forçada entre o ar de secagem e os produtos foi o principal mecanismo de transferência de calor envolvido.

Em termos de transferência de massa, pode ocorrer pelo mecanismo da difusão molecular e/ou da convecção.

Numa fase inicial a água é evaporada da superfície do material para o ar de secagem devido à diferença da pressão de vapor entre o vapor de água no ar e o vapor de água à superfície do material. À medida que o teor de humidade à superfície do material diminui ocorre difusão da água, ou seja a sua movimentação, do centro do material para a sua superfície (Md. Raisul Islam et al., 2021). Esta difusão molecular é promovida pela diferença de concentrações de água entre o interior do produto e a sua superfície, sendo a sua velocidade dependente da viscosidade da água, temperatura, do tamanho e forma do material, entre outras. A água proveniente do centro do produto, ao chegar à superfície, sofre novamente o processo de evaporação devido à diferença da pressão de vapor entre o vapor de água no ar e o vapor de água à superfície do material. Este processo ocorre até que a pressão do vapor de água no ar e a pressão do vapor de água à superfície do material fiquem equilibradas. A figura seguinte apresenta um esquema do processo mencionado.

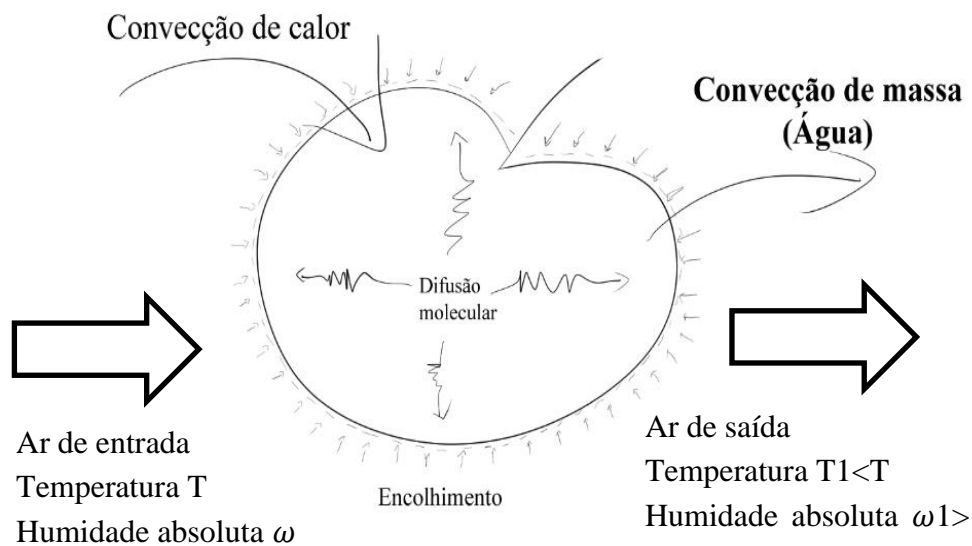


Figura 8 - Processo de transferência de calor e de massa num alimento

A transferência de massa por difusão molecular pode ser expressa pela seguinte expressão:

$$\dot{m}_{dif} = -DA \frac{\partial C}{\partial x} \quad [kg/s] \quad (1)$$

Em que D é o coeficiente de difusão, A é a área da seção transversal e $\frac{\partial C}{\partial x}$ é o gradiente de concentração.

A transferência de massa por convecção pode ser expressa pela seguinte expressão:

$$\dot{m}_{conv} = h_{massa} A_s (\rho_{\acute{a}gua,s} - \rho_{\acute{a}gua,\infty}) \quad [kg/s] \quad (2)$$

Em que h_{massa} é o coeficiente de transferência de massa, A_s é a área da superfície do produto e $\rho_{\acute{a}gua,s} - \rho_{\acute{a}gua,\infty}$ é a diferença de concentração mássica entre a superfície e o fluido, que neste caso é o ar de secagem.

3.1 Balanço de energia ao secador

O objetivo principal deste trabalho foi a determinação da contribuição da energia solar para o processo de secagem. Para isso, analisou-se o sistema que é composto por um espaço (secador), uma entrada e saída de ar, um painel solar, uma resistência, e ventiladores que promovem a circulação de ar como se representa esquematicamente na figura 9.

A análise termodinâmica ao secador pode ser feita analisando o volume de controle representado pela linha tracejada a vermelho. Assim, optou-se por fazer o balanço de energia ao ar que circula no secador deixando de fora tudo o que é sólido.

Aplicando a primeira lei da termodinâmica a este sistema verificamos que o balanço de energia pode ser resumido pela seguinte expressão matemática (Çengel et al., 2019):

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} = \Delta \dot{E}_{sis} \quad [W] \quad (3)$$

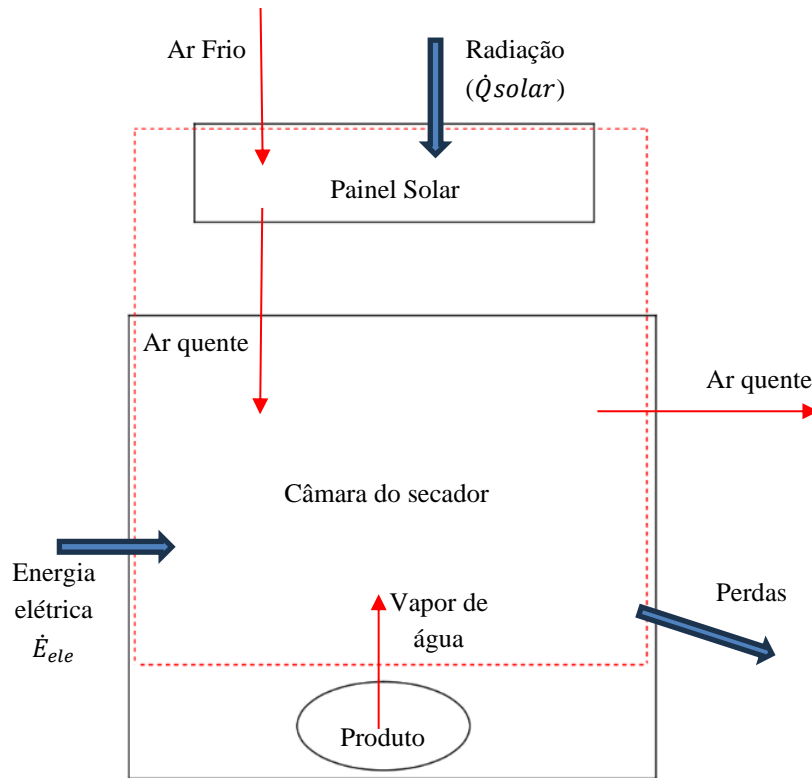


Figura 9 - Análise energética do volume de controle

Durante o funcionamento, este sistema, o secador com todas as suas paredes e sólidos, encontra-se em regime transiente porque as propriedades vão variando ao longo do tempo. A massa de água diminui, a temperatura do ar exterior e a radiação incidente nos painéis varia consoante o dia e hora, entre outras condições externas. A análise em regime transiente é bastante complexa devido a todos os fatores que a influenciam, pelo que se escolheu excluir o produto a secar do volume de controle, bem como todos os materiais que constituem o secador, ficando o volume de controle constituído apenas pelo ar que circula no seu interior. Deste modo, se o processo for discretizado em intervalos de tempo relativamente pequenos e se se assumir que em cada um desses intervalos de tempo o sistema se encontra em regime permanente, o balanço de energia toma a seguinte forma:

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} = 0 \quad [W] \quad (4)$$

Olhando agora para cada uma destas variáveis pode-se detalhar o que constitui cada uma delas. Em relação à energia que entra (\dot{E}_{ent}) no volume de controle foi possível identificar as seguintes parcelas que a compõe:

- Energia elétrica (\dot{E}_{ele}) fornecida à resistência elétrica, ao ventilador de insuflação do ar exterior, ao ventilador interior que promove a circulação de ar dentro do secador e ao painel de controlo;
- Energia solar (\dot{Q}_{solar}), coletada pelos painéis solares e transferida para o ar de entrada;
- Energia transportada pela massa ($\dot{E}_{ar\ ent}$) de ar atmosférico que entra no secador;
- Energia da água ($\dot{E}_{água}$) que é transferida do produto para o ar de secagem;

Assim, a energia que entra para o volume de controlo pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{ele} + \dot{E}_{ar\ ent} + \dot{E}_{água} + \dot{Q}_{solar} \quad [W] \quad (5)$$

Em relação à energia que sai do volume de controlo, foi possível identificar as seguintes parcelas que a compõe:

- Perdas térmicas (\dot{Q}_{perdas}) do sistema para o exterior. Isto ocorre através de transferência de calor por convecção do ar de secagem para as superfícies interiores, seguido de transferência de calor por condução da superfície interior para a exterior e, finalmente, transferência de calor por convecção e radiação da superfície exterior para o ar ambiente e superfícies vizinhas;
- Energia que a massa de ar de secagem transporta ($\dot{E}_{ar\ sai}$) quando sai para o exterior.

Assim, a energia que sai do volume de controlo pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$\dot{E}_{sai} = \dot{Q}_{perdas} + \dot{E}_{ar\ sai} \quad [W] \quad (6)$$

Nos pontos seguintes vamos abordar cada uma destas parcelas do balanço de energia.

3.1.1 Energia que o ar transporta

O ar que entra no secador é ar atmosférico e este, de uma forma macroscópica, pode ser considerado como uma mistura gasosa composta por ar seco e vapor de água, sendo a sua pressão total igual à soma das pressões parciais dos seus componentes.

$$P_{atm} = P_{ar\ seco} + P_{vapor} \quad [kPa] \quad (7)$$

O ar que não contenha vapor de água é denominado de ar seco. A composição do ar seco tende a permanecer mais ou menos constante, no entanto a quantidade de vapor de água tende a variar em resultado da condensação e evaporação que ocorre na natureza (Çengel et al., 2019). A quantidade de água presente no ar de pode ser quantificada, quer pela humidade absoluta (ω), quer pela humidade relativa (ϕ). A humidade absoluta, como o próprio nome indica, representa o valor absoluto de água presente por kg de massa de ar seco, sendo por isso possível defini-lo matematicamente da seguinte forma:

$$\omega = \frac{m_{\acute{a}gua}}{m_{ar\ seco}} \quad [kg_{\acute{a}gua}/kg_{ar\ seco}] \quad (8)$$

Pela lei dos gases ideais podemos reescrever esta expressão da seguinte forma:

$$\omega = \frac{P_v V / R_v T}{P_a V / R_a T} = \frac{0,622 P_v}{P - P_v} \quad [kg_{\acute{a}gua}/kg_{ar\ seco}] \quad (9)$$

Em que P_v é a pressão parcial de vapor que o ar contém, P é a pressão total do ar atmosférico, V é o volume da mistura gasosa de ar e vapor, R são as constantes particulares de cada um dos gases, sendo os índices a e v respeitantes ao ar seco e ao vapor de água respetivamente, e T é a temperatura do ar.

Em relação à humidade relativa, esta pode ser definida por uma comparação entre a massa de vapor que o ar contém e o valor máximo de massa de vapor que o ar pode conter à temperatura que se encontra, ou seja, quando o ar se encontra saturado.

$$\phi = \frac{m_v}{m_{v\ sat}} \quad [-] \quad (10)$$

O ar encontra-se saturado quando a pressão parcial de vapor que ele tem for igual à pressão de saturação do vapor de água (P_g) à temperatura a que o ar se encontra.

Mais uma vez, utilizando a lei dos gases ideais podemos reescrever esta expressão:

$$\phi = \frac{P_v V / R_v T}{P_g V / R_v T} = \frac{P_v}{P_g} \quad [-] \quad (11)$$

Como a pressão parcial de vapor é proporcional à temperatura, então, podemos concluir que quanto maior for a temperatura do ar menor será o valor da sua humidade relativa, o que significa que o ar ganha maior capacidade de absorver vapor de água à medida que a temperatura aumenta. Com isto podemos concluir que na secagem um aumento da temperatura do ar de secagem aumenta a sua capacidade de absorver a humidade proveniente do produto, facilitando a transferência de massa.

Como foi mencionado atrás o ar atmosférico é composto por uma mistura de ar seco e vapor de água, o que significa que a energia do ar atmosférico será a soma das energias desses dois componentes. Tendo em conta que a energia de um escoamento de ar é avaliada pela sua entalpia temos a seguinte expressão:

$$H_{ar\ atm} = H_a + H_v \quad [kJ] \quad (12)$$

$$H_{ar\ atm} = \dot{m}_a h_a + \dot{m}_v h_v \quad [kJ] \quad (13)$$

Em que H se refere à entalpia. Dividindo toda a expressão pela massa de ar seco, obtemos o seguinte:

$$h_{ar\ atm} = h_a + \omega h_v \quad [kJ/kg] \quad (14)$$

De acordo com Çengel et al. (2019), a entalpia do ar seco pode ser calculada por $c_p * T$, em que c_p é o calor específico do ar, e a entalpia do vapor que o ar transporta (h_v) é igual à entalpia do vapor saturado (h_g) à temperatura a que o ar se encontra:

$$h_{ar\ atm} = c_p T + \omega h_g \quad [kJ/kg] \quad (15)$$

3.1.2 Energia da água transferida para o ar

A água contida no produto vai ser transferida para o ar sempre sobre a forma de vapor e a energia desse vapor transferido para o ar, naturalmente, corresponde à sua entalpia.

A energia do vapor é calculada utilizando a massa de vapor transferida (\dot{m}_v) e a entalpia do vapor, que corresponde à entalpia do vapor saturado à mesma temperatura a que o ar se encontra.

$$\dot{E}_{\acute{a}gua} = \dot{m}_v h_g \quad [W] \quad (16)$$

A massa de vapor que é transferida para o ar pode ser calculada avaliando a diferença entre a massa de vapor que o ar transporta à saída e a massa de vapor que o ar transporta à entrada. Essa diferença de massas de vapor pode ser calculada pela diferença de humidades absolutas.

$$\dot{m}_g = \dot{m}_a (\omega_{sai} - \omega_{ent}) \quad [kg/s] \quad (17)$$

3.2 Água nos produtos

A água é um componente extremamente importante nos produtos pois tem impacto na sua qualidade, tempo de vida, estabilidade microbiológica, processamento e propriedades texturais (Isengard, 1995; Levine & Slade, 1991). Os produtos com um maior teor de água estão mais suscetíveis a uma rápida deterioração devido a mudanças biológicas e químicas (Troller, 2014). Segundo Ruan & Chen (1998) os produtos são frescos e perecíveis devido à água. A quantidade de água nos produtos determina o seu valor nutritivo e sabor (Boisrobert, 2010). Os produtores mantêm o teor de humidade natural para preservar a qualidade, no entanto, para

aumentar o tempo de vida, tendem a reduzir o teor de humidade no produto (Ruan & Chen, 1998).

Para estudar a estabilidade de um produto alimentar é necessário a análise de vários componentes importantes, tais como, teor de humidade do produto, humidade relativa e absoluta do ar de secagem, concentração do soluto, pressão osmótica, teor de humidade de equilíbrio e a atividade da água. De entre todos estes destaca-se o teor de humidade do produto, a humidade relativa e a humidade absoluta do ar (Alves, 2014; Mathlouthi, 2001; Troller, 2014).

3.2.1 Teor de humidade

Na indústria alimentar, a determinação do conteúdo de água é uma das análises mais frequentes em laboratórios. De forma a evitar uma produção de produtos alimentares com um teor de humidade prejudicial ou não permitido, os métodos de determinação de conteúdo de água devem, não só fornecer resultados corretos, como fazê-lo de forma rápida e possivelmente contínua. Diferentes métodos de análise podem resultar em diferentes tipos de resultados (Isengard, 1995; Mathlouthi, 2001).

A água presente nos produtos pode encontrar-se distribuída em 3 formas: água livre, água ligada e água combinada (Alves, 2014; Elias et al., 2017).

A água livre está disponível para reações físicas e enzimáticas, reações estas que afetam a qualidade do produto. É semelhante à água pura pois apresenta propriedades idênticas (a entalpia de vaporização, por exemplo) (Alves, 2014). Inclui a água em misturas líquidas ou gasosas, na superfície exterior, em grandes cavidades e poros de produtos sólidos. A separação desta fração de água é reversível e a sua determinação não apresenta problemas (Isengard, 2001). Segundo Puzzi & Andrade (2000) a separação acontece trivialmente por evaporação através de energia calorífica.

Ao contrário da água livre, a água ligada não apresenta propriedades semelhantes a água pura. Está em contacto com solutos e outros constituintes não aquosos, possuindo uma mobilidade reduzida. Dentro desta fração de água existem diferentes graus de ligação, nomeadamente, água constitucional, água vicinal, água de multicamadas (Alves, 2014; Ribeiro & Seravalli, 2007).

- Água constitucional: também conhecida como água combinada, esta fração faz parte da estrutura química do alimento. Encontra-se presa aos constituintes não aquosos do

alimento, através de ligações iônicas. Está presente em produtos com elevado teor de humidade (Alves, 2014; Elias et al., 2017; Ribeiro & Seravalli, 2007).

- **Água vicinal:** como o próprio nome indica este grau de ligação representa a camada vizinha à água constitucional. Está presente, maioritariamente, junto dos grupos hidrofílicos existentes nos constituintes não aquosos (Alves, 2014; Ribeiro & Seravalli, 2007)
- **Água de multicamadas:** apesar de ser a água ligada com as ligações mais fracas aos constituintes não aquosos do produto, esta ainda possui uma intensidade de ligação com os solutos, permitindo-lhe um comportamento semelhante à água pura.

O teor de humidade pode ser apresentado em base seca ou base húmida, ambos de forma adimensional. Na base seca representa o valor da massa de água no produto por kg de massa de produto seco:

$$T_{h \text{ base seca}} = \frac{\text{Massa de água}}{\text{Massa seca do produto}} \quad [kg_{\text{água}}/kg_{\text{massa seca}}] \quad (18)$$

Já na base húmida representa o valor da massa de água no produto a dividir pela massa do produto total:

$$T_{h \text{ base húmida}} = \frac{\text{Massa de água}}{\text{Massa total do produto}} \quad [kg_{\text{água}}/kg_{\text{massa total}}] \quad (19)$$

Estas duas variáveis permitem calcular uma fração exata de água no produto.

3.3 Transferência de calor

A energia necessária para a evaporação da água presente na matéria-prima durante o período de secagem é obtida através de energia calorífica. Como mencionado anteriormente a energia é transferida principalmente de 3 modos: condução, convecção e radiação (Guiné & Barroca, 2017). Para ocorrer uma troca de calor entre duas substâncias é necessária uma diferença de temperatura entre elas (Çengel et al., 2019).

3.3.1 Convecção

Uma parte significativa da transferência de calor que ocorre no processo de secagem ocorre por convecção entre o ar de secagem e o produto.

A transferência de calor por convecção faz-se através do movimento de partículas num fluido, seja este líquido ou gasoso, e o seu contacto com uma superfície sólida. A convecção pode ser classificada em: convecção natural ou convecção forçada. Esta distinção depende de como o movimento do fluido é realizado. Na convecção natural o movimento ocorre naturalmente devido às diferenças de densidade provocadas pelo aquecimento ou arrefecimento do fluido. Na convecção forçada, existe uma fonte de energia exterior que obriga ao movimento do fluido. Esta ainda pode ser dividida em externa ou interna dependendo se o fluido é forçado a fluir sobre uma superfície ou no interior de uma estrutura (Çengel et al., 2019; Guiné & Barroca, 2017).

A equação geral de transferência de calor por convecção entre o ar de secagem e o produto, baseada na lei de Newton é a seguinte:

$$Q = h_s A (T_a - T_s) \quad (20)$$

O valor h_s é o coeficiente de transferência de calor por convecção e T_a e T_s são, respetivamente, a temperatura do fluido e a temperatura da superfície do produto.

3.3.2 Condução

Apesar de não ser um fenómeno tão prevalente durante o processo de secagem, este continua a estar presente no mesmo, por exemplo, na transferência de energia nas paredes do secador e mesmo no interior dos produtos em secagem.

Este fenómeno de transferência de calor baseia-se na transferência de energia entre moléculas por contacto direto entre elas. Nos sólidos, as partículas com mais energia vibratória transferem energia para partículas vizinhas com menor energia (Guiné & Barroca, 2017). Em gases e líquidos a transferência por condução ocorre pelas colisões entre as moléculas durante os seus movimentos aleatórios. Ghassemi & Shahidian (2017) referem que nos sólidos a

transferência ocorre por uma combinação das vibrações das moléculas e o transporte de energia por elétrons livres.

A transferência de energia por condução é representada, de uma forma geral, pela equação de Fourier:

$$\frac{dQ}{dt} = kA \frac{dT}{dx} \quad [W] \quad (21)$$

Nesta equação A é a área de superfície normal à linha de energia, k a condutividade do material, $\frac{dQ}{dt}$ é a quantidade de energia transferida por unidade de tempo e $\frac{dT}{dx}$ é o gradiente de temperaturas na direção da transferência de calor.

3.3.3 Radiação

Neste fenómeno, a transferência de energia ocorre através de ondas eletromagnéticas que ao atingirem os produtos, o ar ou as superfícies de um secador, são parcialmente absorvidas e aumentam a energia dos mesmos. Todos os corpos emitem e absorvem radiação sejam estes sólidos, líquidos ou gasosos. A radiação não necessita de um meio intermediário para se transmitir podendo propagar-se no vácuo. Como esta transferência é realizada entre duas superfícies, ela depende da temperatura, geometria e da estrutura das superfícies (Çengel et al., 2019; Guiné & Barroca, 2017).

No processo de secagem, a transferência de calor por radiação solar tem um papel importante no aquecimento das superfícies do secador e do ar de secagem antes de este entrar no secador.

A equação geral para calcular o poder emissivo de um corpo é denominada como a equação de Stefan-Boltzman:

$$PE = \varepsilon A \sigma T^4 \quad [W] \quad (22)$$

Onde PE é a potência emissivo, A é a área da superfície recetora [m^2], T é a temperatura absoluta [K], σ é a constante de Stefan-Boltzmann [$W/m^2 \cdot K^4$] e ε é a emissividade do corpo,

uma unidade adimensional que varia entre 0 e 1. Uma emissividade de 1 representa um corpo negro, isto é, um corpo ideal que emite o máximo de radiação a uma determinada temperatura, assim como, absorve toda a radiação que incide nele. O contrário acontece para um corpo com emissividade de 0.

3.3.4 Perdas térmicas para o exterior

A avaliação das perdas térmicas através de uma superfície pode ser feita avaliando cada um destes modos de transferência de calor que referimos anteriormente (convecção, condução e radiação), ou também pode ser avaliada agrupando as diferentes resistências térmicas correspondente a cada um deles num único parâmetro designado de coeficiente global de transferência de calor (U):

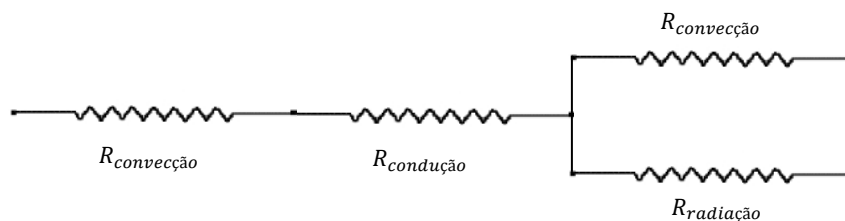


Figura 10 - Representação esquemática do circuito de resistências térmicas na parede do secador

Na figura observa-se uma resistência de convecção que representa a transferência de calor por convecção entre o ar de secagem e a parede do secador, uma resistência de condução que representa a transferência de calor por condução através da parede sólida e uma resistência de convecção e uma resistência de radiação que representam a transferência de calor por convecção e radiação da parede exterior para o ar ambiente e superfícies vizinhas. Sendo estas resistências definidas conforme Çengel et al. (2019) o coeficiente global de transferência de calor pode ser obtido da seguinte forma:

$$U = \frac{1}{R_{total}A} \quad (23)$$

Em que R_{total} é a resistência térmica total e A é a área da superfície.

3.3.5 Radiação Solar

O sol é a principal fonte de energia do nosso sistema solar. Uma pequena fração da energia produzida pela fusão nuclear no centro do sol atinge o nosso planeta e torna possíveis diversos fenómenos como a chuva, as correntes oceânicas, o vento, a fotossíntese, entre outros. Fenómenos estes que são vitais para existir vida na terra.

A energia proveniente da radiação solar, que incide sobre a terra anualmente, é aproximadamente $2 \times 10^{17} \text{ kWh}$. Este valor é 10 vezes superior à necessidade energética global anual (Tiwari, 2016).

Da radiação solar que atinge o planeta terra alguma é perdida para a atmosfera. Numa superfície horizontal na região do equador a radiação solar anual incidente, designada como Irradiação Global Horizontal, pode chegar aos 2200 kWh/m^2 . Isto traduz-se num valor diário de $6,02 \text{ kWh/m}^2$ (Tiwari, 2016). Em Portugal, mais especificamente em Viseu, de acordo com a *WeatherSpark.com* (2023), podemos obter durante os períodos anuais de maior incidência de radiação, valores médios diários de 8 kWh/m^2 , como demonstra o gráfico da Figura 11:

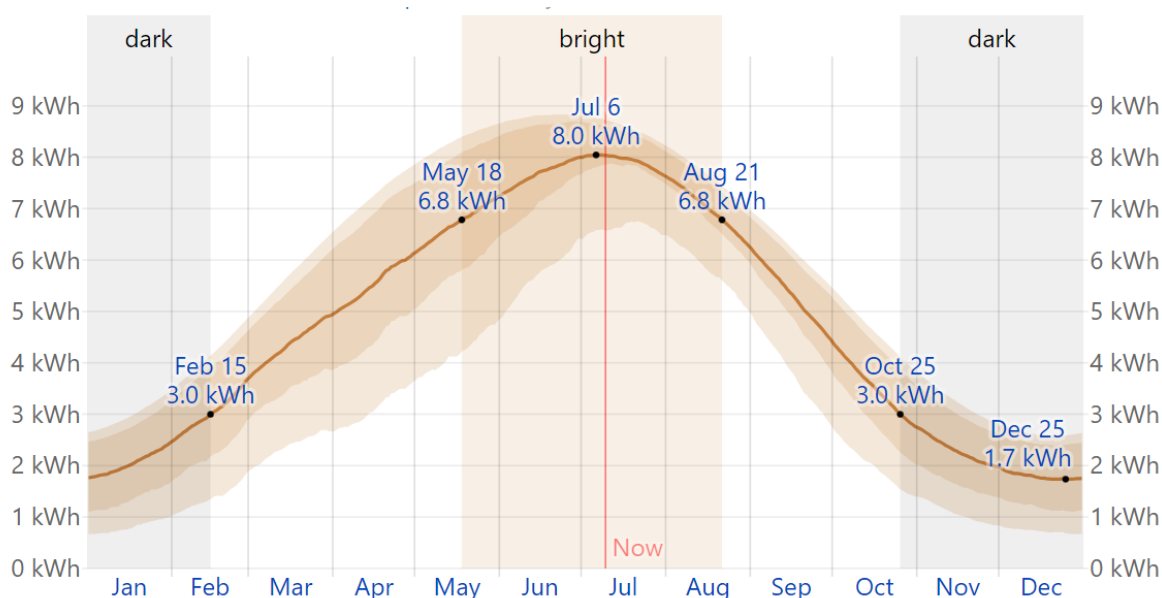


Figura 11 - Incidência média diária de energia solar na região de Viseu, Portugal (Weatherspark.com, 2023)

O valor diário de energia solar que incide numa determinada superfície, tal como a sua intensidade, depende de diversos fatores como a altura do ano, a latitude, as condições meteorológicas, a orientação da própria superfície, entre outros.

A radiação solar que incide numa superfície é composta por duas componentes principais: radiação solar direta e radiação solar difusa. A radiação solar direta, como o nome indica é a quantidade de radiação proveniente do sol que não é absorvida nem dispersa pela atmosfera e que atinge diretamente uma superfície. A radiação difusa é a quantidade de radiação desviada por componentes da atmosfera como nuvens e poeiras. Existe também a radiação refletida que é a quantidade de radiação solar refletida por superfícies vizinhas (Çengel et al., 2019). A Irradiação Global Horizontal representa a soma de todas estas componentes que incidem sobre uma superfície horizontal.

4. DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

Com o objetivo de estudar e avaliar a secagem de alguns produtos e subprodutos foram realizados diferentes tipos de ensaios com diferentes tipos de produtos agroalimentares, no entanto, neste trabalho, vai-se focar a atenção nos ensaios realizados com mirtilos, framboesas, bagaço de maçã e couve-galega. Os ensaios foram realizados ao longo de vários meses em diferentes equipamentos e diferentes condições no espaço do Instituto Politécnico de Viseu. Os produtos e subprodutos utilizados nos ensaios foram obtidos de empresas produtoras que pretendiam reduzir o desperdício que provem do seu negócio.

4.1 Ensaios de secagem

Os primeiros ensaios foram realizados numa câmara climática a diferentes temperaturas (40, 50 e 60°C) e a uma humidade relativa de 10% com o objetivo de avaliar a influência destes parâmetros na qualidade de produto secado. Foram também realizados ensaios com 30% de humidade relativa, no entanto, optou-se por excluí-los por não se apresentarem fiáveis o suficiente para serem analisados. Em cada um destes ensaios foram feitas pesagens ao longo do tempo, registando a hora e a massa do produto e em alguns casos a temperatura e humidade do interior da câmara. Com estes valores e com base no ensaio inicial de determinação do teor de humidade inicial dos produtos, foi possível analisar a evolução do seu teor de humidade ao longo do ensaio, e assim construir curvas de secagem e analisar o comportamento dos diferentes produtos quando sujeitos a secagem em diferentes condições. O objetivo principal destes ensaios foi a determinação de uma temperatura de secagem ideal, onde o produto atingisse um teor de humidade desejável e aos mesmo tempo mantendo o máximo de nutrientes, assim como a descrição das respetivas curvas de secagem.

DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

Existem diversos estudos já realizados utilizando condições semelhantes, como é o caso do estudo realizado por Doymaz (2009) relacionado com a secagem de amostras de espinafres através de um secador de convecção. As amostras foram sujeitas a temperaturas de ar de secagem de 50, 60, 70 e 80° C. Os autores observaram pelas curvas de secagem que, para as várias amostras, no processo não se registou a fase a taxa constante apenas a fase de taxa em queda. Outros autores reportaram resultados semelhantes na secagem de diferentes vegetais (Simal et al., 1998). Como seria de prever, a conclusão retirada pelo autor foi que o tempo de secagem diminui com o aumento da temperatura de 495 min a 50°C para 165 min a 80°C.

Durante os ensaios laboratoriais do presente estudo, foram utilizadas 2 câmaras climáticas, nomeadamente a Aralab FITOCLIMA 300EP10 e a ARALAB TESTA TT. A Aralab FITOCLIMA 300EP10 foi utilizada na maioria dos ensaios. Como mencionado anteriormente, ambas as câmaras permitem a definição de condições específicas de temperatura e humidade relativa assim como ciclos para simular condições reais de períodos diurnos e noturnos. Cada uma delas possui um visor para programação e acompanhamento das condições ambientais do ensaio.

No interior de ambas as câmaras climáticas foram colocados 2 tabuleiros que permitiram a testagem de uma maior quantidade de amostra. As amostras foram colocadas em cadinhos e posicionadas nos tabuleiros das câmaras climáticas.



Aralab FITOCLIMA 300EP10



Aralab TESTA TT

Figura 12 - Câmaras climáticas utilizadas nos ensaios

DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

O acompanhamento da evolução do peso das amostras presentes nos cadinhos permitiu avaliar a evolução do seu teor de humidade ao longo do tempo.

Foram utilizados dois tipos de cadinhos. Inicialmente foram utilizados cadinhos de alumínio, no entanto, de forma a melhorar a estabilidade e a transferência de calor foram modelados e produzidos cadinhos com o uso de uma impressora 3D. Estes cadinhos possuem orifícios na parte inferior de forma a permitir a passagem do ar quente em ascensão, aumentando assim a transferência de calor e melhorando a sua estabilidade (ver Figura 13).



Figura 13 - Cadinhos utilizados na pesagem

Foi também colocada uma balança de precisão no topo exterior das câmaras climáticas com um prato de pesagem suspenso no seu interior, permitindo assim o acompanhamento da evolução do peso da amostra ao longo do tempo de forma contínua, com registo do peso ao minuto (ver Figura 14).



Figura 14 - Aparato para o ensaio de medição contínua do peso das amostras.

DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

Ao longo dos ensaios de secagem foram utilizadas 3 balanças com diferentes características (ver Figura 15), nomeadamente:

- Sartorius BP 310P – peso máximo de 310g; resolução de 0,001g até 60g, 0,002g aos 120g e 0,005g aos 310g;
- KERN PRJ – peso máximo de 320g, resolução de 0,01g;
- KERN 440-47N – peso máximo de 2000g, resolução de 0,1g.

As balanças Sartorius BP 310P e KERN PRJ foram utilizadas para amostras de menores massas e a balança KERN 440-47N foi usada para amostras de maiores massas.



Sartorius BP 310P

KERN PRJ

KERN 440-47N

Figura 15 - Balanças de precisão utilizadas nos ensaios.

Foram realizados ensaios de verificação da reprodutibilidade das balanças. O processo e resultados são apresentados no Apêndice A.

4.1.1 Preparação das amostras

Os produtos, depois de recebidos, foram conservados num frigorífico a cerca de +5 °C. Antes de iniciar os ensaios, as amostras eram selecionadas rejeitando as que apresentassem um estado de maturação insuficiente ou um visível estado de degradação. As amostras eram, depois, dispostas sobre uma superfície plana à temperatura ambiente de forma a permitir que eles atingissem o equilíbrio térmico com o ambiente. Desta forma, conseguia-se eliminar a humidade superficial resultante da condensação da humidade do ar ambiente sobre a superfície fria das amostras. Este procedimento aqui descrito foi realizado não só para os ensaios em câmara climática como também para todos os outros ensaios que serão mencionados à frente.



Figura 16 - Preparação das amostras

4.2 Secador Solar

Com o conhecimento ganho dos ensaios em condições fixas foram realizados ensaios em condições reais utilizando um secador solar do tipo indireto e híbrido. Estes ensaios tinham como objetivo principal determinar o contributo da energia solar para a secagem.

O secador solar utilizado foi um protótipo fornecido pela empresa Chatron Lda, modelo AVATAR 20 (8001). Este é composto por uma câmara de secagem construída com painéis sandwich, um painel solar térmico com 900x690 (mm). Este painel solar é construído em chapa de aço revestida com Alanod mirotherm, uma película especialmente adequada para absorção de radiação solar direta e difusa. No centro do painel solar térmico, possui um painel fotovoltaico com 320x255 (mm) para alimentar o ventilador de insuflação que força o ar a mover-se do painel para o interior do secador. No interior da câmara de secagem, possui um outro ventilador de circulação para uniformizar as condições do ar interior e uma resistência elétrica de 1kW. A resistência elétrica e o ventilador interior são controlados por um higróstato e um termostato que permite definir um ponto de temperatura e/ou humidade em que estes ligam ou desligam. O termostato, em particular, tem por objetivo garantir que a temperatura não desce abaixo de um set point definido, ligando a resistência se tal acontecer. Em relação ao higróstato, o fabricante definiu que a sua função era desligar completamente o sistema quando a humidade relativa interior descesse abaixo de um ponto que o fabricante considera representar o final do processo de secagem. O secador possui um painel de controlo onde estão concentrados os diversos interruptores e os controladores de temperatura e de humidade.



Figura 17 - Protótipo Secador Solar AVATAR 20



Figura 18 - Painel Solar do Secador



Figura 19 - Entrada de ar do secador e ventilador de insuflação

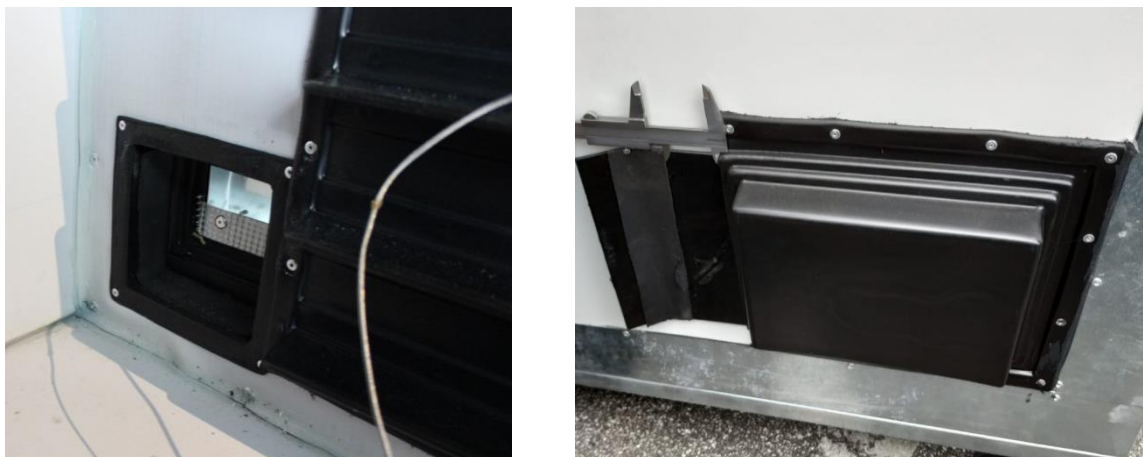


Figura 20 - Saída de ar do secador perspetiva interior e exterior



Figura 21 - Resistência e ventilador interior do secador



Figura 22 - Painel de controlo do secador

DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

Ao longo dos diversos ensaios verificou-se que a variação da presença de energia solar e da sua intensidade apresentava problemas nos ensaios. Durante a noite o ventilador não era alimentado e durante certas horas do dia o ventilador era alimentado em excesso, pelo que a velocidade do ventilador e o caudal que o ventilador enviava para dentro do secador não era constante. Isto tornava difícil tomar certas considerações. De forma a resolver esse problema, a alimentação do ventilador de insuflação passou a ser realizada por uma fonte de alimentação de maneira a que o caudal de ar de entrada fosse constante. O seu valor foi calculado. Este processo é explicado em mais detalhe nos Apêndices B e D, respetivamente.

O secador solar foi instrumentado com diferentes tipos de sensores: higrómetros e termopares tipo K, com bainha, para medir a humidade e temperatura dentro da câmara, piranómetro para medir a intensidade de radiação que incidiu no painel solar e um analisador de energia para registar a energia elétrica consumida pelo secador.

Os higrómetros utilizados, produzidos pela empresa Honeywell modelo HIH-4021-003, são aparelhos capazes de medir de 0 a 100% a humidade relativa do ar suportando temperaturas dos -40 aos +85°C. São de pequena dimensão com uma precisão de $\pm 3,5\%$ HR.

Tantos os sensores de temperatura como de humidade foram calibrados de acordo com um procedimento descrito no Apêndice C.

O piranómetro utilizado, da marca Apogee modelo SP 215, é um sensor capaz de medir comprimentos de onda entre os 360 e 1200 (nm), capaz de operar num ambiente com temperaturas entre os -40 e os 70°C, humidade relativa entre 0 e 100%, e é capaz de ser submergido até 30 m.

Os sinais analógicos em tensão provenientes dos sensores necessitam de ser traduzidos para valores que possam ser compreendidos, interpretados e registados em formato digital e para isso os mesmos foram ligados a placas de aquisição.

A placa de aquisição NI USB-6008 da National Instruments foi utilizada para ler e registar os valores de radiação incidente nos painéis fotovoltaico e térmico captados pelo piranómetro. Esta placa possui 2 saídas e 8 entradas analógicas e conexão através de terminais de parafuso. Os valores adquiridos eram visualizados e interpretados através do software Labview.

A placa de aquisição High Resolution utilizada para a medição dos valores de humidade dos higrómetros foi a modelo ADC-16 fabricado pela empresa Pico Technology. Esta placa pode

DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

ler e interpretar até 8 higrómetros diferentes. A sua temperatura de operação vai dos 0 aos 70°C. Possui uma precisão de até 0,2%. A placa possui oito canais, a ligação dos higrómetros faz-se através de terminais de parafuso, liga-se ao computador por USB e utiliza-se o software do fabricante, o Picolog 6.0, para registar os dados que podem ser exportados e tratados em Excel.

A placa de aquisição TC-08 também produzida pela empresa Pico Technology é um dispositivo utilizado para de ler e interpretar os dados de temperatura de até 8 termopares em simultâneo. A sua gama de temperaturas vai dos -270 aos +1820 °C e possui uma velocidade de leitura de até 10 registos por segundo. Também é utilizado o software Picolog 6.0 para visualizar e registar os dados. Se for necessário este dispositivo possui a possibilidade de uma expansão até 20 canais.

Outro dispositivo também utilizado foi um analisador de energia SHELLY EM que permitiu, de uma forma simples obter valores médios de potência a cada minuto e o acumulado de energia eléctrica consumida pelo secador. Os dados eram armazenados no próprio dispositivo e obtidos por ligação WiFi.

Para os ensaios em secador solar procurou-se utilizar uma quantidade de produto que simulasse a utilização do equipamento por um pequeno ou médio produtor agroalimentar. Assim, o secador foi carregado até à sua capacidade máxima, geralmente na casa de 20 kg, garantindo o espaço necessário à circulação do ar em volta das amostras.

Tendo em conta a quantidade de produto a secar, optou-se por distribuí-lo por caixas de plástico empilháveis. Estas foram revestidas por dentro com rede de forma a evitar a queda do produto durante o seu manuseamento para pesagem das amostras, sem impedir a circulação do ar de secagem. Para a pesagem destas amostras foi necessário recorrer a outra balança com maior capacidade. A balança utilizada foi a PRECISA 6200 D, que tem capacidade para 6200g e uma resolução de 0,1g.

Em baixo são apresentadas imagens com os diversos dispositivos utilizados durante os ensaios em secador solar:



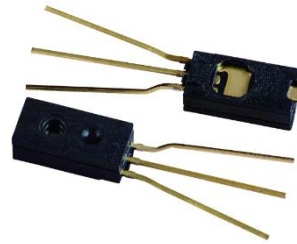
Figura 23 - Secador Solar Chatron Lda, modelo AVATAR 20 (800l)



Piranómetro



Termopares Tipo K



Higrómetros Honeywell

Figura 24 - Sensores utilizados nos ensaios



Placa de aquisição National Instruments modelo NI USB-6008



Placa de aquisição Pico Technology modelo ADC-16



Placa de aquisição Pico Technology modelo TC-08

Figura 25 - Placas de aquisição utilizadas



Figura 26 - Balança de precisão utilizada nos ensaios, Balança PRECISA modelo 6200D



Figura 27 - Analisador de energia SHELLY EM utilizado nos ensaios

Para ilustrar o sistema montado com todos os equipamentos utilizados no secador solar, apresenta-se o seguinte esquema:

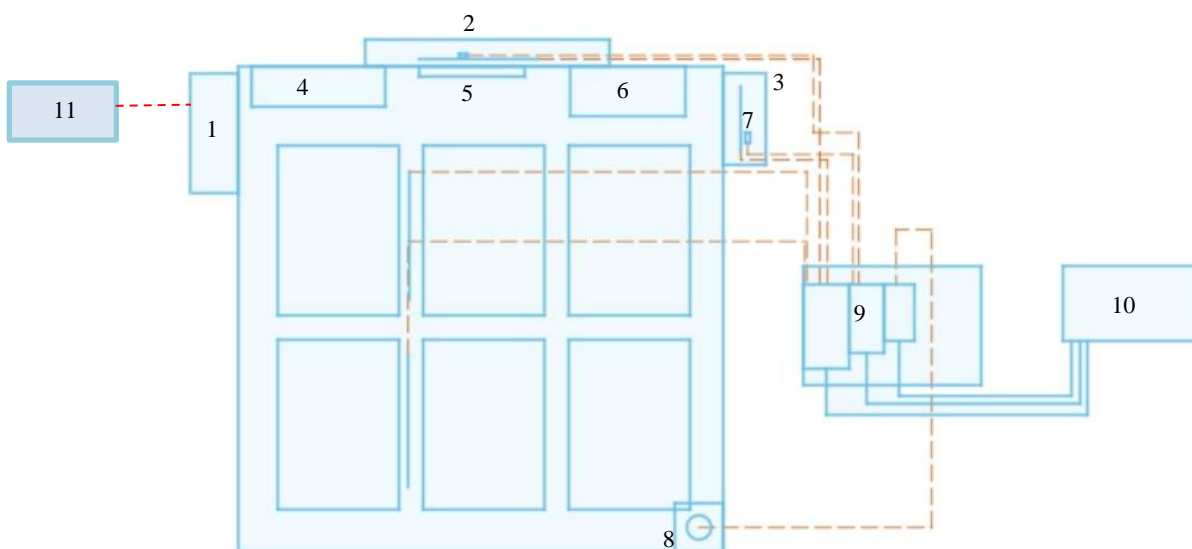


Figura 28 - Montagem ensaios secador solar

- 1 – Painel de controlo
- 2 – Painel solar e térmico e entrada de ar
- 3 – Saída de ar
- 4 – Ventilador (circulação do ar interior)
- 5 – Ventilador de insuflação
- 6 – Resistência elétrica
- 7 – Sensores de humidade e temperatura
- 8 - Piranómetro
- 9 – Placas de aquisição e data loggers
- 10 – Computador
- 11 – Fonte de alimentação

4.3 Determinação da humidade inicial

Tanto para os ensaios na câmara climática, como para os no secador solar, foi sempre necessário realizar ensaios de determinação da humidade inicial do produto a secar. Para isso foi utilizada uma estufa Venticell modelo VC55. Esta utiliza circulação de ar forçada e possui uma temperatura de operação desde 10°C acima da temperatura ambiente até 250/300°C. Para estes ensaios, foi utilizada uma temperatura no interior da estufa de 105°C

Sempre que se iniciava um novo ensaio em câmara climática ou no secador solar, iniciou-se também um ensaio para determinação da humidade inicial utilizando amostras o mais representativas possível. Assim, procurou-se que o valor do teor de humidade inicial reflectisse, o mais fielmente possível, as condições iniciais das amostras em ensaio, quer na câmara climática, quer no secador.

Durante estes ensaios, periodicamente, as amostras foram retiradas da estufa e deixadas a arrefecer dentro de um exsiccador com sílica gel de modo a evitar a reabsorção de humidade. Só após atingirem a temperatura ambiente é que as amostras eram pesadas. Isto era feito para garantir pesagens mais precisas já que as amostras após saírem de temperaturas elevadas para a temperatura ambiente estavam sujeitas a reações bruscas que poderiam afetar o valor das pesagens. Este procedimento foi repetido até não se observar variação da massa das amostras entre pesagens. Nesse momento, considerou-se que estas amostras já não possuíam qualquer humidade no seu interior, sendo a massa medida a sua massa seca. Para a pesagem destas amostras foi utilizada uma balança previamente mencionada, a Balança Sartorius BP 310P.

DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

Como a sílica gel absorve a humidade da amostra, mas não consegue libertá-la a mesma vai ficando acumulada e a sílica acaba por saturar, pelo que ao longo dos ensaios foi colocada na estufa de forma a retirar essa humidade acumulada. Existem 2 fatores que garantem o funcionamento correto do exsiccador. O primeiro envolve a cor da sílica. Se a sílica apresentar uma cor torquesa significa que não existe humidade presente na mesma. Se apresentar uma cor rosada então existem altos níveis de humidade presentes na sílica. O segundo fator tem a ver com a selagem da tampa do exsiccador. É necessário garantir uma boa vedação utilizando silicone líquido em todo o perímetro da tampa.

As imagens seguintes ilustram os diversos dispositivos utilizados nos ensaios de humidade inicial em estufa:



Figura 29 - Estufa Venticell VC55 utilizada nos ensaios



Figura 31 – Exsiccador utilizado



Figura 30 - Balança Sartorius BP 310P

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Ensaios em Câmara climática

No que diz respeito aos resultados obtidos dos ensaios em câmara climática estes foram publicados no artigo referenciado por Catorze et al. (2022) pelo que vai ser apresentado apenas um resumo desses resultados.

5.1.1 Curvas de secagem

Foram selecionados dois produtos sazonais da indústria agroalimentar para os quais a secagem tem um potencial interesse na valorização dos fluxos de resíduos das cadeias de valor alimentar. Os frutos foram submetidos a um processo de secagem completa, para determinação do teor de humidade inicial, e a um processo de secagem com condições controladas, para determinação das curvas de secagem e teores de humidade de equilíbrio. Em termos de curvas de secagem, as Figuras 32 e 33 apresentam curvas de secagem de mirtilos e framboesas frescas a 10% de humidade relativa (HR) e a 40, 50 e 60°C de temperatura (T). Obteve-se um formato esperado das curvas de secagem, com baixa taxa de secagem no primeiro período de adaptação à temperatura e humidade relativa do ensaio. Depois disso, as curvas de secagem apresentam uma taxa de secagem quase constante com uma diminuição significativa do teor de humidade, terminando com um período de secagem de taxa decrescente até atingir o teor de humidade de equilíbrio.

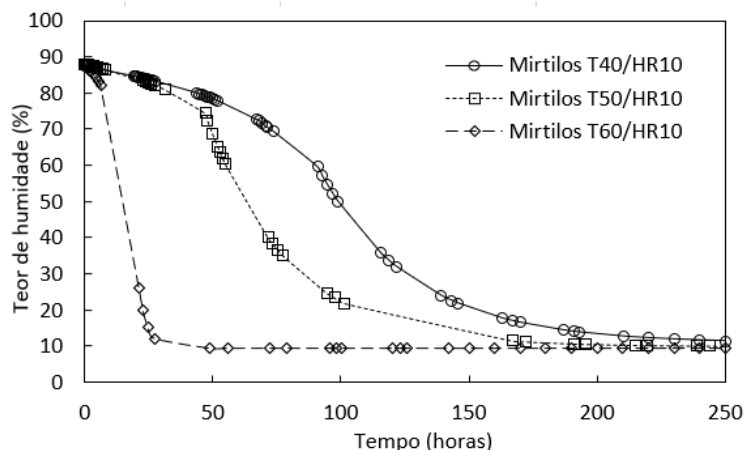


Figura 32 - Curvas de secagem de mirtilos a 10% de umidade relativa e 40, 50 e 60°C (Catorze et al., 2022).

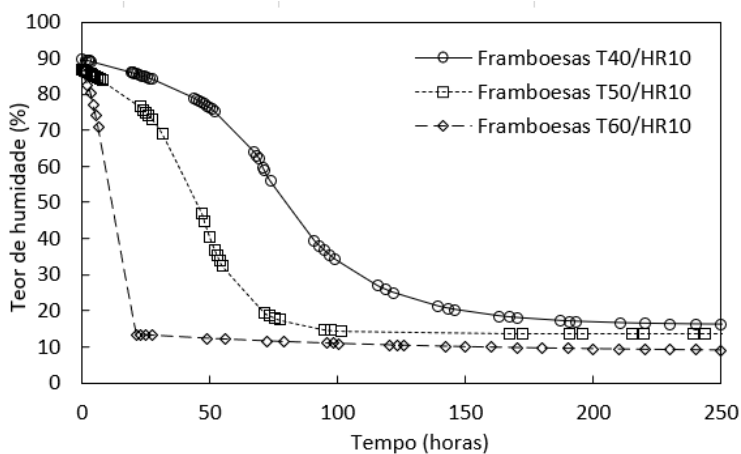


Figura 33 - Curvas de secagem de framboesas a 10% de umidade relativa e 40, 50 e 60°C (Catorze et al., 2022).

A Tabela 1 mostra os principais parâmetros das curvas de secagem: a umidade inicial, a umidade de equilíbrio e o período para atingir o equilíbrio. Como esperado, para ambas as frutas, a umidade de equilíbrio e o tempo para alcançá-la diminuem com o aumento da temperatura. O efeito da temperatura na umidade de equilíbrio é mais evidente nas framboesas do que nos mirtilos. As framboesas atingem o teor de umidade de equilíbrio mais rapidamente do que os mirtilos. Para mirtilos e framboesas, a umidade inicial ficou entre 86% e 90%. A umidade de equilíbrio para mirtilos ficou entre 10,8% a 40°C e 9,4% a 60°C, e para framboesas entre 16,0% a 40°C e 8,4% a 60°C.

Tabela 1 - Parâmetros das curvas de secagem de mirtilos e framboesas

Produtos	Humidade relativa [%]	Temperatura [°C]	Teor de humidade inicial - Base húmida [%]	Teor de humidade de equilíbrio - Base húmida [%]	Tempo equilíbrio [h]
Mirtilos	10	40	87,5	10,8	320,0
		50	88,0	9,9	267,7
		60	87,8	9,4	178,8
Framboesas		40	89,7	16,0	270,0
		50	87,0	13,8	167,0
		60	85,9	8,4	120,3

Considerando os requisitos de energia, baixas temperaturas de secagem requerem menos energia, mas por outro lado, requerem mais tempo para atingir o estado de secagem desejado. Se o tempo não for um requisito, as temperaturas de secagem mais baixas para obter o mesmo produto final podem ser mais facilmente suportadas pela energia solar.

5.1.2 Análises Químicas

As análises químicas a seguir apresentadas foram realizadas pelo Departamento de Ambiente do Instituto Politécnico de Viseu de acordo com um procedimento descrito em seguida.

Para a avaliação do efeito de secagem nos produtos, foram determinados os teores de cinzas, gordura, proteína, compostos fenólicos totais e também avaliada a capacidade antioxidante. Todas as análises foram feitas em triplo. As amostras foram congeladas no momento do recebimento até o momento da análise, a fim de preservar as suas características. O teor de cinzas foi determinado por meios gravimétricos em mufla (DINKO D-62D) com temperatura controlada de 550°C (AOAC, 2002). O teor de gordura seguiu o método de Weende (AOAC, 2002). A proteína foi quantificada de acordo com o método de Kjeldahl (AOAC, 2002), utilizando um fator de conversão de 6,25 (Galvani & Gaertner, 2006). As amostras foram submetidas à digestão em digestor BEHROTEST K20 e destiladas em destilador automático Selecta Pro-Nitro II quantificando o nitrogênio por titulação com HCl 0,1 N (AOAC, 2002). Os compostos fenólicos e a atividade antioxidante foram avaliados após extração com água acidificada. Os compostos fenólicos foram determinados pelo método de Folin Ciocalteu (Ferreira et al., 2002). A quantificação da atividade antioxidante foi realizada seguindo o método de

inibição do radical livre DPPH• (2,2-difenil-1-picrilhidrazil) (Brand-Williams et al., 1995).

O efeito das condições de secagem nas características químicas dos produtos em estudo é descrito na Tabela 2. São apresentadas as variações relativamente aos produtos frescos. Um estudo mais detalhado sobre as características frescas desses produtos foi apresentado anteriormente (Tavares et al., 2020).

Tabela 2 - Variação dos parâmetros químicos dos produtos secos (base seca).

Produto	Condições de secagem	Gordura [%]	Cinzas [%]	Proteína [%]	Atividade anti-oxidante [mg AAE/100g sample]	Compostos Fenólicos [mg GAE/100g sample]	Açúcares Totais [%]
Framboesas	Fresco	3,8	6,24	8,64	430	1229	5,40
	T40/HR10	0,38	6,58	11,1	308	930	10,9
	T50/HR10	0,24	3,96	9,24	213	180	8,10
	T60/HR10	0,61	4,91	9,19	223	566	6,80
Mirtilos	Fresco	1,45	2,13	4,95	685	2594	12,4
	T40/HR10	0,32	2,09	6,0	290	822	12,7
	T50/HR10	0,16	1,74	3,74	235	313	8,80
	T60/HR10	0,36	1,99	4,24	244	681	9,90

Os resultados da Tabela 2 fornecem informações sobre o valor nutricional, o conteúdo mineral e os componentes bioativos das framboesas e mirtilos antes e após o processo de secagem. As frutas podem ter uma ampla gama de teores de cinzas. É possível reconhecer que isso não é influenciado significativamente durante os procedimentos de secagem. Espera-se que a alta temperatura possa influenciar nas perdas de proteínas, devido aos processos de desnaturação. Verificou-se que houve pequenas oscilações no teor de proteína, mas pode-se concluir que as condições de secagem não influenciam no teor de proteína dos produtos estudados. O oposto foi verificado para a gordura. A influência da temperatura nas gorduras traduz-se num aumento do fenómeno de oxidação lipídica, que se traduz no odor e sabor dos produtos rançosos e na alteração da textura dos produtos proteicos. Na oxidação lipídica, o oxigénio reage com os ácidos gordos insaturados, produzindo radicais livres que destroem as vitaminas lipossolúveis e diminuem o valor nutricional das proteínas (Celestino, 2010). Porém, devido ao baixo

teor de lipídios desses produtos, essa não é uma reação com grande influência para essas frutas.

Os compostos fenólicos são substâncias que existem principalmente nas plantas, mas que também podem surgir do catabolismo de aminoácidos (Ferreira et al., 2002). Estes compostos são antioxidantes através da eliminação de radicais livres, além de inibirem a oxidação lipídica e a proliferação de fungos, sendo também responsáveis pela cor, adstringência e aroma de diversos produtos (Soares, 2002). Observou-se globalmente, independentemente da condição de secagem, que os fenólicos foram degradados, e a perda desses compostos aumenta quando os produtos são submetidos a condições de secagem acima de 50 °C. Segundo Efraim et al. (2010), quanto maior a temperatura e a humidade, maior a oxidação dos polifenóis.

A atividade antioxidante dos alimentos é uma das características mais apreciadas devido aos seus benefícios à saúde. Entre os compostos com capacidade antioxidante encontram-se os compostos fenólicos (Fernandes et al., 2019). Antes da secagem, o maior poder antioxidante dos mirtilos pode estar relacionado ao maior teor de compostos fenólicos em relação às framboesas. A secagem provoca uma diminuição na atividade antioxidante que pode estar relacionada com a diminuição observada no teor de compostos fenólicos após a secagem. O efeito da diminuição da atividade antioxidante com o aumento da temperatura de secagem é evidente de 40 para 50°C, praticamente sem alteração para a temperatura de 60°C. Os parâmetros analisados destacam o efeito da temperatura de secagem na redução de gorduras, compostos fenólicos e atividade antioxidante. Os valores de cinzas, como esperado, permanecem semelhantes antes e após a secagem. A condição de secagem que menos afetou as propriedades químicas foi a secagem a 40°C, com humidade relativa de 10%.

5.2 Ensaio em Secador Solar

Durante o período de realização deste trabalho e no âmbito de uma colaboração com a empresa Chatron Lda mencionada anteriormente, foram realizados diversos ensaios com diferentes condições em diferentes alturas do ano dentro do protótipo de secador Solar Chatron Lda, modelo AVATAR 20 (800l). Estes ensaios incluíram produtos como espinafres, couve-galega, bagaço de maçã e alface. A utilização destes produtos relacionou-se apenas com a sua disponibilização por algumas empresas

parceiras, nomeadamente a Vasco Pinto e a Indumape. Sempre que se pretendia iniciar um novo ensaio, contactavam-se as empresas para que fornecessem o subproduto que tivessem em maior quantidade.

Foram realizados ensaios utilizando apenas energia elétrica, apenas energia solar, uma combinação das duas e até mesmo ensaios em vazio, em que se ligava o secador e se monitorizavam os parâmetros interiores sem colocar produto lá dentro. No entanto, para este trabalho serão apenas utilizados o ensaio com bagaço de maçã e o ensaio com couve-galega. Isto porque, tendo em conta os diferentes problemas que afetaram alguns dos ensaios, em particular a aquisição de dados, e as diferentes configurações de instrumentação utilizadas, que passaram por várias iterações, os ensaios mencionados são os que possuem um pacote de dados adquiridos mais completo e fiável.

Tendo em conta os resultados obtidos no capítulo anterior, onde se concluiu que a secagem a 40°C permitiu uma maior conservação das propriedades químicas dos produtos, esse foi o valor de temperatura definido no controlador da resistência elétrica do secador. Assim, nos ensaios de secagem de bagaço de maçã e de couve-galega a temperatura foi mantida próximo dos 40°C, oscilando em função do controlo termostático, exceto quando a energia solar foi suficiente para que a temperatura ultrapassasse esse valor. No entanto, em alguns ensaios, foi possível observar a formação de bolores e mesmo o apodrecimento de algumas amostras, o que indicia insuficiente temperatura e ventilação durante a secagem. Note-se que, nos ensaios aqui apresentados, isso não aconteceu.

A apresentação de resultados dos ensaios em secador solar será dividida em 2 fases. Na primeira fase, será feita uma análise ao ensaio com baço de maçã com o intuito de determinar o coeficiente global de transferência de calor do secador. Na segunda fase será feita uma análise energética global do secador durante os ensaios com bagaço de maçã e com couve-galega.

5.2.1 Ensaio com Bagaço de Maçã

Nas figuras 34 e 35 são apresentados alguns dos dados recolhidos durante o ensaio de secagem de bagaço de maçã no secador solar híbrido. Note-se que este ensaio decorreu durante o mês de Novembro sob condições atmosféricas pouco adequadas ao aproveitamento da energia solar. O céu apresentou alguma nebulosidade e chegou mesmo

a ocorrer alguma precipitação. Para além dos dados representados, foram ainda registadas as temperaturas e humidades relativas em diferentes níveis no interior do secador e, em particular, na entrada e na saída de ar do secador.

A duração total deste ensaio foi de 10 dias, no entanto, após a análise dos dados recolhidos foi possível dar o ensaio por terminado ao fim 7 dias (10100 minutos). O critério para considerar o ensaio terminado foi o não se verificar perda de massa nas amostras ao longo de um período de 24 horas.

Nas figuras pode-se observar a evolução das seguintes variáveis ao longo dos 7 dias: temperatura no interior do secador (Tint), humidade relativa no interior do secador (HR), temperatura do ambiente exterior (Text), teor de humidade do produto (TH), potência elétrica média registada a cada minuto (PMR) e irradiação global horizontal (RS). Pode-se observar que o produto apresentava um teor humidade inicial de 80% e terminou com um teor de humidade de equilíbrio de 2,5%. A humidade relativa do ar no interior atingiu a saturação por um relativamente curto intervalo de tempo no início do ensaio e terminou por volta dos 10%. Em relação à temperatura interior, estes valores foram registados a meio do secador, entre as caixas com as amostras, e apresentou uma tendência crescente até ao final do período de secagem constante, tendo posteriormente estabilizado em torno dos 40°C. Os valores da potência elétrica são valores médios registados a cada minuto e é possível observar um maior consumo no início do ensaio, bem como o consumo associado aos componentes do secador sempre ligados, como o ventilador, que foi de cerca de 77 W. Já os valores da irradiação solar refletem as condições atmosféricas verificadas, com valores geralmente abaixo dos 750 W/m² e apenas 4 dias onde se verificou alguma radiação direta.

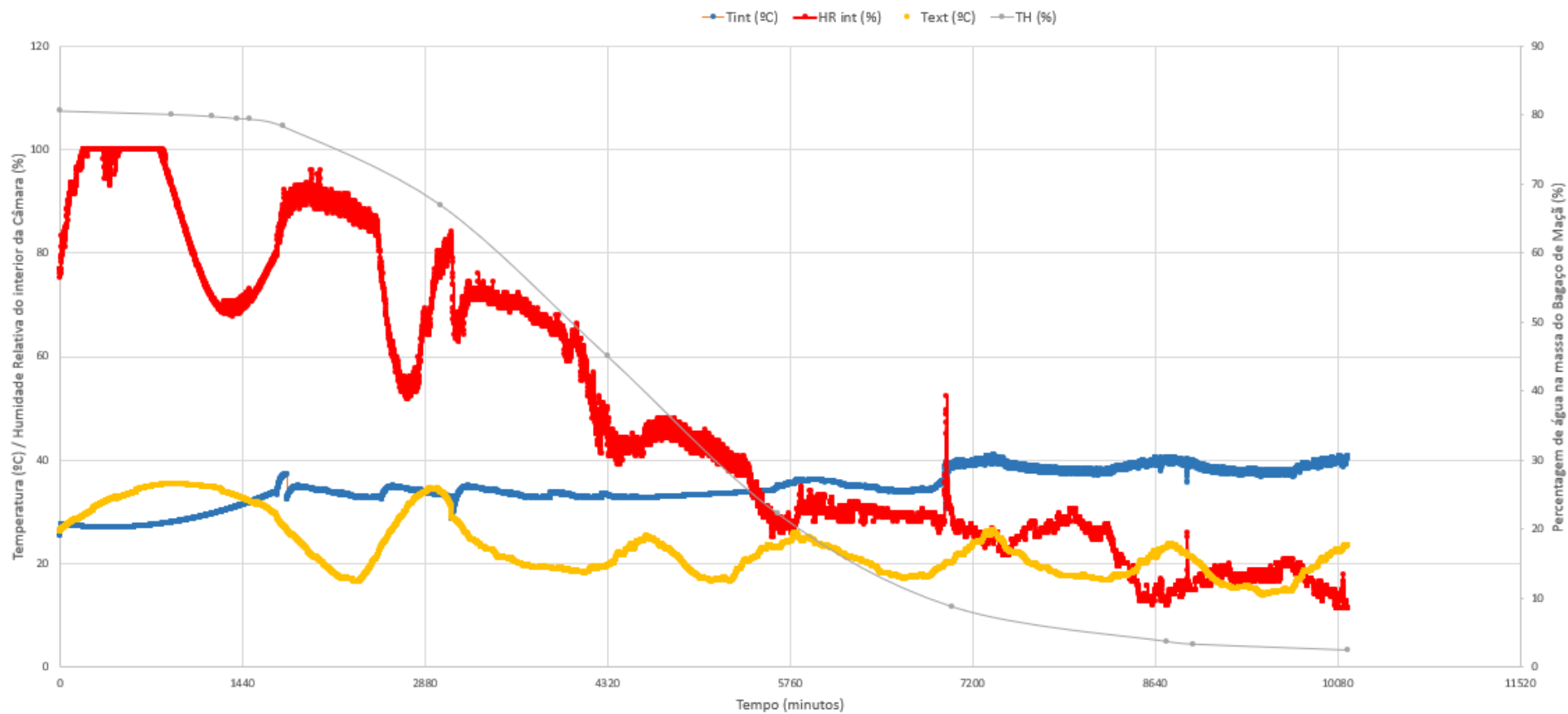


Figura 34 - Evolução de Temperatura, Humidade e Massa no ensaio de secagem do Bagaço de Maçã

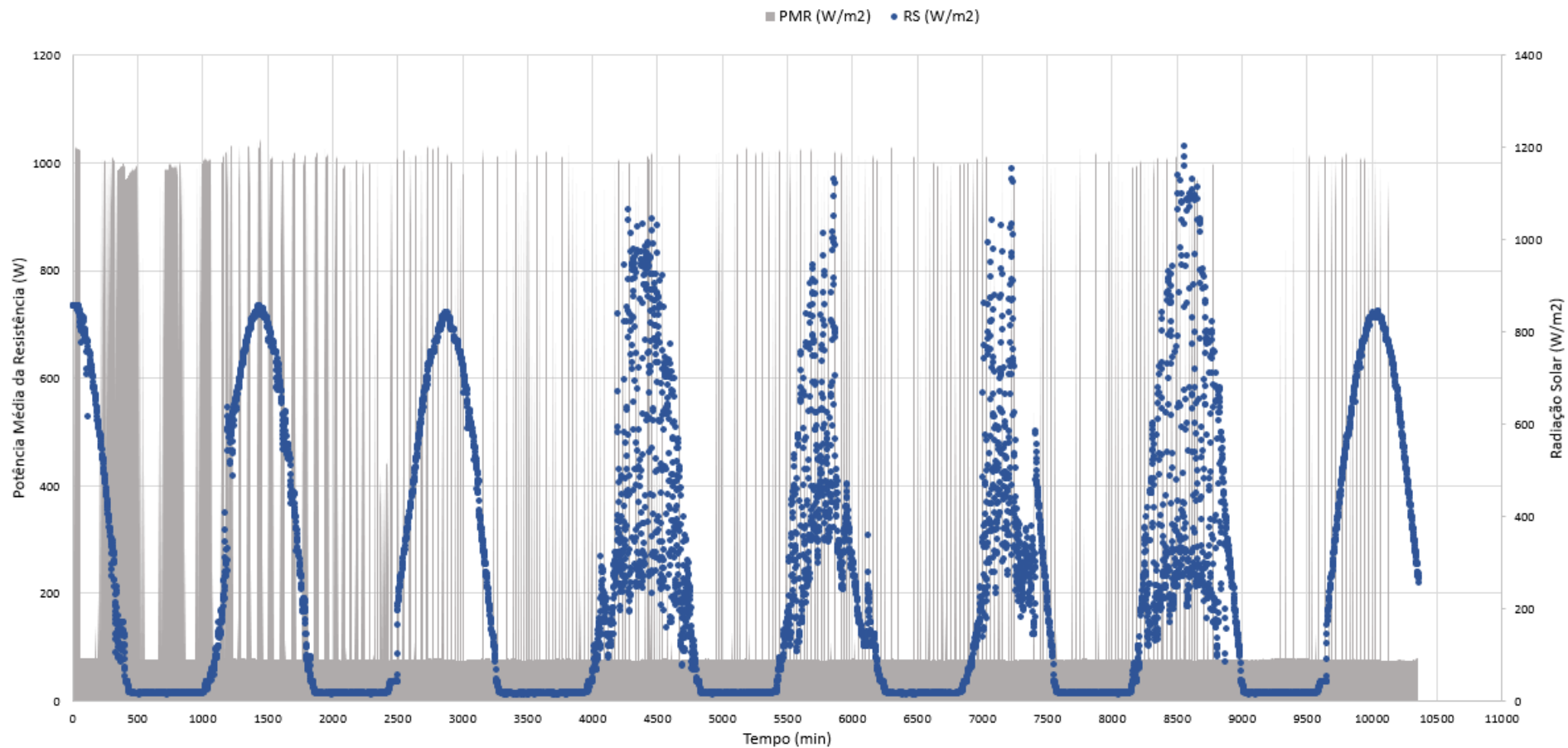


Figura 35 - Evolução de Radiação solar e Potência Média no ensaio de secagem de Bagaço de Maçã.

5.2.2 Ensaio com Couve-Galega

Nas figuras 36 e 37 são apresentados alguns dos dados recolhidos durante o ensaio de secagem de couve-galega no secador solar híbrido. Note-se que este ensaio decorreu durante o mês de Agosto sob condições atmosféricas bastante adequadas ao aproveitamento da energia solar. O céu apresentou principalmente dias claros com quase nenhuma nebulosidade. Para além dos dados representados, foram ainda registadas as temperaturas e humidades relativas em diferentes níveis no interior do secador e, em particular, na entrada e na saída de ar do secador.

A duração total deste ensaio foi de 9 dias, no entanto, após a análise dos dados recolhidos foi possível dar o ensaio por terminado ao fim 7 dias (10050 minutos). O critério para considerar o ensaio terminado, mencionado anteriormente, foi o não se verificar perda de massa nas amostras ao longo de um período de 24 horas.

Nas figuras pode-se observar a evolução das seguintes variáveis ao longo dos 7 dias: temperatura no interior do secador (Tint), humidade relativa no interior do secador (HR), temperatura do ambiente exterior (Text), teor de humidade do produto (TH), potência elétrica média registada a cada minuto (PMR) e irradiação global horizontal (RS). Pode-se observar que o produto apresentava um teor humidade inicial de 89,5% e terminou com um teor de humidade de equilíbrio de 5%. A humidade relativa do ar, ao contrário do ensaio de bagaço de maçã, nunca esteve perto da saturação ao longo do ensaio, no entanto, terminou também por volta dos 10%. Em relação à temperatura interior, estes valores foram registados a meio do secador, entre as caixas com as amostras, e apresentou uma ligeira tendência crescente para o mesmo período de cada dia, tendo atingido valores máximos de 40°C perto do final do ensaio. Os valores da potência elétrica são valores médios registados a cada minuto e é possível observar um maior consumo nos primeiros dias do ensaio, bem como o consumo associado aos componentes do secador sempre ligados, como o ventilador, que, como mencionado anteriormente, foi de cerca de 77 W. Já os valores da irradiação solar refletem as condições atmosféricas verificadas, com valores geralmente a rondar os 800 W/m² e onde se verificou radiação direta em todos os dias.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

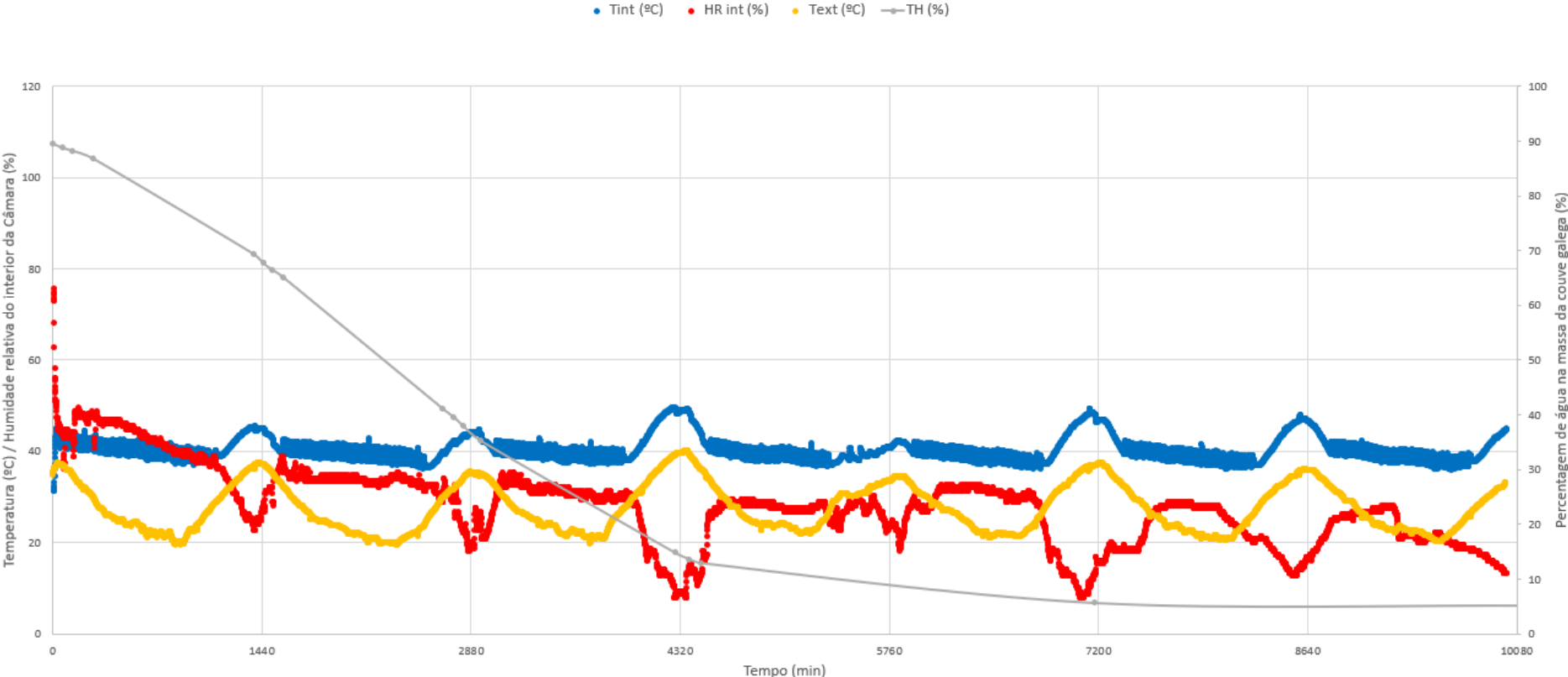


Figura 36 - Evolução de Temperatura, Humidade e Massa no ensaio de secagem de Couve-Galega

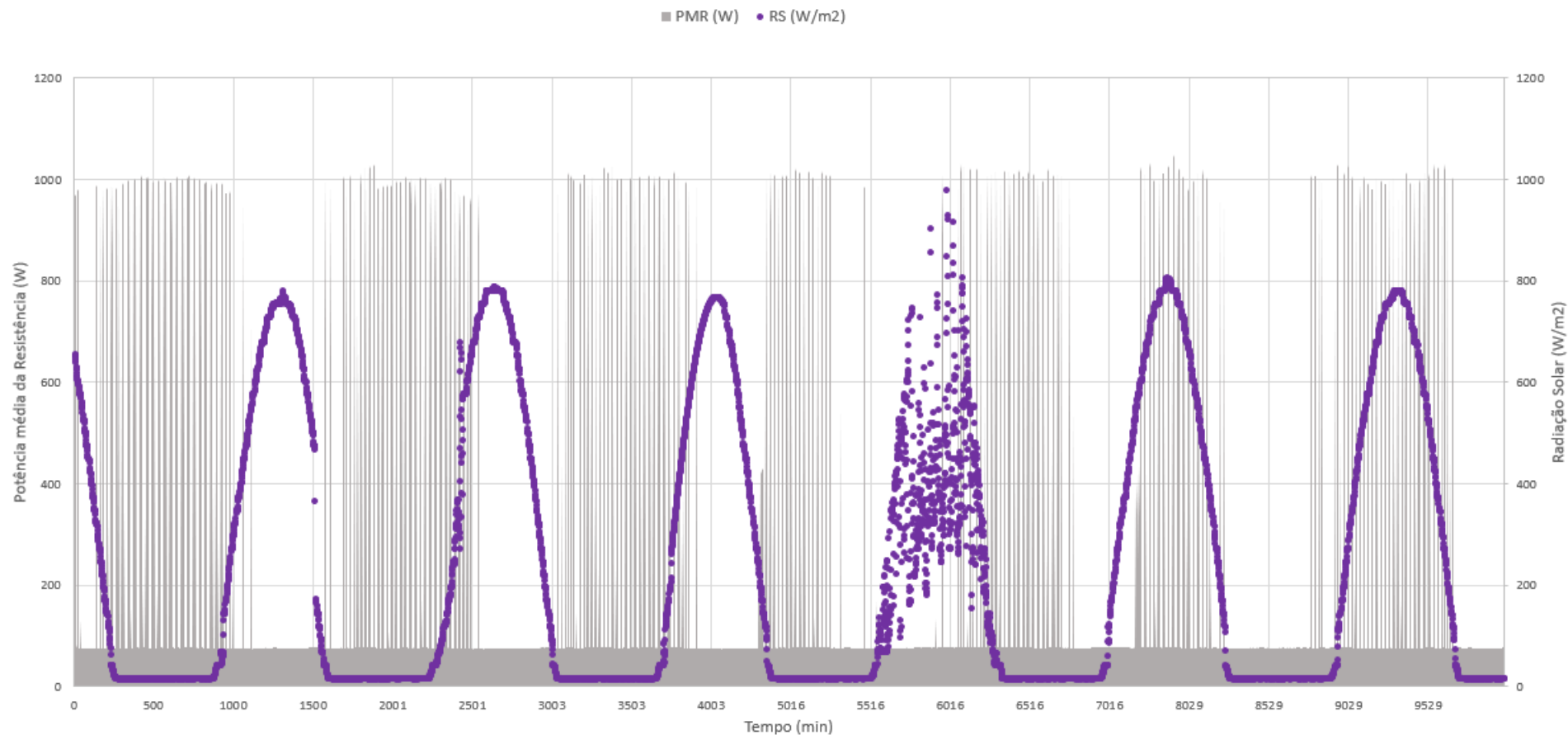


Figura 37 - Evolução de Radiação solar e Potência Média no ensaio de secagem de Couve-Galega.

5.2.3 Determinação do coeficiente global de transferência de calor

Para se proceder à análise energética do secador foi primeiro necessário avaliar as perdas térmicas pela envolvente do volume de controlo. Para tal decidiu-se aplicar o balanço de energia exposto no capítulo 3 aos períodos noturnos. Nestes períodos, por não haver energia solar, foi possível definir as perdas térmicas como incógnita.

Estabeleceu-se que o período noturno a analisar seria das 00:00 às 05:00 horas pois foi nesse período que se verificou uma maior estabilidade das condições exteriores: temperatura e humidade relativa. Para atenuar as flutuações das condições no interior, provocadas pelo controlo termostático, foram feitas médias de 30 em 30 min a todos os dados medidos (temperaturas, humidades e potências).

Finalmente, tendo em conta o período inicial transiente que se nota no início de todos os ensaios, em particular no ensaio de bagaço de maçã, para a avaliação das perdas térmicas foram utilizados apenas os dados a partir do minuto 6480.

Como foi referido no capítulo 3, o balanço de energia ao ar de secagem pode ser obtido da diferença entre a energia que entra e a energia que sai. No entanto, como só foram considerados os períodos noturnos, o valor de Q_{solar} é nulo e o balanço toma a seguinte forma:

$$\dot{E}_{ele} + \dot{E}_{ar\ ent} + \dot{E}_{\acute{a}gua} - \dot{Q}_{perdas} + \dot{E}_{ar\ sai} = 0 \quad (24)$$

Resolvendo em ordem a $U \times A$, vem:

$$U \times A = \frac{\dot{E}_{ele} + \dot{m}(h_{ent} - h_{sai}) + \dot{m}_g h_g}{(T_{int} - T_{ext})} \quad [W/K] \quad (25)$$

Sendo que a área do interior do secador é constante e o nosso objetivo final não é um coeficiente global de transferência de calor o seu valor é irrelevante numa questão de cálculos.

Tabela 3 - Valores de $U \times A$ no ensaio de bagaço de maçã

Tempo (min)	Pmédia (W)	Energia massa (W)	Energia vapor (W)	Perdas (W)	Text (°C)	Tint (°C)	$U \times A$ (W/K)
6181-6481	405,98	368,82	16,479	53,64	15,87	39,44	2,277
7621-7921	397,25	359,85	13,077	50,48	15,90	39,17	2,169
9061-9361	412,69	365,81	10,788	57,67	15,46	39,35	2,415
10502-10802	426,36	373,44	8,022	60,95	14,78	39,57	2,459
11943-12243	419,05	369,55	7,971	57,47	15,01	39,06	2,389
13384-13684	408,80	365,87	6,849	49,78	15,68	39,40	2,098
14824-15124	405,81	361,60	6,733	50,93	15,05	39,63	2,072
16264-16564	399,43	354,66	6,277	51,05	15,31	38,86	2,168
17704-18004	404,62	358,81	6,788	52,60	14,94	38,78	2,207

O valor médio obtido foi 2,2505 (W/K). Sendo esse o valor que será usado na análise energética global aos ensaios. A credibilidade deste valor foi confirmada através de cálculos de transferência de calor, utilizando as propriedades térmicas dos materiais das paredes do secador. Segundo o catálogo da HUURRE IBÉRICA, S.A.U, a condutibilidade térmica dos painéis sandwich em poliuretano com chapa de aço, que constituem as paredes do secador, varia entre 0,019 a 0,023 (W/mK). Utilizando a definição de coeficiente global de transferência de calor e o conceito de resistência térmica (Çengel et al., 2019):

$$U = \frac{1}{RA} \quad R = \frac{L}{kA} \quad [k/W] \quad (26)$$

Em que L é a espessura da parede e k é a de condutibilidade térmica do material.

Realizou-se o cálculo de $U \times A$ para com os diferentes valores de condutibilidade térmica e no final obteve-se uma média de 2,372 (W/K). Valor este muito parecido com o determinado pelo balanço de energia.

5.2.4 Análise energética dos ensaios

Com o valor do coeficiente global de transferência de calor foi então possível aplicar o balanço de energia aos dias inteiros de todo o ensaio e calcular a energia solar recebida pelo secador. Para isso, o ensaio foi mais uma vez discretizado em intervalos de tempo, desta vez de 15 minutos.

Efetuada as médias a todos os dados nesses intervalos de tempo, aplicou-se o balanço de energia deduzido no capítulo 3 para calcular a contribuição da energia solar para o processo (\dot{Q}_{solar}):

$$\dot{Q}_{solar} = \dot{m}(h_{sai} - h_{ent}) + UA(T_{int} - T_{ext}) - \dot{E}_{ele} - \dot{m}_g h_g \quad [W] \quad (27)$$

Na figura 38 é apresentada a representação gráfica dos resultados desta análise. São representados os valores médios da potência elétrica a cada 15 minutos e os valores da energia solar fornecida ao secador nos mesmos intervalos de tempo.

Observando esta figura verifica-se facilmente a existência de um conjunto de resultados anómalos desde o instante inicial até cerca do minuto 3500. De facto, neste período, os resultados obtidos para a contribuição da energia solar apresentam valores negativos. No entanto, passada essa fase, verifica-se que os resultados apresentam a configuração esperada. Nos períodos noturnos observa-se que a potência elétrica média se mantém praticamente constante (em torno de 450 W), mesmo entre diferentes dias, variando em função das condições exteriores e da carga térmica acumulada. Já a contribuição da energia solar apresenta valores nulos durante a noite e valores positivos nos períodos diurnos, que atingem um máximo de 348 W, quando o consumo de energia elétrica diminui.

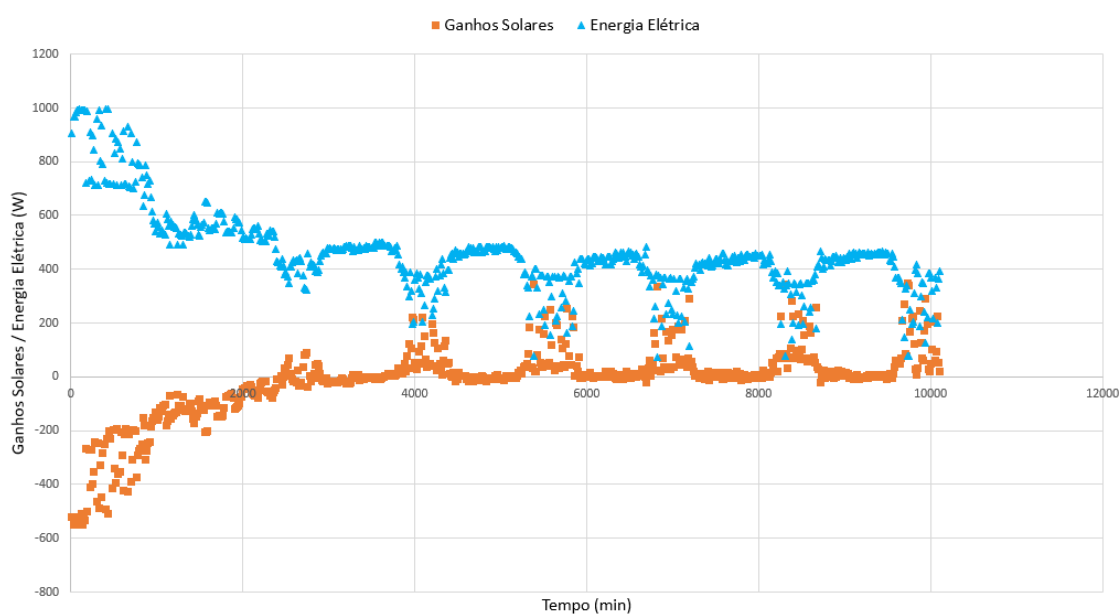


Figura 38 - Energia Elétrica e Ganhos Solares do Ensaio de Bagaço de Maçã

A dispersão dos pontos que se observa, em especial nos períodos diurnos, reflete naturalmente alguma instabilidade das condições atmosféricas, mas deve-se essencialmente ao controlo termostático da resistência elétrica. Apesar de se utilizarem valores médios para, de algum modo, atenuar esse efeito, ocorrem períodos discretos em que a resistência esteve muito tempo ligada e outros em que ligou pouco ou nenhum tempo.

Quanto aos resultados anómalos da fase inicial do ensaio, estes geraram grande preocupação e foram objeto de uma profunda análise, pesquisa e reflexão. A primeira conclusão a que se chega é que o balanço de energia aplicado não é válido nesse período do processo. Os valores negativos de energia solar mostram que o consumo de energia elétrica é superior ao avaliado pelo balanço, ou seja, existem fluxos de energia que não estão representados no balanço de energia. Esses fluxos estão certamente relacionados com o aumento da energia sensível (aquecimento), quer dos materiais que compõem o secador, quer do próprio produto a secar, mas também com a elevada quantidade de água líquida que o produto continha (o bagaço de maçã apresentava um aspeto bastante pastoso). Outro fator que pode ser parte das causas para esta anomalia é a energia de ativação do processo, que não foi tida em conta.

Na figura 39 é apresentada a representação gráfica dos resultados desta análise para o caso da couve-galega. Do mesmo modo, são representados os valores médios da potência elétrica a cada 15 minutos e os valores da energia solar fornecida ao secador nos mesmos intervalos de tempo.

Tendo em conta o período de verão em que este ensaio foi realizado, e as correspondentes condições atmosféricas, verifica-se que nos períodos diurnos não houve necessidade de energia elétrica para aquecimento do ar, pelo que o consumo de energia elétrica se reduziu ao valor dos consumos fixos (77 W). Já em relação aos resultados obtidos para a energia solar, estes apresentam o comportamento esperado. Na maior parte dos dias, apresentam uma típica evolução parabólica com o seu valor máximo a chegar aos 280 W.

Também neste ensaio se nota a existência de um período transiente no início do ensaio, mas de muito menor duração que no ensaio de bagaço de maçã. Ao fim do primeiro dia os resultados tornam-se estáveis e consistentes. Verifica-se, no entanto, uma

maior dispersão dos pontos que, mais uma vez, se deve essencialmente ao funcionamento termostático do equipamento.

Observando os períodos noturnos, verifica-se uma grande dispersão dos pontos correspondentes aos resultados obtidos para a energia solar. Estes oscilam entre -100 e 100 W, aproximadamente. Tal não significa, obviamente, que houve momentos com energia solar positiva e outros com energia solar negativa. Como esperado, foi possível confirmar que a resultante da soma destes pontos é nula. De facto, a existência de um intervalo de tempo, durante a noite, com um maior consumo de energia elétrica não tem reflexo direto nos outros fluxos de energia e isso faz com que, nesse intervalo de tempo, do balanço de energia resulte um valor de energia solar negativo. No entanto, no intervalo de tempo seguinte a resistência elétrica pode nem ligar, o que, do ponto de vista do cálculo, resulta num valor de energia solar positivo.

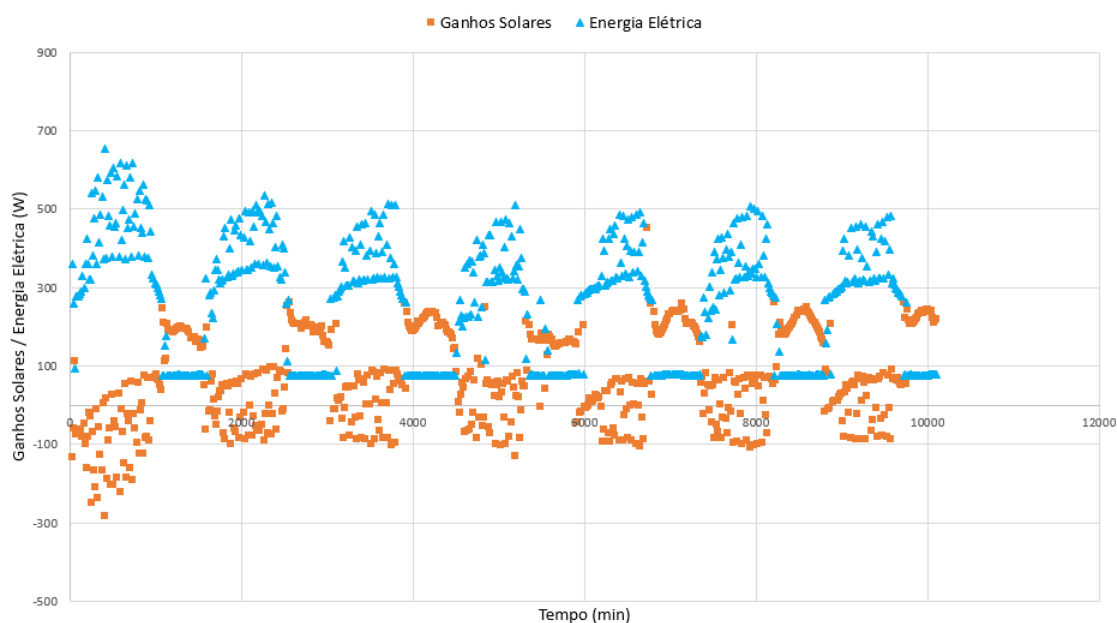


Figura 39 - Ganhos Solares e Energia Elétrica do Ensaio de Couve-Galega

5.2.5 Contribuição da energia solar

Sendo o objectivo deste trabalho a avaliação da contribuição da energia solar para o processo de secagem com este secador, torna-se necessário contabilizar o total de energia solar aproveitado e compará-lo com a energia elétrica consumida. Para tal, foi decidido não considerar o período transiente inicial e apenas foi contabilizada a energia

solar a partir do minuto 3644. A tabela 4 resume os resultados obtidos pelo somatório de toda a energia utilizada pelo secador durante este ensaio de secagem.

Tabela 4 - Contributo da Energia Solar para a Secagem

Ensaio de Bagaço de Maçã			
\dot{Q}_{solar} acumulada após minuto 3644 (kWh)	\dot{E}_{ele} acumulada após minuto 3644 (kWh)	$\dot{Q}_{solar} + \dot{E}_{ele}$ após minuto 3644 (kWh)	\dot{E}_{ele} acumulada em todo o ensaio (kWh)
4,93	42,23	47,16	77,75
Couve-Galega			
\dot{Q}_{solar} acumulada após minuto 959 (kWh)	\dot{E}_{ele} acumulada após minuto 959 (kWh)	$\dot{Q}_{solar} + \dot{E}_{ele}$ após minuto 959 (kWh)	\dot{E}_{ele} acumulada em todo o ensaio (kWh)
13,65	36,47	50,12	43,56

Analisando estes resultados verifica-se que a contribuição da energia solar (\dot{Q}_{solar}) para o processo de secagem foi 10,5% da energia total necessária ($\dot{Q}_{solar} + \dot{E}_{ele}$), no caso da secagem realizada em novembro. Já em relação à secagem realizada em agosto, o valor dessa contribuição foi de 27,2%. Isto reflete apenas os valores de energia contabilizados após o final do período transiente.

Se se extrapolar o valor da energia solar aproveitada para todo o tempo do processo, admitindo que a sua média será igual ao longo de todo o ensaio, os valores da contribuição solar passam a ser de 10,1%, para o ensaio em novembro, e de 34,5%, para o ensaio em agosto. Estes resultados comparam o valor da energia solar extrapolado para todo o tempo do ensaio com o valor total de energia elétrica consumido.

Note-se que estes resultados são válidos apenas para este secador em particular e são variáveis em função da localização, da orientação, das condições atmosféricas, das condições de controlo definidas e mesmo do produto a secar.

No âmbito deste trabalho não foi possível realizar as alterações necessárias ao balanço de energia para que este se torne representativo do período inicial. Tal implicaria a medição de mais variáveis como, por exemplo, das temperaturas do produto e das paredes do próprio secador. Tendo em conta o já extenso período temporal em que decorreu este trabalho e as condicionantes para a obtenção de mais produto para secar e de tempo para realizar novos ensaios, foi impossível realizar as correções necessárias. Apesar disso, considera-se que os resultados obtidos são promissores.

6. CONCLUSÃO

A utilização eficaz de energias renováveis como fonte de energia complementar para o processo da secagem passa pela o contínuo melhoramento dos métodos e sistemas utilizados.

Este estudo experimental teve como objetivo, por um lado, a comparação e análise dos resultados obtidos na secagem em condições laboratoriais e por outro, a utilização do conhecimento obtido nesses ensaios, para melhorar o processo de secagem em condições reais utilizando energia solar e quantificar a contribuição que a mesma pode ter para o processo da secagem.

Com isto, foram realizados diversos ensaios em câmara climática, dos quais se destacam ensaios com framboesas e mirtilos a temperaturas de 40, 50 e 60°C e 10% de humidade relativa. Estes ensaios iniciais demonstraram que quanto maior a temperatura menor o tempo de secagem, especialmente nas framboesas, mas também maior a perda de nutrientes.

Foram realizadas análises químicas aos produtos antes e depois da secagem e certos parâmetros como os teores de cinzas, gordura, proteína, compostos fenólicos totais e capacidade antioxidante foram determinados. Analisando os resultados retiraram-se algumas conclusões iniciais: para condições de secagem acima de 50°C existe um aumento significativo da perda de compostos fenólicos; o efeito da diminuição da atividade antioxidante com o aumento da temperatura de secagem é evidente de 40 para 50°C e praticamente não tem alteração para a temperatura de 60°C; os outros parâmetros sofrem também uma redução com o aumento da temperatura. Isto permitiu concluir que as condições de temperatura e humidade relativa mais adequadas para o processo de secagem, em que se atinge o teor de humidade final desejado, mantendo uma melhor qualidade do produto foi a 40°C e 10% de humidade relativa do ar. Evidente que apesar de estas serem as condições mais adequadas, o tempo de ensaio será maior.

Com o conhecimento adquirido dos ensaios em condições laboratoriais foram realizados ensaios em condições reais num secador solar do tipo indireto e híbrido. Utilizou-se a energia solar como fonte de energia complementar e retiraram-se conclusões sobre a sua contribuição para o processo de secagem.

Foram realizados ensaios para diferentes produtos, dos quais foram analisados os ensaios para a couve-galega e para o bagaço de maçã. A diferença de mês em que estes ensaios foram realizados é notada em diversos aspetos. Primeiramente no ensaio de couve-galega, realizado no mês de agosto, onde houve uma maior incidência de irradiação solar, o secador solar teve uma maior facilidade em manter temperaturas interiores elevadas atingindo em quase todos os dias picos acima de 50°C algo que não é visível no ensaio de bagaço de maçã realizado no mês de novembro, onde os dias apresentavam céus nublados e a incidência de irradiação solar era menor, pois este só atingiu picos semelhantes nos últimos 3 dias do ensaio.

Com todos os dados obtidos e cálculos realizados, obtiveram-se valores de contribuição de energia solar para os dois ensaios. Os valores de contribuição da energia solar para o processo de secagem obtidos foram 10,5% no ensaio de bagaço de maçã e 27,2% no ensaio de couve-galega. Esta diferença mais uma vez pode ser explicada pela diferença de mês em que os ensaios foram realizados. Daqui pode-se concluir que nos meses de maior irradiação a contribuição da energia solar será maior e poderá chegar perto de um terço da energia total consumida pelo secador.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Neste presente trabalho o objetivo principal foi contribuir para o estudo da utilização de energias renováveis, neste caso energia solar, no processo de secagem de diferentes produtos, em diferentes condições (diferentes estações). No entanto, devido a diversos fatores que influenciam o processo de secagem, tais como, a presença intermitente de energia solar ao longo do dia, a variação da temperatura e humidade relativa do ar, o teor de humidade inicial do produto, entre outros, é necessário a continuação do estudo deste tópico e com isso, realização de novos ensaios de secagem.

Com isto sugere-se os seguintes trabalhos futuros: os mesmos produtos em diferentes alturas do ano para formar uma ideia mais clara sobre como diferentes condições afetam não só

CONCLUSÃO

a contribuição da energia solar como também o tempo necessário para realizar o processo de secagem e a qualidade do produto final; produtos com teores de humidade superiores e inferiores aos do presente trabalho, de forma a analisar e melhorar alguns aspetos do ensaio, tais como, alteração do revestimento do secador solar, aumento ou diminuição do caudal volúmico de ar de entrada, localização dos próprios sensores que poderão permitir retirar conclusões mais claras sobre o ensaio, entre outros.

Outros trabalhos futuros poderão dar uma continuação ao estudo do balanço de energia realizado no secador onde se poderá aprofundar o mesmo considerando todas as variáveis e com isso realizar o balanço em regime transiente.

Em relação aos ensaios em Câmara climática, apesar de não serem o foco principal do presente trabalho, existem também algumas sugestões sobre trabalhos futuros. Como se mencionou acima, os ensaios a 40°C de temperatura 10% de humidade apresentaram os melhores resultados no que toca à redução de gorduras, compostos fenólicos e atividade antioxidante. No entanto estas conclusões não envolvem ensaios a 30% de humidade relativa por falta de fiabilidade nos resultados, pelo que a realização de novos ensaios nessas condições poderá levar a conclusões diferentes.

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS

- Alves, S. B. (2014). *Estudo teórico e experimental do processo de secagem do abacate (Persea americana Mill)* [Tese de doutoramento, Universidade Federal da Paraíba].
<https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/7576>
- Ayensu, A. (1997). Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Solar Energy*, 59(4–6), 121–126. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(96\)00130-2](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(96)00130-2)
- Belessiotis, V., & Delyannis, E. (2011). Solar drying. *Solar Energy*, 85(8), 1665–1691.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.001>
- Boisrobert, C. E. (2010). *Ensuring global food safety: Exploring global harmonization* (1st ed). Elsevier/Academic Press.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 28(1), 25–30.
[https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Catorze, C., Tavares, A. P., Cardão, P., Castro, A., Silva, M. E., Ferreira, D. W., Lopes, S., & Brás, I. (2022). Study of a solar energy drying system—Energy savings and effect in dried food quality. *Energy Reports*, 8, 392–398.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.070>
- Celestino, S. M. C. (2010). *Princípios de Secagem de Alimentos*.
<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/883845/principios-de-secagem-de-alimentos>
- Çengel, Y. A., Boles, M. A., & Kanoglu, M. (2019). *Thermodynamics: An engineering approach* (Ninth edition). McGraw-Hill Education.

REFERÊNCIAS

- Chen, Y., & Martynenko, A. (2013). Computer Vision for Real-Time Measurements of Shrinkage and Color Changes in Blueberry Convective Drying. *Drying Technology*, 31(10), 1114–1123. <https://doi.org/10.1080/07373937.2013.775587>
- Chojnacka, K., Mikula, K., Izydorczyk, G., Skrzypczak, D., Witek-Krowiak, A., Moustakas, K., Ludwig, W., & Kułazyński, M. (2021). Improvements in drying technologies—Efficient solutions for cleaner production with higher energy efficiency and reduced emission. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128706. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128706>
- Doymaz, I. (2009). THIN-LAYER DRYING OF SPINACH LEAVES IN A CONVECTIVE DRYER. *Journal of Food Process Engineering*, 32(1), 112–125. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2007.00205.x>
- Efrain, P., Pezoa-García, N. H., Jardim, D. C. P., Nishikawa, A., Haddad, R., & Eberlin, M. N. (2010). Influência da fermentação e secagem de amêndoas de cacau no teor de compostos fenólicos e na aceitação sensorial. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 30, 142–150. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612010000500022>
- Ekechukwu, O. V., & Norton, B. (1997). Experimental studies of integral-type natural-circulation solar-energy tropical crop dryers. *Energy Conversion and Management*, 38(14), 1483–1500. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(96\)00102-1](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(96)00102-1)
- Ekechukwu, O. V., & Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems II: An overview of solar drying technology. *Energy Conversion and Management*, 40(6), 615–655. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00093-4](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00093-4)
- Elias, M. C., de Oliveira, M., & Vanier, N. L. (2017). *TECNOLOGIAS DE PRÉ-ARMAZENAMENTO, ARMAZENAMENTO E CONSERVAÇÃO DE GRÃOS*. 102.

REFERÊNCIAS

- Erbay, Z., & Icier, F. (2010). A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling, and Experimental Results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 441–464. <https://doi.org/10.1080/10408390802437063>
- Fernandes, P. A. R., Ferreira, S. S., Bastos, R., Ferreira, I., Cruz, M. T., Pinto, A., Coelho, E., Passos, C. P., Coimbra, M. A., Cardoso, S. M., & Wessel, D. F. (2019). Apple Pomace Extract as a Sustainable Food Ingredient. *Antioxidants*, 8(6), 189. <https://doi.org/10.3390/antiox8060189>
- Ferreira, D., Guyot, S., Marnet, N., Delgadillo, I., Renard, C. M. G. C., & Coimbra, M. A. (2002). Composition of Phenolic Compounds in a Portuguese Pear (*Pyrus communis* L. Var. S. Bartolomeu) and Changes after Sun-Drying. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(16), 4537–4544. <https://doi.org/10.1021/jf020251m>
- Galvani, F., & Gaertner, E. (2006). *Adequação da Metodologia Kjeldahl para determinação de Nitrogênio Total e Proteína Bruta*. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/812198/adequacao-da-metodologia-kjeldahl-para-determinacao-de-nitrogenio-total-e-proteina-bruta>
- Gaspar, I., Ramalho, R., & Muteia, H. (2017). O desperdício alimentar em Portugal: Qual o papel do Nutricionista? *Acta Portuguesa de Nutrição*, 11, 42–45. <https://doi.org/10.21011/apn.2017.1107>
- Ghassemi, M., & Shahidian, A. (2017). *Nano and bio heat transfer and fluid flow*. Academic Press, an imprint of Elsevier.
- Guiné, R. de P. F., & Barroca, M. J. (2017). Drying Kinetics in Solar Drying. Em O. Prakash & A. Kumar (Eds.), *Solar Drying Technology* (pp. 317–355). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3833-4_10
- Isengard, H. D. (1995). Rapid water determination in foodstuffs. *Trends in Food Science & Technology*, 6(5), 155–162. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(00\)89024-X](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(00)89024-X)

REFERÊNCIAS

- Isengard, H. D. (2001). Water content, one of the most important properties of food. *Food Control*, 12(7), 395–400. [https://doi.org/10.1016/S0956-7135\(01\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0956-7135(01)00043-3)
- Islam, R., Ho, J., & Mujumdar, A. (2021). *ESTIMATION OF DRYING RATES USING LIQUID DIFFUSION MODEL - EFFECTS OF MULTIPLE MODES OF HEAT TRANSFER*.
- Keey, R. B. (1972). *Drying: Principles and Practice* (First Edition). Pergamon Press, Oxford; Library of Congress Catalog Card No.72-82730. <https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=2rkgBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Keey#v=onepage&q=Keey&f=false>
- Koyuncu, T. (2006). An Investigation on the performance Improvement of greenhouse-type agricultural dryers. *Renewable Energy*, 31(7), 1055–1071. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.05.014>
- Levine, H., & Slade, L. (1991). *Water Relationships in Foods Advances in the 1980s and Trends for the 1990s*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0664-9>
- Mathlouthi, M. (2001). Water content, water activity, water structure and the stability of foodstuffs. *Food Control*, 12(7), 409–417. [https://doi.org/10.1016/S0956-7135\(01\)00032-9](https://doi.org/10.1016/S0956-7135(01)00032-9)
- Md. Raisul Islam, J.C. HO, & A.S. Mujumdar. (2021). *ESTIMATION OF DRYING RATES USING LIQUID DIFFUSION MODEL – EFFECTS OF MULTIPLE MODES OF HEAT TRANSFER*. https://www.researchgate.net/profile/A_Mujumdar/publication/252503604_ESTIMATION_OF_DRYING_RATES_USING_LIQUID_DIFFUSION_MODEL_-_EFFECTS_OF_MULTIPLE_MODES_OF_HEAT_TRANSFER/links/564c93ff08ae020ae9fabf5c.pdf
- Mujumdar, A. S. (2012). *Modern drying technology. 4: Energy savings*. Wiley-VCH.
- Mujumdar, A. S., & Devahastin, S. (2000). *FUNDAMENTAL PRINCIPLES OF DRYING*.

REFERÊNCIAS

- Nukulwar, M. R., & Tungikar, V. B. (2021). A review on performance evaluation of solar dryer and its material for drying agricultural products. *Materials Today: Proceedings*, 46, 345–349. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.354>
- Puzzi, D., & Andrade, A. N. de. (2000). *Abastecimento e armazenagem de grãos*. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola.
- Ribeiro, E. P., & Seravalli, E. A. G. (2007). *Química de alimentos*. Instituto Maúá de Tecnologia Edgard Blucher.
- Ruan, R. R., & Chen, P. L. (1998). *Water in foods and biological materials: A nuclear magnetic resonance approach*. Technomic Pub. Co.
- Simal, S., Rosselló, C., Berna, A., & Mulet, A. (1998). Drying of shrinking cylinder-shaped bodies. *Journal of Food Engineering*, 37(4), 423–435. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00095-8](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00095-8)
- Soares, S. E. (2002). Ácidos fenólicos como antioxidantes. *Revista de Nutrição*, 15(1), 71–81. <https://doi.org/10.1590/S1415-52732002000100008>
- Stenmarck, Å., Jensen, C., Quedsted, T., & Moates, G. (2016). *Estimates of European food waste levels*. IVL Swedish Environmental Research Institute.
- Tavares, A., Brás, I., & Silva, M. E. (2020). Valorização de produtos alimentares sazonais Parte I. *Millenium - Journal of Education, Technologies*, 143-149 Páginas. <https://doi.org/10.29352/MILL0207E.16.00375>
- Thyberg, K. L., & Tonjes, D. J. (2016). Drivers of food waste and their implications for sustainable policy development. *Resources, Conservation and Recycling*, 106, 110–123. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.11.016>
- Tiwari, A. (2016). A Review on Solar Drying of Agricultural Produce. *Journal of Food Processing & Technology*, 7(9). <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000623>

REFERÊNCIAS

- Troller, J. (2014). *Water Activity and Food*. Elsevier Science.
<https://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=1174090>
- Viseu Climate, Weather By Month, Average Temperature (Portugal)*—Weather Spark. (sem data). Obtido 14 de julho de 2023, de <https://weatherspark.com/y/32854/Average-Weather-in-Viseu-Portugal-Year-Round>
- Wiset, L., Srzednicki, G., Driscoll, R. H., Nimmuntavin, C., & PlangpinSiwapornrak. (2001). Effects of High Temperature Drying on Rice Quality. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development. Manuscript FP 01 003. Vol. III.*

APÊNDICE A

Ensaio de verificação das balanças

A medição dos valores da massa das amostras é um dos principais procedimentos que permitem o correto desenvolvimento do presente projeto. Para a verificação das balanças utilizaram-se três pesos padrão de 100, 50 e 2g, como mostra a figura 40. O objetivo foi verificar a consistência das pesagens da balança, isto é, a diferença de resultados para diferentes pesagens.



Figura 40 - Pesos padrão

APÊNDICE A

Tabela 5 - Valores obtidos para diferentes pesos padrão

Modelo Balança					Kern 440-47N (Max 2000g; 0,1g)		
Medição					Peso 1 (g)	Peso 2 (g)	Peso 3 (g)
Data	Hora	T (°C)	HR (%)		100	50	2
16/04/2021	11:24	18,9	40,8		99,90	49,90	1,90
19/04/2021	14:11	20,2	53,6		99,80	49,90	1,90
20/04/2021	11:15	19,2	58,4		99,80	49,90	1,90
21/04/2021	12:45	19,5	58,5		99,90	49,80	2,00
22/04/2021	11:15	18,7	64,2		99,90	49,80	1,90
23/04/2021	12:30	21,3	57,8		99,90	49,90	1,90
25/04/2021	12:02	19,0	66,3		99,90	49,90	2,00
26/04/2021	11:54	19,3	59,3		99,90	49,90	1,90
27/04/2021	15:14	19,8	67,0		99,90	49,90	2,00

Tabela 6 - Resumo dos valores obtidos para pesos padrão

	Kern 440-47N (Max 2000g; 0,1g)		
	A1		
	Peso 1 (g)	Peso 2 (g)	Peso 3 (g)
	100	50	2
Média	99,88	49,88	1,93
Desvio-Padrão	0,04	0,04	0,05
Maior Desvio Absoluto	0,02	0,02	0,07

As tabelas acima mostram que para pesos com maior massa, a balança apresenta valores muito aproximados do valor real, desvios-padrões baixos e uma consistência alta com um maior desvio a ser registrado de 0,02g.

APÊNDICE B

Introdução de uma fonte de alimentação no processo

Devido aos problemas nos ensaios do secador solar provocados pela ausência de sol durante a noite foi realizada uma alteração à montagem. O painel térmico foi mantido para aquecimento do ar de entrada, no entanto, o painel fotovoltaico, que alimentava o ventilador foi desligado e foi ligada uma fonte de alimentação diretamente à ventoinha de forma a ter um caudal de ar do exterior constante. Continuou-se a usar a energia solar, mas apenas para o aquecimento do ar e não de fornecimento direto de energia solar.

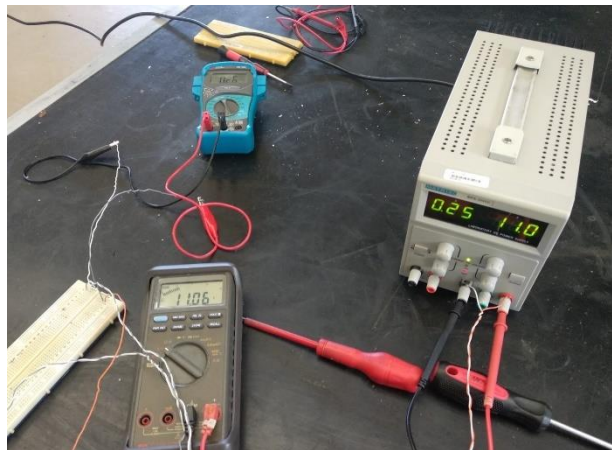


Figura 41 - Sistema de ligação de fonte de alimentação a secador solar.

APÊNDICE C

Calibração dos sensores utilizados no secador solar

Para os termopares tipo K foi utilizado um termómetro de mercúrio. Foi aquecido um recipiente de água e foram colocados os sensores e o termómetro de modo que ficassem próximos, sem que interferissem uns com os outros. A água foi aquecida e foram registados os valores para os diversos dispositivos. Foram feitas várias curvas de calibração utilizando o termómetro de mercúrio e cada um dos sensores.

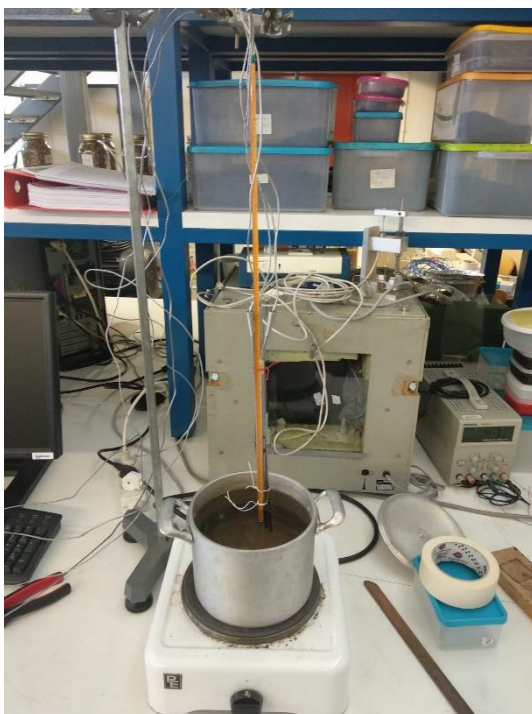


Figura 42 - Sistema de calibração de Termopares

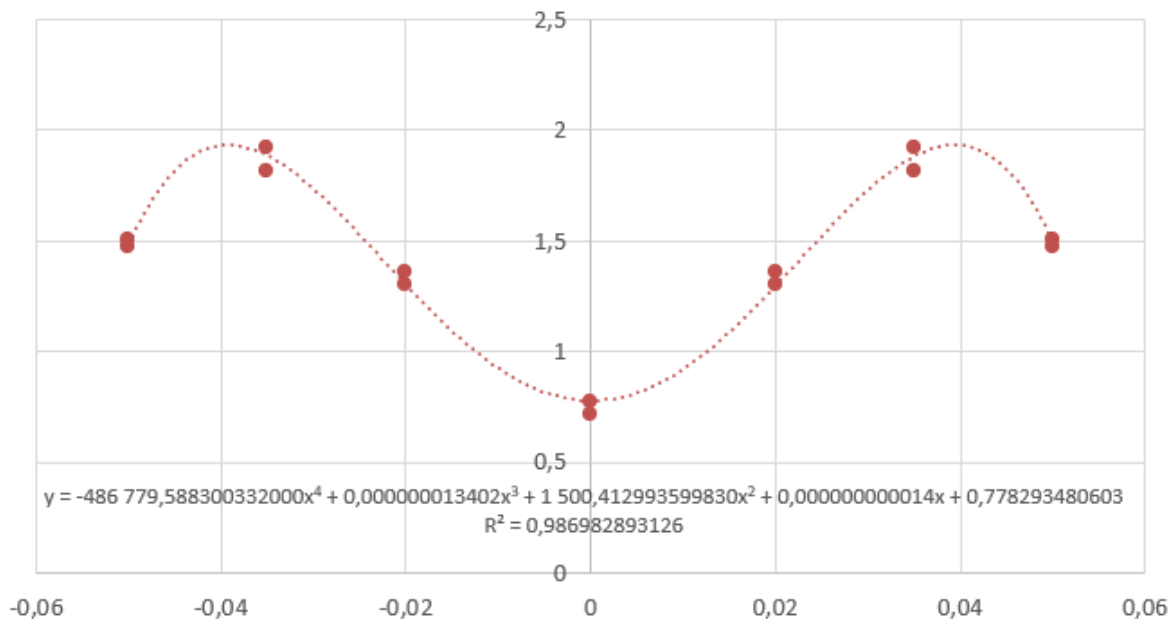
Para os higrómetros foi utilizado um método similar. Os sensores foram colocados dentro da câmara climática juntamente com um sensor de referência. A humidade relativa interior foi definida e foram medidos os valores ao longo do tempo e comparados os valores definidos com os valores do sensor de referência e higrómetros.

APÊNDICE D

Determinação do caudal do ventilador

Podendo regular a tensão de alimentação da fonte de alimentação, foram realizados ensaios de cálculo do caudal de ar para diferentes tensões de alimentação.

Os ensaios consistiam no uso de um anemómetro de fio quente dentro do secador. Foi utilizado um tubo de 1 m de comprimento fixado de modo estanque sobre o ventilador, com um diâmetro interior de 11 cm, diâmetro este ligeiramente superior ao do próprio ventilador. Deste modo todo o ar debitado pelo ventilador era canalizado pelo tubo. Foi feito um furo no tubo a 80 cm da entrada para permitir a introdução do anemómetro. Este foi utilizado para medir a velocidade do escoamento em diversos pontos, partindo do centro do tubo na direção da sua superfície, para deste modo obter o perfil de velocidades que revelou ter a configuração de um polinómio de 4º grau.



Para determinar a velocidade média do ar dentro do tubo com base no perfil de velocidade fornecido pela função $y = -486\,779,588300332000x^4 + 0,000000013402x^3 + 1\,500,412993599830x^2 + 0,000000000014x + 0,778293480603$, onde r é o raio, e considerando que o tubo possui uma secção circular com raio $R = 0,0535m$, temos de integrar a função do perfil de velocidades desde o centro do tubo

APÊNDICE D

até ao raio interior, mas também, integrar ao longo de toda a secção entre 0 e 2π , ou seja, um integral duplo.

Estes cálculos permitiram determinar a velocidade média do escoamento e, por fim, o caudal volúmico. Este procedimento foi repetido para diferentes tensões de alimentação, no entanto, o valor de tensão utilizado ao longo dos ensaios foi 6 (V) pelo que, o valo do caudal volúmico que transportou o ar de secagem foi de $0,01435 \text{ (m}^3/\text{s)}$.



Figura 43 - Ensaio de determinação do caudal de ar