

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

PEDRO LUIZ DE MATOS PASCO

**DIMENSIONAMENTO DE UM SECADOR HÍBRIDO SOLAR-ELÉTRICO PARA A SECAGEM DE
ERVAS AROMÁTICAS, MEDICINAIS E CONDIMENTARES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2021

PEDRO LUIZ DE MATOS PASCO

**DIMENSIONAMENTO DE UM SECADOR HÍBRIDO SOLAR-ELÉTRICO PARA A
SECAGEM DE ERVAS AROMÁTICAS, MEDICINAIS E CONDIMENTARES**

**Design of a hybrid solar-electric dryer for drying aromatic, medicinal and
spice herbs**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk

PATO BRANCO

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dimensionamento De Um Secador Híbrido Solar-Elétrico Para A Secagem De Ervas Aromáticas, Medicinais E Condimentares

PEDRO LUIZ DE MATOS PASCO

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 03/12/2021 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk
(UTFPR – Departamento de Mecânica
Orientador

Prof. Dr. Fabiano Ostapiv
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. Dr. Adelino Carlos Maccarini
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família e ao grande amor da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe Noemi de Matos por todo o apoio nesta jornada e também por ser o meu maior exemplo de força e perseverança. Agradeço à minha querida tia Lavínia de Matos por acreditar incondicionalmente que eu conseguiria. Ao meu irmão Paulo José de Matos por todo o apoio. À minha parceira inseparável de todos esses anos, Suelen Berndt. Aos grandes amigos que eu tive o privilégio de fazer ao longo da graduação, que foram importantíssimos por todo o companheirismo ao longo desta fase. E por fim, gostaria de dar os meus mais sinceros agradecimentos ao meu orientador, Professor Dr. Paulo Cezar Adamczuk por toda a ajuda, paciência e disponibilidade ao longo da realização deste trabalho.

EPÍGRAFE

In the great battles of life, the first step to victory is the desire to win.” (GANDHI, Mahatma).

Nas grandes batalhas da vida, o primeiro passo para a vitória é o desejo de vencer. (GANDHI, Mahatma).

RESUMO

Pasco, Pedro L. M. Dimensionamento de Um Secador Híbrido Solar-elétrico Para a Secagem de Ervas Aromáticas, Medicinais e Condimentares. 2021. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

O desenvolvimento deste trabalho teve como finalidade a realização de uma abordagem teórica visando identificar os parâmetros adequados para a realização de um projeto de secador híbrido solar-elétrico, aplicável ao processo de secagem de plantas aromáticas, medicinais, resultando no dimensionamento de um secador que obtenha produtos de melhor qualidade pós processamento. Foram identificados na literatura os critérios críticos ao processo de secagem, além de características de funcionamento, parâmetros construtivos do equipamento e condições para dimensionamento dos principais componentes. Este trabalho tem por objetivo servir como apoio e ponto de partida para possíveis futuros trabalhos envolvendo a temática de secagem e construção de secadores para ervas aromáticas, medicinais e condimentares.

Palavras-chave: Secagem. Secador solar híbrido. Secagem indireta. Dimensionamento de secador. Ervas aromáticas, medicinais e condimentares.

ABSTRACT

Pasco, Pedro L. M. Design of a Hybrid Solar-Electric Dryer for Drying Aromatic, Medicinal and Spice Herbs. 2021. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

The development of this work aimed to carry out a theoretical approach to identify the appropriate parameters for the realization of a solar-electric hybrid dryer project, applicable to the drying process of aromatic and medicinal plants, resulting in the design of a dryer that obtains best quality post processing products. Critical criteria for the drying process were identified in the literature, in addition to operating characteristics, construction parameters of the equipment and conditions for dimensioning the main components. This work aims to serve as a support and starting point for possible works involving the theme of drying and construction of dryers for aromatic, medicinal and flavoring herbs.

Keywords Drying. Hybrid solar dryer. Indirect drying. Dryer sizing. Aromatic, medicinal and flavoring herbs.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- <i>Design</i> construtivo idealizado	16
Figura 2- Estrutura de desenvolvimento e construção do secador.....	18
Figura 3- Aplicações da energia solar	20
Figura 4- Irradiação global horizontal diária média anual.....	21
Figura 5- Componentes da irradiação solar devido à interações atmosféricas	22
Figura 6- Deslocamento da umidade durante a secagem.....	24
Figura 7- Processos de transferência de calor e massa durante a secagem.....	25
Figura 8- Exemplo ilustrativo de carta psicrométrica.....	30
Figura 9- Diagrama esquemático da classificação dos tipos de secadores solares..	32
Figura 10- Modelos usuais de secadores solares	33
Figura 11- Secador solar de secagem passiva (convecção natural).....	35
Figura 12- Secador solar de secagem ativa (convecção forçada).....	36
Figura 13-Secador híbrido solar-biomassa	37
Figura 14- Exemplo de secador solar de secagem direta	38
Figura 15- Exemplo de secador solar de secagem indireta	38
Figura 16- Exemplo de secador solar de secagem mista.....	39
Figura 17- <i>Designs</i> de coletores de placas planas.....	42
Figura 18- Mapa do local de referência para a coleta dos dados ambientais	46
Figura 19- Esquema de variáveis conhecidas e estipulada	47
Figura 20- Fenômenos representados na carta psicrométrica	50
Figura 21- Representação gráfica do processo e aquecimento simples	51
Figura 22- Identificação dos componentes do secador	52
Figura 23- Dimensões do secador solar.....	54
Figura 24- Bandejas para secagem	55
Figura 25- Dimensões do coletor solar.....	56
Figura 26- Inclinação de trabalho ideal do coletor.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Vantagem e desvantagem dos principais tipos de secadores solares	34
Tabela 2- Propriedades físicas do manjeriço	45
Tabela 3- Dados ambientais da cidade de realização do experimento	46
Tabela 4- Propriedades do ar no processo de secagem	47
Tabela 5- Propriedades do material que será desidratado	48
Tabela 6- Massa do produto e de umidade removidos	48
Tabela 7- Propriedades psicrométricas do ar de entrada do coletor	48
Tabela 8- Propriedades psicrométricas do ar de entrada da câmara	49
Tabela 9- Propriedades psicrométricas do ar na saída da câmara	49
Tabela 10- Dimensões internas da câmara de secagem	53
Tabela 11- Demanda energética necessária para a remoção da umidade	55
Tabela 12- Dados construtivos calculados para o coletor	56

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

β	Ângulo de inclinação do coletor solar	°
η	Eficiência do coletor	%
ρ	Densidade do fluido	kgm ⁻³
ρ_a	Densidade do ar	kgm ⁻³
ρ_m	Densidade das folhas de manjeriço	kgm ⁻³
ϕ	Latitude do local	°
ω	Razão de mistura	kg v.H ₂ O.kg ⁻¹ ar s.
ω_1	Razão de mistura na entrada no coletor	kg v.H ₂ O.kg ⁻¹ ar s.
ω_2	Razão de mistura na saída do coletor	kg v.H ₂ O.kg ⁻¹ ar s.
ω_3	Razão de mistura na saída da câmara	kg v.H ₂ O.kg ⁻¹ ar s.
ΔT	Varição temperatura de entrada e saída do secador	°C
A	Área da seção	m ²
A_c	Área de coletor	m ²
A_i	Altura interna da câmara de secagem	cm
C_c	Comprimento do coletor	cm
C_i	Comprimento interno da câmara de secagem	cm
C_p	Calor específico do produto	kJkg ⁻¹ K ⁻¹
C_{pa}	Calor específico do ar	kJkg ⁻¹ K ⁻¹
h	Entalpia	kJ.kg ⁻¹
h_1	Entalpia de entrada no coletor	kJ.kg ⁻¹
h_2	Entalpia de Saída do coletor	kJ.kg ⁻¹
h_3	Entalpia de Saída da câmara	kJkg ⁻¹
G	Radiação solar	Wm ⁻²
L_c	Largura do coletor	Cm
L_i	Largura interna da câmara de secagem	Cm
\dot{m}	Vazão mássica	kg s ⁻¹
m_a	Massa de vapor de ar seco	Kg
m_p	Massa do produto antes da secagem	Kg
m_{ps}	Massa do produto seco	Kg
m_R	Massa de umidade removida do produto	Kg
m_v	Massa de vapor de água	Kg
P	Pressão atmosférica	hPa
P_a	Pressão do ar seco	hPa

P_s	Pressão de vapor do ar saturado	hPa
P_{s1}	Pressão de vapor do ar saturado na entrada do coletor	hPa
P_{s2}	Pressão de vapor do ar saturado na saída do coletor	hPa
P_{s3}	Pressão de vapor do ar saturado na saída da câmara	hPa
P_v	Pressão de vapor do ar não saturado	hPa
P_{v1}	Pressão de vapor do ar não saturado na entrada	hPa
P_{v2}	Pressão de vapor do ar não saturado saída coletor	hPa
P_{v3}	Pressão de vapor do ar não saturado saída da câmara	hPa
\dot{Q}	Fluxo de calor necessário para retirada do vapor	W
t	Tempo de secagem	s
T	Temperatura do ambiente	°C
T_3	Temperatura saída da câmara	°C
T_u	Temperatura de bulbo úmido	°C
T_1	Temperatura de entrada no coletor	°C
T_2	Temperatura de saída do coletor	°C
T_3	Temperatura de saída da câmara	
U_i	Umidades inicial do produto	%
U_f	Umidades final do produto	%
U_{asb}	Umidade absoluta	g de vapor.m ⁻³
U_{as}	Umidade absoluta ar seco	g de vapor.m ⁻³
U_{av}	Umidade absoluta vapor	g de vapor.m ⁻³
U_e	Umidade específica	g de vapor.g ⁻¹ ar u.
UR	Umidade relativa	%
UR_1	Umidade relativa de entrada	%
UR_3	Umidade relativa na saída da câmara	%
V	Velocidade do fluido	ms ⁻¹
V_a	Vazão volumétrica	m ³ s ⁻¹
V_e	Volume específico	m ³ .kg ⁻¹
V_o	Volume ocupado	m ³ .
V_T	Volume total da câmara de secagem	m ³ .

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo Principal	17
1.1.2 Objetivos Específicos	17
1.2 JUSTIFICATIVA	17
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 ERVAS AROMÁTICAS, MEDICINAIS E CONDIMENTARES	19
2.2 USO DA ENERGIA SOLAR PARA A SECAGEM	20
2.2.1 Considerações sobre incidência solar	21
2.3 SECAGEM DE MATERIAL BIOLÓGICO	23
2.3.1 Aspectos do processo de secagem em folhas	23
2.3.2 Quantidade de umidade removida	26
2.3.3 Psicrometria	26
2.3.3.1 Propriedades do ar	26
2.3.3.2 Carta psicrométrica	29
2.4 SECADORES	30
2.4.1 Visão geral sobre secadores	30
2.4.2 Secagem solar	31
2.4.3 Classificação de secadores solares	32
2.4.3.1 Secador solar de secagem passiva	35
2.4.3.2 Secador solar de secagem ativa	35
2.4.3.3 Secador solar híbrido	36
2.4.3.4 Secador solar de secagem direta	37
2.4.3.5 Secador solar de secagem indireta	38
2.4.3.6 Secador solar de secagem mista	39

2.5	VARIÁVEIS PARA DIMENSIONAMENTO	39
2.5.1	Parâmetros da secagem	39
2.5.2	Coletor.....	41
2.5.3	Transferência de calor e massa	42
3	METODOLOGIA (MATERIAIS E MÉTODOS)	44
3.1	CONSIDERAÇÕES.....	44
3.1.1	Premissas iniciais.....	44
3.1.2	Variáveis conhecidas e estipuladas	45
3.1.3	Variáveis psicrométricas	48
4	DIMENSIONAMENTO	52
4.1.1	Câmara de secagem e estrutura do secador	53
4.1.2	Bandejas	54
4.1.3	Aquecimento e circulação de ar	55
4.1.4	Instrumentos	57
5	CONCLUSÕES	58
	REFERÊNCIAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

Atualmente com o refinamento dos processos produtivos, surgiu a demanda pela obtenção de produtos com qualidade cada vez mais elevada, realidade que também atinge os produtos agrícolas, onde o processo de secagem pode servir como uma boa alternativa para a melhoria da produtividade e competitividade em muitos produtos do segmento. Segundo Liberty e Okonkwo (2014), estima-se que em países em desenvolvimento as perdas de produção agrícola comprometam de alguma forma, cerca de 30% a 40% do total produzido. Neste cenário, para uma grande variedade de produtos é impossível atingir critérios satisfatórios de produtividade, armazenagem e durabilidade, sem a devida atenção aos métodos adequados de secagem. Sendo que dentre esta gama de produtos, as ervas aromáticas, ervas medicinais e condimentares destacam-se devido à volatilidade de seus princípios ativos, onde a remoção inadequada de sua umidade natural pode facilmente acarretar na deterioração ou até mesmo inutilização de tais produtos.

Secagem é uma etapa realizada antes do beneficiamento de muitos produtos de origem agrícolas, caracterizada como um processo síncrono de transferência de calor e massa, onde a umidade deve ser removida, de modo a haver equilíbrio entre a umidade do produto e do local de armazenamento, onde características como aparência e propriedades nutritivas não devem ser deterioradas (SILVA, LOPES, *et al.*, 2008). A secagem promove a remoção de quantidades relativamente pequenas de água do produto, por meio de sua evaporação, que acaba sendo retirada pelo ar ambiente (GEANKOPLIS, 1993).

O processo de secagem se faz necessário, pois inibe o crescimento e multiplicação dos microrganismos que causam a deterioração em diversos tipos de produtos agrícolas, já que esses organismos necessitam de percentuais de umidade superior a 10%. A retirada da água também diminui a reação de enzimas que degradam produtos de origem orgânica (GEANKOPLIS, 1993). Além disso, o processo de secagem apresenta as vantagens de aumentar a vida útil do produto conservando a maioria dos nutrientes. Também facilita o transporte, devido ao fato dos produtos secos serem mais leves, compactos e mais duráveis. É um processo em que o equipamento empregado é relativamente barato podendo ser facilmente fabricado pelo próprio agricultor, não demandando de operação por mão de obra

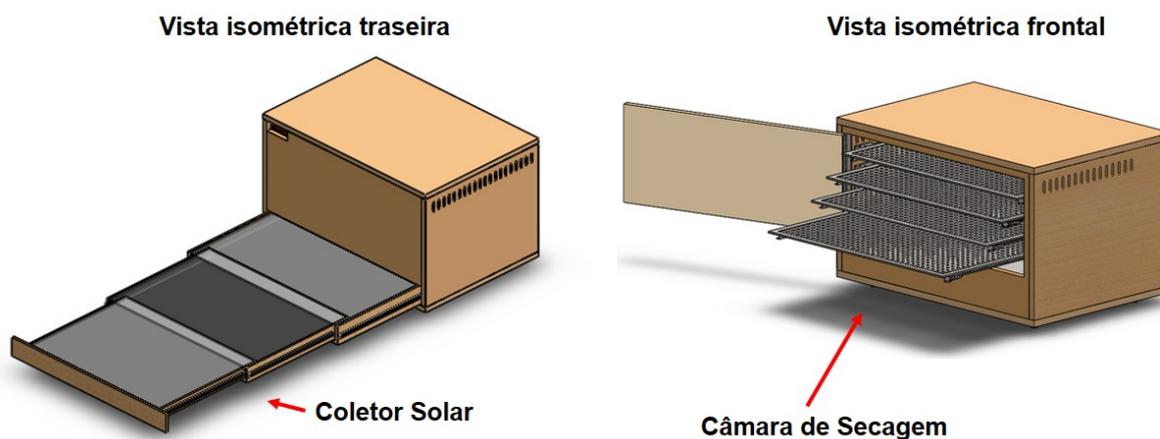
especializada e que promove a redução dos desperdícios pós colheita (EMBRAPA, 2010).

Existem inúmeras formas de realizar o processo de secagem que variam de acordo com as demandas produtivas, acarretando em diferentes *designs* construtivos de secadores, criados para atender cada uma dessas necessidades. Pensando-se na secagem de ervas aromáticas, medicinais e condimentares que segundo Ferreira e Candeias (2015), deve ocorrer em temperaturas entre 30 e 40°C, tem-se a oportunidade de desenvolvimento de um modelo de secador economicamente viável e sustentável que atenda aos parâmetros produtivos de qualidade.

Pensando nestes aspectos este trabalho trata do dimensionamento de um sistema de secagem híbrido solar-elétrico de pequeno porte, em que é possível reduzir o consumo de energia elétrica em relação a um secador elétrico comum, ao mesmo tempo em que reduz a variabilidade no fornecimento térmico que ocorre em um secador que faz uso apenas da energia térmica do sol, como por exemplo durante o período noturno ou em dias chuvosos. Oferecendo aos produtos uma secagem homogênea reduzindo os riscos de degradação (EKECHUKWU e NORTON, 1999).

A figura 1 ilustra o conceito de secador idealizado e explorado neste trabalho, em que o coletor solar retrátil fica acoplado sob a parte inferior da câmara de secagem, compartimento onde é posicionado o sistema de aquecimento por resistência elétrica e a ventoinha que forçará o fluxo de ar para o interior da câmara.

Figura 1- Design construtivo idealizado



Fonte: Autoria própria (2021).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Principal

Dimensionar um secador de pequeno porte, híbrido, alimentado por energia solar e elétrica, para a secagem adequada de ervas aromáticas, medicinais e condimentares, por meio do controle das variáveis do processo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar na bibliografia características construtivas e parâmetros de funcionamento pertinentes a secagem de ervas aromáticas, medicinais e condimentares;
- Definir variáveis de funcionamento adequadas para a secagem, e possíveis equipamentos para controle destas variáveis;
- Definir as características construtivas do equipamento para que atendam às condições de secagem;
- Definir variáveis necessárias ao dimensionamento;
- Dimensionar câmara de secagem, sistemas de aquecimento e sistema de circulação de ar;

1.2 JUSTIFICATIVA

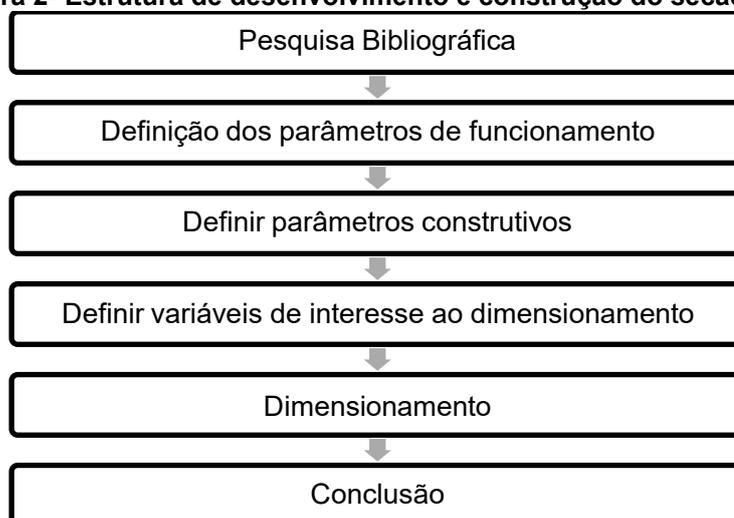
A secagem de ervas aromáticas, medicinais e condimentares é um processo que exige cautela, devido à natureza volátil de seus princípios ativos. Ao se retirar a umidade seguindo o percentual e o tempo de secagem recomendados, previne-se o aparecimento de microrganismos indesejados nos produtos, evitando deste modo a perda de matéria prima por contaminação (VIJAYSN, ARJUNAM e KUMAR, 2017). Em condições de umidades inferiores a 10%, o crescimento e proliferação de microrganismos é dificultada, além disso as reações enzimáticas ocasionadas pela presença da água nas folhas, que acarretam em degradação dos princípios ativos desejáveis ao produto, também são reduzidas com a retirada da umidade do produto (GEANKOPLIS, 1993).

O uso da energia proveniente do sol, empregada de maneira complementar à energia elétrica, torna os custos de operação de um secador híbrido mais baixos, sem apresentar as oscilações no fornecimento térmico comuns a um secador exclusivamente solar (EKECHUKWU e NORTON, 1999). Secadores convencionais demandam por um alto consumo de energia elétrica, devido ao fato de a secagem ser um processo de baixa eficiência térmica. Desta forma o uso de secadores híbridos apresenta-se como uma forma mais sustentável de realizar tal processo, sendo necessário o dimensionamento adequado do equipamento para obter maior controle das variáveis de secagem.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Neste capítulo são apresentados os conceitos abordados neste trabalho, assim como os objetivos e justificativas para a realização do mesmo. No Capítulo 2, conceitos da literatura sobre ervas aromáticas, ervas medicinais e condimentares, além de uso da energia solar, secagem de material biológico, secadores e transferência de calor e massa conceitos fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. No capítulo 3, são determinados os parâmetros de funcionamento e construção do protótipo. Por sua vez, o capítulo 4, aborda o dimensionamento do sistema de aquecimento, circulação de ar e câmara de secagem, tendo por fim o capítulo 5, que traz as considerações finais do trabalho realizado. A estrutura deste trabalho está ilustrada no diagrama da figura 2.

Figura 2- Estrutura de desenvolvimento e construção do secador



Fonte: Autoria própria (2021).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ERVAS AROMÁTICAS, MEDICINAIS E CONDIMENTARES

Plantas aromáticas são ervas geralmente usadas para a produção de óleos essenciais, aplicados pela indústria na aromatização de cosméticos, produtos de higiene, limpeza ou na indústria alimentícia. As plantas medicinais consistem em culturas que podem ser empregadas na prevenção ou combate de doenças, na forma de métodos caseiros ou em usos mais elaborados pela indústria farmacêutica, com produção em maior escala. Já as plantas condimentares são empregadas com a finalidade de agregar cor, sabor e aroma aos alimentos tanto em escala caseira quanto industrial. Essas ervas costumam ser caracterizadas pela sua aplicação principal, porém, existem ervas que se enquadram nas três aplicações (SENAR, 2017).

O cultivo de plantas aromáticas, medicinais e condimentares passou ao decorrer dos últimos anos a incorporar o uso de novas tecnologias, resultando em aumento da qualidade dos produtos e de seu valor agregado. Nesse sentido, um dos elementos mais significativos no estado do Paraná foi o refinamento das técnicas de secagem, tendo em vista que 90% do que é produzido no estado, passa pelo processo de secagem em secadores com aquecimento de ar. Porém, mesmo com essa evolução tecnológica, estes equipamentos ainda não atingem um grau de eficiência satisfatório, além de também não atingirem uma boa relação custo benefício, sendo necessário maior incentivo em estudos e parcerias para atender à crescente demanda por produtos e também por qualidade (JÚNIOR e SCHEFFER, 2014).

O Brasil apresenta grande demanda por plantas medicinais, aromáticas e condimentares porém, ainda necessita de muito estudo na área, uma vez que o país sofre com a falta de informação no assunto, sendo a cadeia produtiva focada em alguns nichos que atendem a demandas específicas de algumas regiões ou até mesmo grandes empresas (MOSELE, CECCHIN e FRARI, 2010). Tomando como exemplo o Paraná, estado com grande tradição no plantio de plantas medicinais e responsável por atender 90% da demanda nacional, dezenove espécies ocupam 92,5% da área cultivada dedicada ao plantio de ervas aromáticas, medicinais e condimentares (JÚNIOR e SCHEFFER, 2014). Também pode-se destacar o mercado de ervas aromáticas destinado a temperos, que apesar de sua enorme demanda,

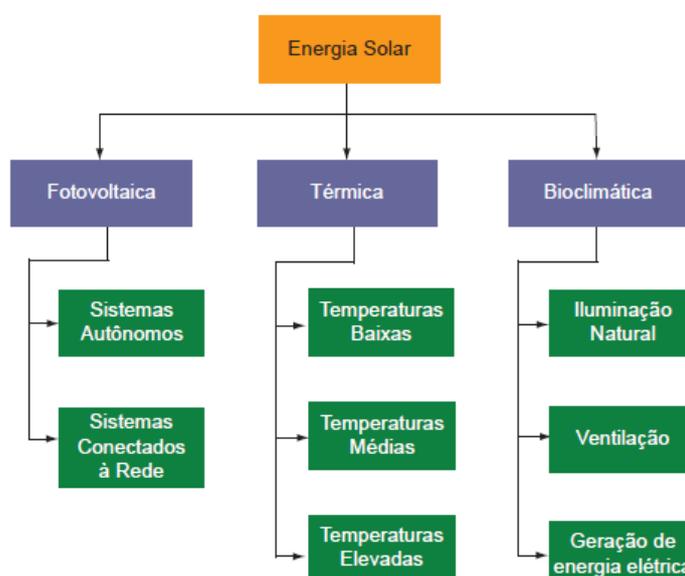
importa 80% do que é consumido no país, o que indica um enorme potencial inexplorado (BLANCO e SILVA, 2013).

2.2 USO DA ENERGIA SOLAR PARA A SECAGEM

A energia solar é uma fonte com enorme potencial de desenvolvimento, uma vez que para a humanidade, o Sol permanecerá irradiando energia advinda de seu processo de fusão nuclear, inesgotavelmente. Desta energia irradiada que chega nas camadas mais altas do sistema atmosférico da terra, 81% encontra-se na faixa de ondas visíveis ao homem até o infravermelho dentro do espectro eletromagnético. Onde o fluxo de radiação acima da atmosfera, varia de 1325 Wm^{-2} a 1412 Wm^{-2} de acordo com a distância da terra e o sol, sendo adotado o valor médio de 1366 Wm^{-2} como constante solar (PEREIRA, MARTINS, *et al.*, 2017).

Existem três grandes ramos de utilização tecnológica da energia solar sendo eles a geração de energia elétrica fotovoltaica, onde a irradiação solar é convertida diretamente em energia elétrica por um sistema fotovoltaico. Aplicação da energia térmica onde pode-se destacar o uso de aquecedores, secadores, geradores de vapor e dessalinizadores, e, por fim, aplicações de arquitetura bioclimática usada na iluminação, ventilação natural, geração de energia fotovoltaica e aquecimento de água para construções sustentáveis (EKOS BRASIL, 2010). Na figura 3 pode-se ver os ramos de aplicação da energia solar.

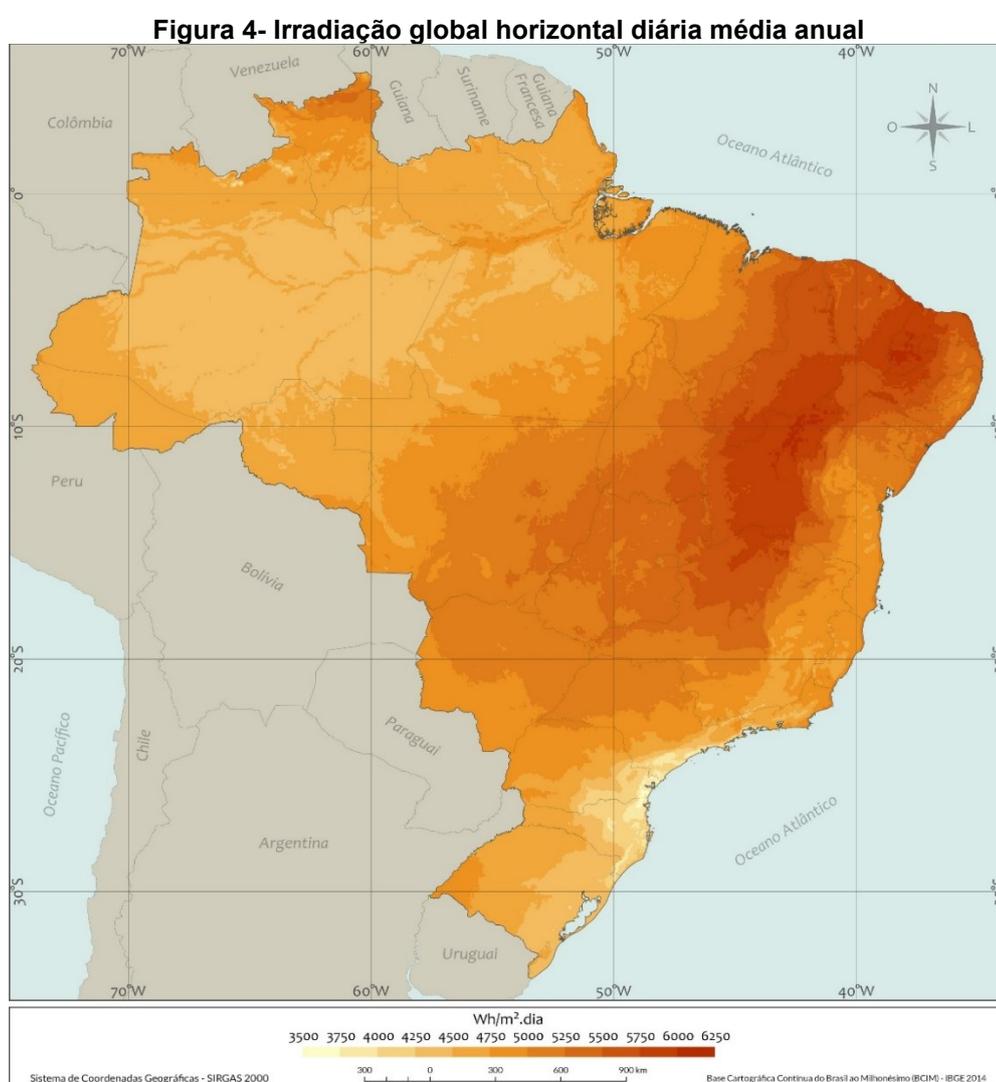
Figura 3- Aplicações da energia solar



Fonte: Ekos Brasil (2010).

2.2.1 Considerações sobre incidência solar

De acordo com o estudo realizado por Júnior e Souza, (2020) o Brasil pode tornar-se uma potência no segmento do uso de energia solar, devido à abundante incidência solar no território nacional. Os pontos médios de menor incidência global horizontal anual no Brasil possuem taxas mais elevadas que as alcançadas nas regiões de maior incidência na Alemanha, país com forte tradição no uso da energia solar. A figura 4 mostra a taxa média anual, do total diário da irradiação global horizontal no Brasil, evidenciando vastas áreas onde é possível o emprego dos métodos de aproveitamento da energia solar.

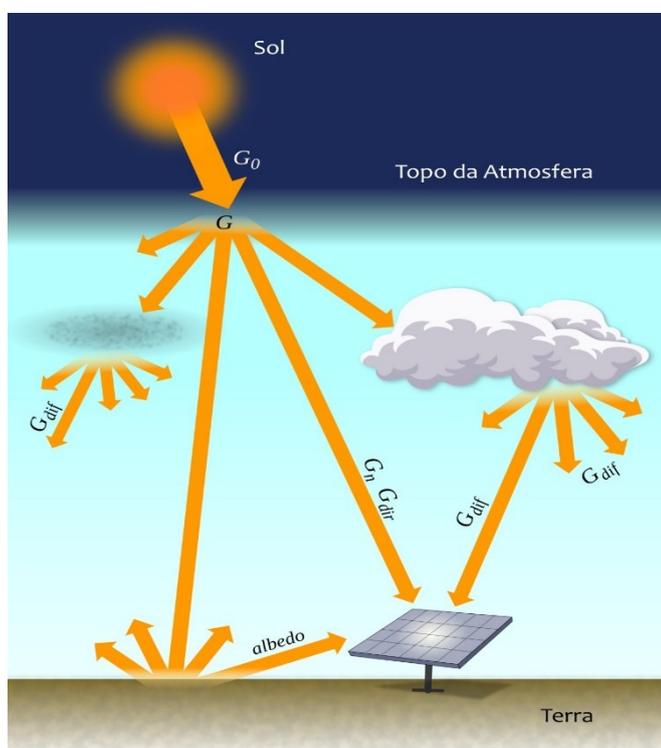


Fonte: Pereira et al. (2017).

De acordo com Pereira et al. (2017), a irradiação solar sofre influências de diversos tipos de interações atmosféricas e astronômicas. Os diferentes

comprimentos de ondas da radiação eletromagnética emitida pelo Sol, interagem de formas variadas com os constituintes do sistema atmosférico da terra como gases e aerossóis em suspensão, reduzindo sua intensidade na superfície terrestre. A energia por unidade de área que chega ao topo da atmosfera é conhecida como irradiância extraterrestre, já a taxa de energia incidente diretamente perpendicular à superfície é denominada irradiância direta normal, a taxa de energia decorrente da difusão da radiação na atmosfera é conhecida como irradiância difusa horizontal e a taxa de energia total incidente sobre a superfície é denominada irradiância global horizontal. A figura 5 ilustra o comportamento da irradiação solar ao entrar na atmosfera.

Figura 5- Componentes da irradiação solar devido à interações atmosféricas



Fonte: Pereira *et al.* (2017).

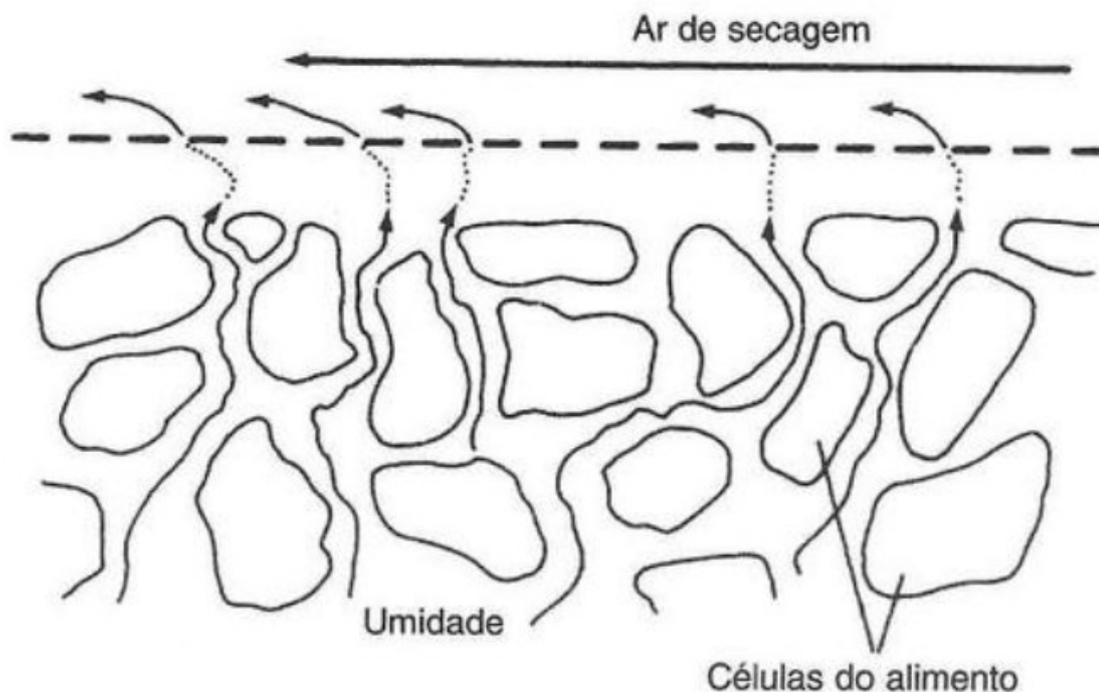
Os movimentos astronômicos influenciam diretamente sobre a quantidade de energia incidente, onde podem-se destacar as variações cíclica anuais, cujo a inclinação do eixo da terra em relação ao plano orbital promove as diferentes estações do ano, em que os dias apresentam diferentes durações, não apresentando alterações apenas na região equatorial do globo. Também ocorrem variações cíclicas diárias, graças ao movimento de rotação da terra em torno do seu eixo.

2.3 SECAGEM DE MATERIAL BIOLÓGICO

A secagem consiste na remoção da maior parte da água livre presente no interior de um material, podendo-se destacar como processo essencial para diversos tipos de alimentos e produtos de origem vegetal. A remoção ocorre por meio do aumento do calor, ocasionando a evaporação da umidade. (FELLOWS, 2006). A quantidade de água em ervas e alimentos está diretamente relacionada ao seu tempo de armazenagem, pois a presença de altos teores de umidade na matéria orgânica provoca uma maior propensão a sua degradação. Uma vez que a água provoca reações químicas que tem por consequência a germinação de esporos, assim como o aparecimento de fungos e bactérias indesejados. (VIJAYSN, ARJUNAM e KUMAR, 2017)

2.3.1 Aspectos do processo de secagem em folhas

As folhas desempenham papéis vitais às plantas, uma vez que nelas ocorre o mecanismo de transpiração que funciona na regulação da temperatura, e o mecanismo de fotossíntese cujo a função é produzir glicose, usada como fonte de energia. A água desempenha papel importante dentro de ambos os mecanismos, neste sentido é dedutível que a retirada da umidade no processo da secagem acarrete em alterações drásticas nas propriedades físico químicas de folhas que passam pelo processo de secagem. Ao analisar o comportamento de apenas uma folha exposta a um fluxo de ar aquecido, esta sofrerá o aumento de temperatura, fazendo com que a água livre migre de suas camadas interiores para as camadas mais superficiais, sofrendo a resistência imposta pelos tecidos e paredes celulares ao longo deste trajeto, e uma vez na superfície, a umidade é dissipada para o ar ambiente como ilustrado na figura 6. Quando se pensa em quantidade maiores de produto a ser secado, o raciocínio é similar. Sendo que a quantidade de umidade presente depende diretamente de condições ambientais e metabólicas de cada planta a ser seca. (FERREIRA, 2018)

Figura 6- Deslocamento da umidade durante a secagem

Fonte: Fellows 2006.

As folhas de uma erva aromática, têm estrutura que no ramo da química é conhecida como matriz porosa. A forma da matriz é determinante para o trajeto do escoamento de fluido no interior do corpo, assim como a intensidade das forças que se opõe a este escoamento. Tal estrutura é definida por fatores como a forma, tamanho e fatores superficiais como a rugosidade na folha de cada planta (FERREIRA, 2018). A secagem pode ser definida como a separação de líquido que se encontram em um sistema sólido, por meio da sua vaporização, e remoção deste vapor. Esta fase líquida geralmente é composta por água, porém pode ser composta ainda por um ou mais solventes ou a mistura de ambos.

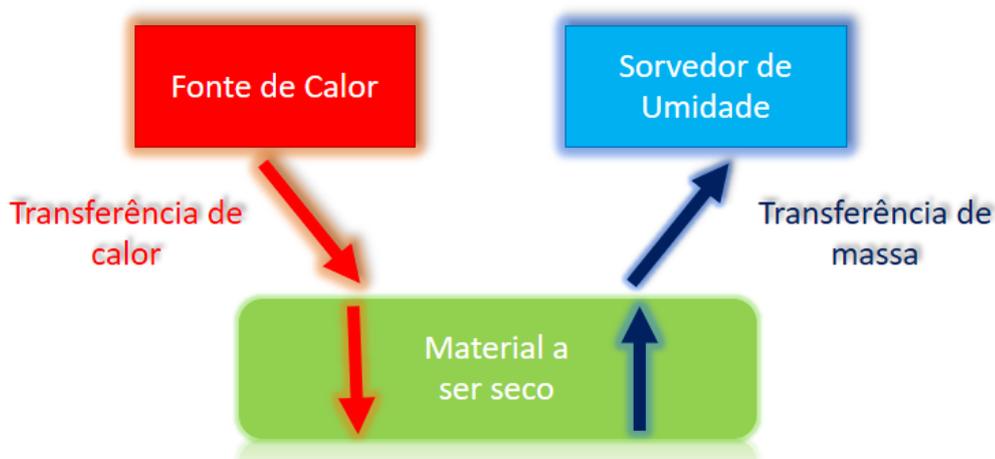
Considerando apenas os processos de secagem que empreguem a presença de fontes de calor que são classificados como métodos de separação térmica. Define-se que o fluido portador de calor é chamado de agente de secagem, composto prioritariamente por misturas gasosas, onde usualmente se emprega o ar ambiente. O calor pode ser fornecido para a mistura gasosa por contato direto com uma superfície de maior temperatura, por irradiação ou ainda por micro-ondas. Já o material úmido a ser seco, recebe o nome de sólido úmido ou apenas sólido.

Uma infinidade de processos industriais, principalmente quando se refere a indústria de alimento, emprega do processo de secagem, assim existe uma

infinidade de materiais sólidos que passam ao menos uma vez por tal processo. Neste sentido, os materiais úmidos possuem uma infinidade de peculiaridades, porém as únicas características que estão ligadas diretamente aos processos de secagem, estão relacionadas a forma como a fase sólida líquida está unida ao líquido e em que região do sólido ocorre a vaporização. No primeiro caso o líquido pode estar livre no interior do sólido ou ligado a ele por sorção (fenômeno de gases ou líquidos de aderir a moléculas de um material de estado físico diferente, por meio dos mecanismos absorção e adsorção). A segunda situação refere-se a possibilidade de a evaporação ocorrer nas camadas interiores do sólido ou nas camadas mais superficiais. (TSOTSAS, GNIELINSKI e SCHLÜNDER, 2000).

O processo de secagem tem a finalidade de remover o líquido volátil de um corpo sólido. Assim, ao transferir calor de uma fonte para o corpo úmido ocorrerá a evaporação do líquido em seu interior, seguido da transferência de massa que transportará o vapor para superfície do material e em seguida para ambiente, conforme ilustrado no diagrama da figura 7 (PARK *et al.*, 2014). De acordo com Fellows, (2006) os fatores que determinam a quantidade de água que o ar será capaz de remover dos alimentos, são a quantidade de vapor presente no ar na forma de umidade, a temperatura do ar e o fluxo de ar pelo alimento. Pois com o aumento da temperatura do ar e a redução de sua umidade promove a evaporação de água da superfície. Por sua vez, o fluxo de ar quente envolvendo o alimento difunde o vapor da superfície através da camada limite.

Figura 7- Processos de transferência de calor e massa durante a secagem



Fonte: Adaptado de Park *et al.* (2014).

2.3.2 Quantidade de umidade removida

Conforme Ehiem *et al.*(2009) pode-se determinar a quantidade de massa de umidade removida (m_R) do material sob secagem, fazendo uso da equação (1), sendo a relação entre a massa do produto antes da secagem (m_p), e os percentuais de suas umidades inicial (U_i) e final (U_f). Onde por consequência a massa do material seco, é dada pela diferença da massa inicial do produto e a massa de água removida, conforme equação (2).

$$m_R = m_p \left(\frac{U_i - U_f}{1 - U_i} \right) \quad (1)$$

$$m_{ps} = m_p - m_R \quad (2)$$

2.3.3 Psicrometria

Psicrometria é o estudo de sistemas constituídos por ar seco e vapor de água e o conhecimento sobre o comportamento destes tipos de sistemas são essenciais para projetar e analisar processos que necessitem de controle do teor de vapor (MORAN, SHAPIRO, *et al.*, 2013). A psicrometria é um ramo da termodinâmica responsável por quantificar as quantidades de vapor de água na atmosfera (SILVA, LOPES, *et al.*, 2008).

2.3.3.1 Propriedades do ar

Segundo Çengel e Boles (2006) o ar é constituído pela mistura de nitrogênio, oxigênio e pequenas parcelas de outros gases, sendo na atmosfera formado ainda por pequenas quantidades de água na forma de umidade, mistura denominado como ar atmosférico, já o ar isento de umidade é chamado de ar seco. Ainda de acordo com Çengel e Boles (2006), por conveniência é comum tratar o ar como a mistura de ar seco e vapor de água, pois a composição do ar seco permanece constante entre -10°C e 50°C podendo ser considerado como gás ideal, alterando-se a quantidade de vapor de água devido às interações com o ambiente, e embora a

quantidade de vapor no ar seja pequena, acaba tendo um papel muito importante no conforto humano.

Segundo Silva *et al.* (2008) podemos considerar como propriedades relacionadas à temperatura, a temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido e temperatura de orvalho. A temperatura de bulbo seco (T) consiste na temperatura medida usualmente com um termômetro comum. Já a temperatura de bulbo úmido, é a temperatura medida por um termômetro de bulbo úmido, termômetro cujo o bulbo é envolto por uma mecha de material umedecido (MORAN, SHAPIRO, *et al.*, 2013). A temperatura de orvalho, é a temperatura em que o ar inicia processo de condensação quando é resfriado sob pressão constante (ÇENGEL e BOLES, 2006).

Silva *et al.* (2008) descreve como propriedades do ar relacionadas a massa de vapor, pressão de vapor, razão de mistura, umidade relativa, umidade absoluta, umidade específica e grau de saturação. De acordo com Çengel e Boles (2006), a pressão do ar atmosférico é dada pela soma da pressão parcial do ar seco e da pressão parcial de vapor ou apenas pressão de vapor, que consiste na pressão que o vapor faria se estivesse sozinho sob as mesmas condições de volume e temperatura do ar atmosférico. A pressão parcial que o vapor exerce na atmosfera para o ar saturado, é dada pela equação (3).

$$P_s = 6,1078 \cdot 10^{\left(\frac{7,5T}{273,15+T}\right)} \quad (3)$$

Já a pressão parcial de vapor do ar não saturado, é dada pela equação (4).

$$P_v = P_{su} - A \cdot P \cdot (T - T_u) \quad (4)$$

Onde, P_{su} é obtida por meio da equação (5), em que T_u é a temperatura de bulbo úmido.

$$P_{su} = 6,1078 \cdot 10^{\left(\frac{7,5T_u}{273,15+T_u}\right)} \quad (5)$$

Sendo a constante $A = 6,7 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Conforme descrito por Moran *et al.* (2013), uma das formas de descrever uma mistura de ar úmido é por meio das frações de massa de ar seco (m_a) e massa de vapor (m_v), relação conhecida como razão da mistura ou umidade específica (ω) como visto na equação (6).

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (6)$$

Ou ainda, ao considerar como gás ideal, a umidade específica pode ser expressa na forma da equação (7), respectivamente em termos da pressão do vapor de água (P_v) e pressão do ar seco (P_a).

$$\omega = 0,622 \frac{P_v}{P_a} \quad (7)$$

Que ainda pode ser reescrita, como a equação (8), onde P é a pressão atmosférica.

$$\omega = 0,622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (8)$$

Pode-se ainda descrever o ar úmido pela razão das frações molares do vapor d'água de uma amostra de ar úmido, pela fração molar de uma amostra de ar saturado (P_s) a uma mesma temperatura, que ao reescrever aplicando a lei dos gases ideais, pode ser rescrita de acordo com a equação (9), (MORAN, SHAPIRO, *et al.*, 2013). Essa razão é denominada umidade relativa (UR), podendo variar de 0 para ar totalmente isento de umidade até 1 para o ar saturado. Onde a quantidade de umidade que é possível ser absorvida pelo ar, está diretamente relacionada à sua temperatura (ÇENGEL e BOLES, 2006).

$$UR = \frac{P_v}{P_s} \quad (9)$$

De acordo com Çengel e Boles, (2006) o ar saturado, consiste no ar seco em que foi adicionado uma quantidade de vapor de água tão elevada que sua umidade específica subirá ao ponto de não ser mais possível a absorção de umidade, fazendo com que todo o vapor inserido acima deste ponto condense.

Silva *et al.* (2008), define a umidade absoluta como a propriedade que relaciona a massa de vapor de água e o volume do ar úmido, onde a equação (10) descreve a umidade absoluta do vapor de água (U_{av}) e a equação (11) caracteriza a umidade absoluta de ar seco (U_{as}), sendo ambas obtidas a partir da equação (12).

$$U_{av} = 216,68 \frac{P_v}{T} \quad (10)$$

$$U_{as} = 348,37 \frac{(P - P_v)}{T} \quad (11)$$

$$U_{abs} = \frac{(348,37P - 131,69 P_v)}{T} \quad (12)$$

Silva *et al.* (2008), descreve a umidade específica (U_e) como a razão entre a massa de vapor de água e a massa do ar úmido dada pela equação (13).

$$U_e = \frac{(0,622P_v)}{(P - 0,378P_v)} \quad (13)$$

Também destaca as propriedades de volume ocupado e energia. Onde o volume específico por massa de ar seco (V_{es}) é dado pela equação (14).

$$V_{es} = 0,28705 \frac{T(1 + 1,6078 \omega)}{P} \quad (14)$$

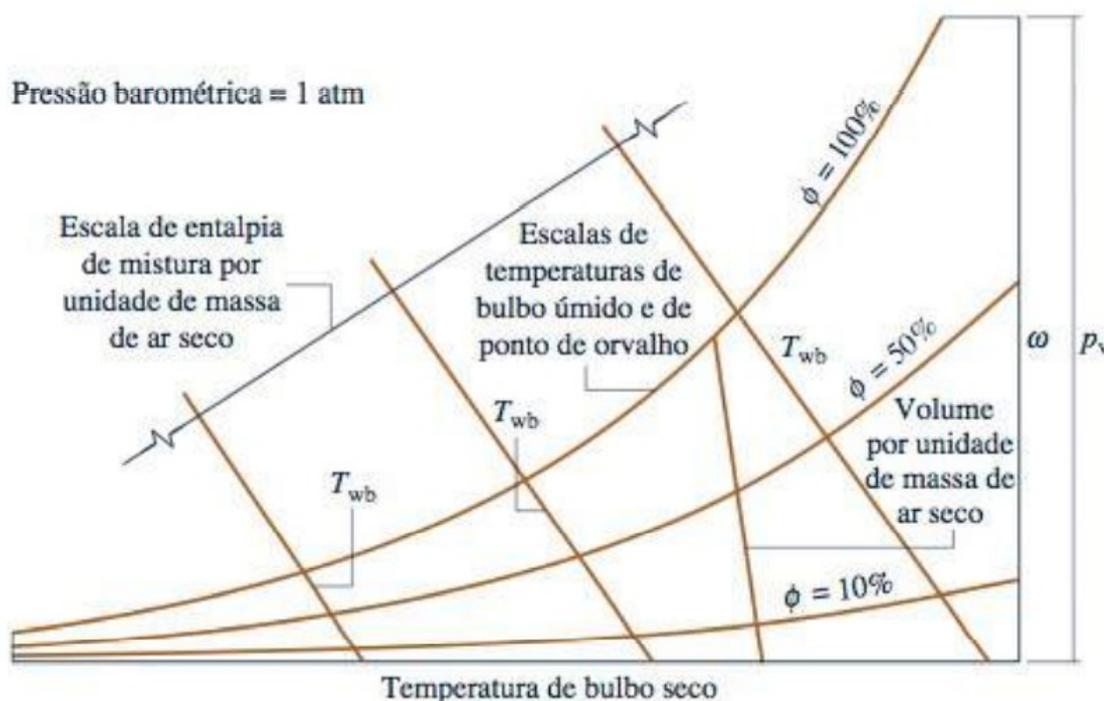
Por sua vez, a entalpia (h) representa a energia presente no vapor de água, por massa de ar seco, sendo uma propriedade essencial no dimensionamento de secadores. A equação (15) é uma boa aproximação para obtenção da entalpia em temperaturas entre 0°C e 100°C, sendo obtida a partir de métodos empíricos (BROOKER, BAKKER-ARKEMA e HALL, 1992).

$$h = 1006,9T + \omega(2512131 + 1552,4T) \quad (15)$$

2.3.3.2 Carta psicrométrica

Segundo Moran *et al.* (2013) a carta psicrométrica é a representação gráfica onde são mostradas diversas propriedades do ar úmido, sendo comumente traçadas na pressão de 1 atm, podendo ser também, encontradas em outras pressões. A figura 8 ilustra como estão dispostas as propriedades do ar úmido na carta psicrométrica, onde podem ser obtidas informações como a temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, ponto de orvalho, razão da mistura que por sua vez é correspondente direta da pressão parcial do vapor d'água como (pode ser visto no eixo ordenado), além da umidade de massa de ar seco, entalpia e volume por unidade de massa de ar seco.

Figura 8- Exemplo ilustrativo de carta psicrométrica



Fonte: Moran *et al.* (2013).

2.4 SECADORES

Neste capítulo são mostradas algumas particularidades dos equipamentos que realizam o processo de secagem, assim como as formas de classificá-los.

2.4.1 Visão geral sobre secadores

Secadores podem ser classificados seguindo diferentes critérios que estão relacionados a fatores como à características construtivas do secador, características do produto a ser desidratado, forma como o calor é transmitido para o produto sob secagem, métodos de transporte do material durante a secagem, métodos de operação do processo de secagem, capacidade de secagem do modelo de secador, ou podem ainda ser classificados de acordo com casos de aplicação específicas, quando o produto a ser seco oferece toxicidade ou risco de explosão. A secagem de folhas usualmente emprega secadores de regime hidrodinâmico não ativos com leito estacionário, onde as folhas se mantêm estáticas enquanto o calor é fornecido a elas, propiciando a retirada da umidade (PARK *et al.* 2007).

Usualmente os secadores são divididos em dois grandes grupos de acordo com a sua temperatura de secagem, secagem em altas ou baixas temperaturas, sendo que também muito comum o emprego da classificação quanto a sua fonte de energia. Os secadores de altas temperaturas, são empregados quando há a necessidade que o produto sofra uma secagem rápida tendo majoritariamente como fonte de energia combustíveis fósseis ou energia elétrica, com uma pequena minoria usando energia solar. Por outro lado, os secadores de baixa temperatura utilizando-se da circulação constante de ar, fazem com que a umidade do produto entre em equilíbrio com o ar de secagem e podendo fornecer calor de forma intermitente, o que os torna adequados a aplicações solares (EKECHUKWU e NORTON, 1999).

2.4.2 Secagem solar

Uma das modalidades de secagem mais comuns e antigas é a solar em leito aberto, onde as culturas são espalhadas sobre uma superfície aberta, em que recebem a energia solar ao longo do dia. Parte da energia é refletida pela superfície da cultura e outra parte é absorvida pela mesma, sendo convertida em energia térmica aumentando a temperatura do material. Apesar de mais barato, não é possível controlar a temperatura de secagem, apresenta grande perda de energia pela reflexão da radiação solar pela superfície de armazenamento e também pela própria superfície da cultura, além disso, o processo pode ser dificultado pela exposição ao ar úmido e a perda de calor do material devido à convecção. Logo, este processo apesar de mais barato, em muitos casos não atende aos critérios de qualidade exigidos por muitos mercados consumidores (Hill *et al.* 2012).

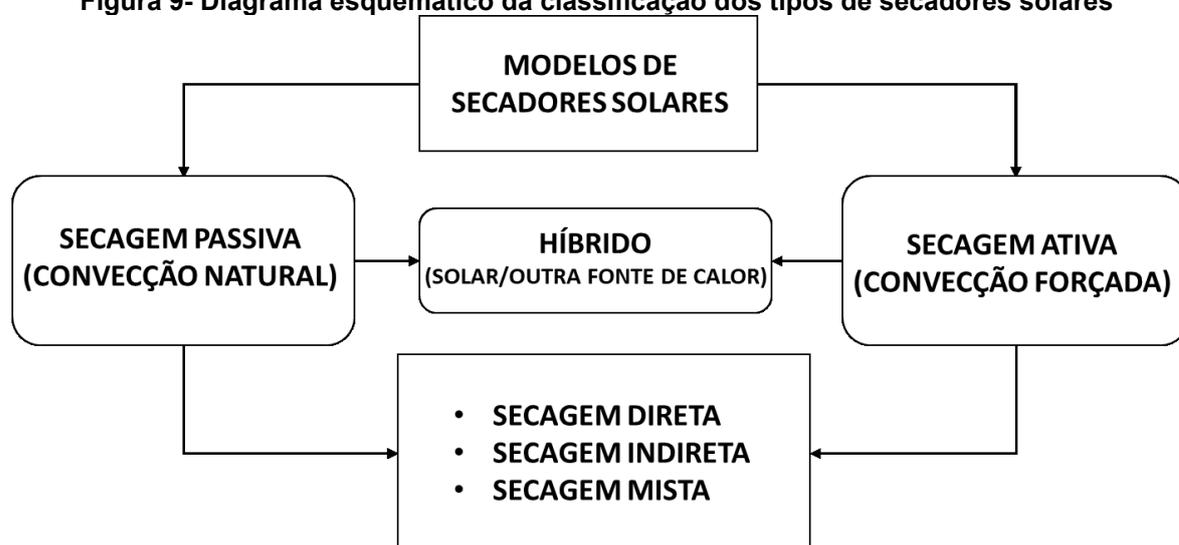
Outra forma de secagem solar é fazendo o uso de secadores, que são uma alternativa de baixo custo e em muitos casos podem vir a substituir a utilização de secadores comuns. São indicados principalmente a pequenos agricultores, por serem economicamente mais acessível, possuem fácil manejo, não necessitando de mão de obra qualificada para a operação, além de ser mais indicado para pequenos lotes. Estes tipos de secadores consistem em um coletor para a radiação solar, onde o ar ambiente é aquecido, acarretando a transferência de calor pelo mecanismo de convecção que para estes tipos de secadores pode ou não ser forçada. Conseqüentemente o agente de secagem percorre o sistema promovendo a retirada da água presente no produto. O material úmido à sofrer a secagem, pode estar

distribuído diretamente sobre o coletor o que é caracterizado como secagem direta, ou ainda, pode estar alocado em um compartimento acoplado ao coletor, o que é conhecido como método de secagem indireta (COSTA, 2010).

2.4.3 Classificação de secadores solares

Os sistemas de secagem solar são classificados principalmente de acordo com seu modo de funcionamento, que podem ser de secagem por energia solar ativa fazendo uso de convecção forçada, ou secagem solar passiva que utiliza convecção natural. Existindo ainda três subclasses que referem-se a forma de utilização do calor, onde podem ser de secadores de secagem direta, onde o sol incide diretamente sobre o produto, secagem indireta, quando o sol não incide diretamente sobre o produto e por fim os secadores do tipo misto, que recebem a exposição solar direta e indireta (EKECHUKWU e NORTON, 1999). O diagrama da figura 9 ilustra uma das formas de se classificar os tipos de secadores solares mais produzidos segundo Banout,(2017).

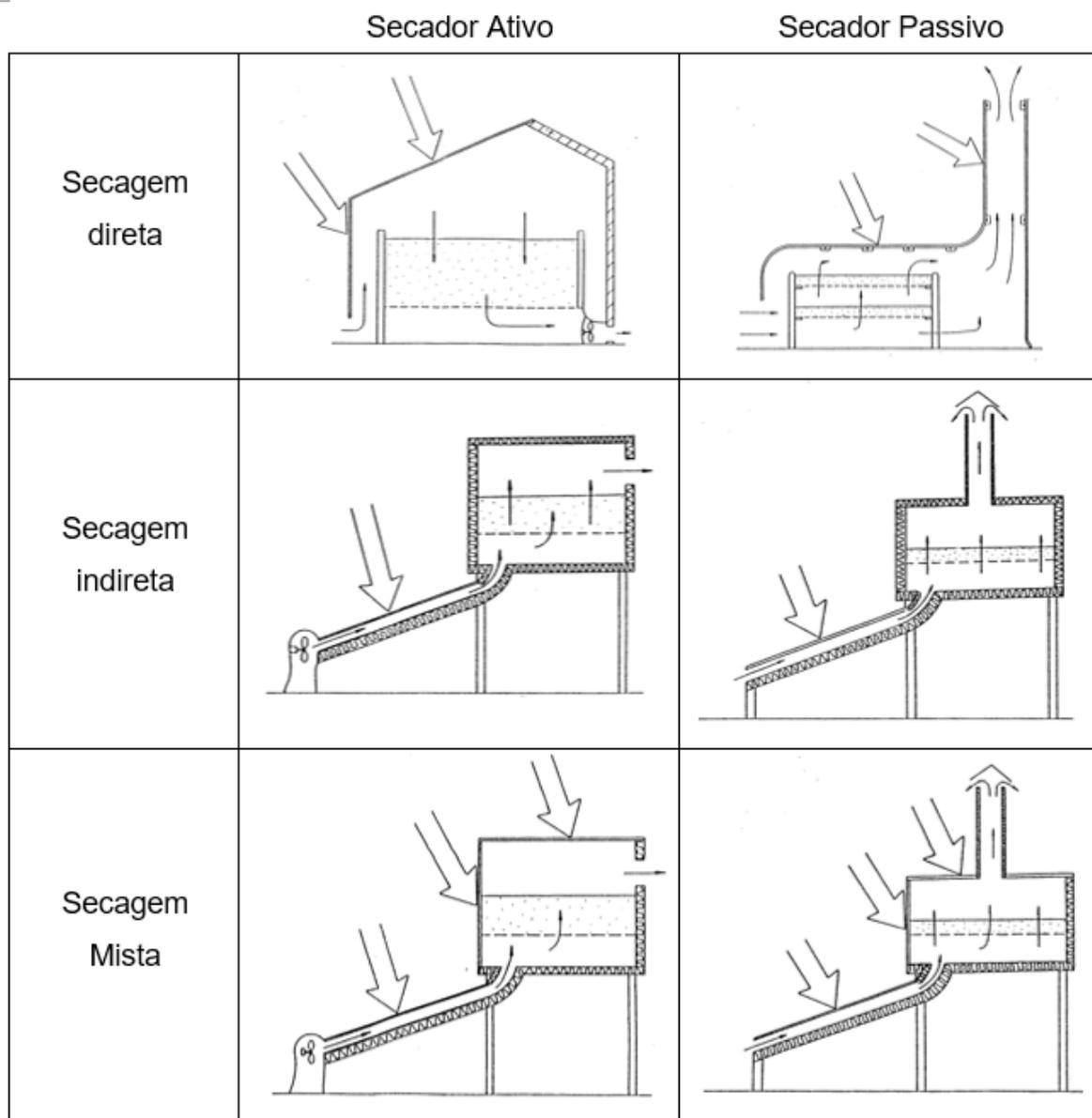
Figura 9- Diagrama esquemático da classificação dos tipos de secadores solares



Fonte: Adaptado de Banout (2017).

Na figura 10, podem ser vistos segundo a análise de Norton e Onyegebu, (1997), alguns exemplos de *designs* construtivos e suas respectivas categorias e subcategorias. A seguir serão vistos outros exemplos de modelos de secadores solares e suas variações.

Figura 10- Modelos usuais de secadores solares



Fonte: Adaptado de Norton e Onyegegbu, (1997).

A tabela 1 mostra quais são as vantagens e desvantagens dos principais tipos de secadores, divididos por modalidade convectiva, que pode ser ativa (convecção forçada) ou passiva (convecção natural), além de também os dividir quanto ao tipo de exposição solar a que submetem o produto, podendo ser exposição direta, indireta ou mista, mostrando as características resultantes destas combinações. Deve-se destacar que as combinações também podem ser adaptadas para a aplicação híbrida, usando a energia térmica solar como fonte secundária de calor, recebendo como fonte primária, a energia elétrica ou a queima de combustível.

Tabela 1- Vantagem e desvantagem dos principais tipos de secadores solares

Tipo de secagem	Ativa	Passiva
Direta	<p>Prós:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Operação simples; • Maior taxa de remoção de vapor que os secadores passivos de secagem direta; <p>Contras:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Descoloração do produto; • Maior custo e complexidade de construção, se comparador ao secador passivo de secagem direta. 	<p>Prós:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Construção e operação simples; • Menor custo de fabricação <p>Contras:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Não é possível controlar a temperatura; • Superaquece ou apresentar aquecimento insuficiente, degradando o produto; • Descoloração do produto; • Baixa taxa de remoção de vapor; • Baixa capacidade produtiva; • Condensação na tampa reduzindo a transmissividade.
Indireta	<p>Prós:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Maior controle das variáveis de secagem; • Produtos não caramelizam ou apresentam danos por calor localizado; • Pode operar em temperaturas mais elevadas, ideal para secagem de camada profunda; • Indicado para produtos com alto índice de umidade; • Mais eficientes que os secadores passivos de secagem indireta; • Indicado para produtos fotossensíveis. <p>Contras:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fabricação mais complexa; • Maior custo de fabricação e manutenção. 	<p>Prós:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produtos não caramelizam ou apresentam danos por calor localizado; • Pode operar em temperaturas mais elevadas ideal para secagem de camada profunda; • Indicado para produtos fotossensíveis. <p>Contras:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fabricação mais complexa; • Maior custo de fabricação e manutenção.
Mista	<p>Prós:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Operação simples; • Maior taxa de remoção de vapor que os secadores passivos de secagem mista; • Maior controle das variáveis de secagem; • Pode operar em temperaturas mais elevadas ideal para secagem de camada profunda; • Mais eficientes que os secadores passivos de secagem mista. <p>Contras:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Descoloração do produto; • Fabricação mais complexa; • Maior custo de fabricação e manutenção. 	<p>Prós:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Operação simples; • Maior controle das variáveis de secagem; • Pode operar em temperaturas mais elevadas ideal para secagem de camada profunda. <p>Contras:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Não é possível controlar a temperatura; • Superaquece, degradando o produto; • Descoloração do produto; • Baixa taxa de remoção de vapor; • Baixa capacidade produtiva; • Condensação na tampa reduzindo a transmissividade.

Fonte: Autoria própria (2021).

2.4.3.1 Secador solar de secagem passiva

O secador solar de secagem passiva, também conhecido como secador solar de convecção natural, consiste em um dispositivo de secagem cujo princípio de funcionamento baseia-se no aquecimento do ar ambiente, fazendo com que o ar circule pelo sistema devido a forças convectivas, pressão do vento ou a soma dos dois fatores. O aquecimento ocorre no interior de uma câmara, denominada coletor solar. Sendo que o ar aquecido provoca a secagem dos produtos, que podem estar depositados diretamente no coletor caracterizando a secagem direta ou pode ocorrer em um compartimento a parte, conhecido como câmara de secagem, onde estes tipos de secadores são nomeados de secadores de secagem indireta. Tais secadores podem possuir uma chaminé para expulsão do ar pós secagem. Há ainda um terceiro tipo de dispositivo que agrega os dois mecanismos de funcionamento, conhecido como secador misto ou secador híbrido, onde o produto está depositado diretamente sobre o coletor, recebendo irradiação solar diretamente, mas também recebe o ar aquecido oriundo de um coletor adjacente (BANOUT, 2017). Um exemplo de secador de secagem passiva direta pode ser visto na figura 11.

Figura 11- Secador solar de secagem passiva (convecção natural)



Fonte: Feiden et al. (2015).

2.4.3.2 Secador solar de secagem ativa

Secadores solares ativos são caracterizados pelo uso de mecanismos de ventilação para forçar o fluxo de ar no interior do aparato de secagem, desta forma

podem ser nomeados de secadores solares por convecção forçada. Em linhas gerais, estes tipos de secadores possuem princípio que também podem variar entre secagem direta, indireta ou mista, porém para auxiliar os mecanismos convectivos existe a adição de ventiladores em algum ponto do sistema de secagem, forçando a passagem de ar pelo circuito. Este tipo de secador é indicado para produtos de maior índice de umidade, uma vez que apresenta maior eficiência se comparado com secadores solares de secagem passiva (BANOUT, 2017). A figura 12 ilustra essa categoria de secadores.

Figura 12- Secador solar de secagem ativa (convecção forçada)



Fonte: Almagro et al. (2017).

2.4.3.3 Secador solar híbrido

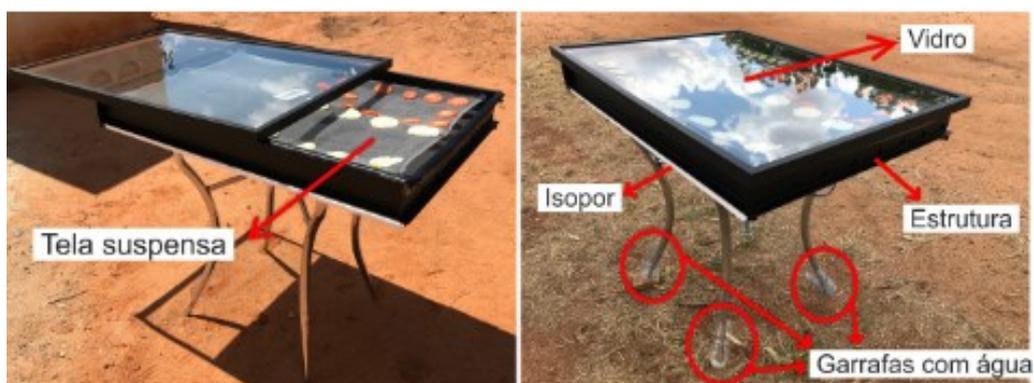
Secadores solares híbridos usam a energia proveniente do sol como fonte alternativa de calor, uma vez que empregam como fontes principais meios como a energia elétrica ou a queima de combustíveis fósseis, além disso, fazem uso de sistemas de convecção forçada. Se os coletores solares estiverem recebendo calor suficiente, podem atuar integralmente no processo de secagem, acarretando economia da fonte convencional. No caso da insuficiência do fornecimento térmico dos coletores, deve ocorrer o acionamento da fonte energética principal, o que é muito útil durante o período noturno ou em dias de baixa insolação, evitando os efeitos de oscilações no fornecimento de energia (EKECHUKWU e NORTON, 1999). Conforme figura 13, onde pode ser visto um secador híbrido aquecido por energia solar e por queima de biomassa.

Figura 13-Secador híbrido solar-biomassa**Torres-Gallo, Lug E Martínez-Padilla, (2017)**

2.4.3.4 Secador solar de secagem direta

Nos secadores solares de exposição direta, a radiação incide sobre o coletor, sendo que uma parcela é refletida pela tampa do coletor para a atmosfera, o restante incide para o interior da câmara de secagem, onde parte é refletida pela superfície do material a ser desidratado, já o resto é absorvida pelo mesmo. Deste modo, a temperatura do material aumenta fazendo com que emita comprimentos de onda que não podem escapar para a atmosfera, uma vez que não conseguem transpor a tampa translúcida do coletor, impedindo a perda de energia para o meio por convecção por consequência, elevando a temperatura no interior da câmara. Estes secadores apresentam as vantagens de serem mais baratos e de simples construção, oferece proteção contra intempéries, porém, em contra partida superaquecem degradando a cultura, apresentam uma taxa de remoção de vapor baixa, possuem capacidade produtiva limitada, a cultura apresenta descoloração devido à exposição direta ao sol, apresentam condensação na tampa translúcida o que reduz a transmissividade, além de poderem apresentar aumento de temperatura insuficiente para a secagem adequada (Hill *et al.* 2012). A figura 14 exemplifica esses *designs* de secadores.

Figura 14- Exemplo de secador solar de secagem direta

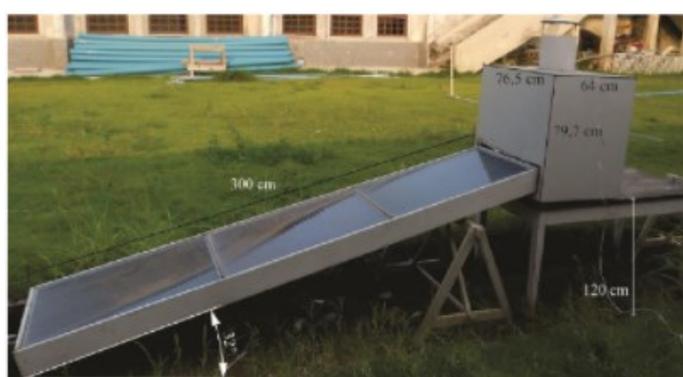


Fonte: Araújo, Guerra e Vale (2021).

2.4.3.5 Secador solar de secagem indireta

Segundo Hill *et al* (2012), nos secadores solares de secagem indireta, as culturas são posicionadas em uma câmara sobre bandejas ou prateleiras, onde o ar previamente aquecido e desumidificado durante sua passagem pelo coletor, flui através da câmara promovendo a evaporação da umidade da cultura devido à transferência de calor por convecção entre o ar quente e a superfície úmida do produto. Ainda segundo Hill *et al* (2012), este processo oferece melhor qualidade dos produtos devido ao seu maior controle, os produtos não apresentam caramelização (degradação do açúcar, convertido em outros compostos) ou danos por calor localizado, pode operar em temperaturas mais elevadas ideal para secagem em camadas profundas, amplamente recomendado para produtos fotossensíveis, sendo normalmente uma opção mais eficiente que os secadores de secagem direta. Por sua vez, são equipamentos mais elaborados, necessitando de maiores investimentos para sua construção e manutenção. A figura 15 traz um exemplo desta categoria.

Figura 15- Exemplo de secador solar de secagem indireta



Fonte: Misquita *et al.* (2017).

2.4.3.6 Secador solar de secagem mista

Por sua vez, secadores solares mistos combinam as características dos secadores de secagem direta e indireta, onde o material a ser desidratado recebe não só a energia diretamente pela exposição à radiação solar, mas também a energia proveniente do ar previamente aquecido em câmara de aquecimento, atingindo a energia necessária para realizar o processo de secagem (Hill *et al.*2012). Conforme ilustrado na figura 16.

Figura 16- Exemplo de secador solar de secagem mista



Fonte: Silva (2011).

2.5 VARIÁVEIS PARA DIMENSIONAMENTO

Neste tópico serão apresentadas as variáveis adequadas para a realização do processo de secagem em ervas aromáticas, medicinais e condimentares.

2.5.1 Parâmetros da secagem

A secagem de ervas aromáticas deve ocorrer em local limpo, isento de poeira, insetos e outros animais, deve-se abrigar as folhas à sombra, livre da

incidência direta dos raios solares, porém o local deve possuir uma circulação abundante de ar. A planta deve ser posta para secagem o mais rápido possível após a colheita, devendo passar por um processo preliminar de triagem, onde são retirados corpos estranhos, como outras plantas, terra ou pedras, além disso as plantas devem ser separadas por espécie e preferencialmente não devem ser lavadas antes da secagem (FERREIRA e CANDEIAS, 2015).

A secagem deve ocorrer a temperaturas entre 30°C e 40°C, pois secagens feitas abaixo desta faixa de temperaturas, são muito demoradas e podem provocar a perda quase completa de seus princípios ativos, o que também ocorre com secagens a temperaturas superiores a 45°C que promove a degradação de compostos voláteis da maioria das espécies (FERREIRA e CANDEIAS, 2015). Já para Cornejo, (2018) vegetais folhosos devem ser desidratados a temperaturas de 40°C a 50°C. Além disso, segundo Senberg e Nozaki, (2011) ervas medicinais como capim limão e alfavaca apresentam melhor perda de umidade quando submetidos a secagem sob temperatura de 40°C.

Segundo Ferreira e Candeias, (2015) a secagem deve ocorrer até que as plantas tornem-se quebradiças, ponto correspondente a umidades em percentuais entre de 5 a 10% para as folhas e correspondendo a percentuais entre os 12 a 20% para cascas e raízes. De acordo com Geankoplis, (1993) a redução de umidade em produtos biológicos e alimentos a percentuais inferiores a 10% de seu teor de umidade, provocam a inativação de microorganismos e enzimas que acarretam na degradação do material, porém se o objetivo for a manutenção do sabor e propriedades nutricionais dos alimentos, a secagem deve ser feita até que o material atinja 5% de sua massa inicial.

Para obtenção de produtos de qualidade independente das condições do clima, a secagem deve ser feita por meio de secadores sob convecção forçada, onde as plantas podem ser posicionadas de forma espalhada, em camadas finas que permitam a circulação do ar, ou ainda podem ser penduradas na forma de pequenos ramalhetes, desde que a erva em questão não desprenda folhas no ato da secagem. Por sua vez, Geankoplis, (1993) aponta que para a secagem em bandejas a espessura da camada de material deve variar de 10 a 100 mm.

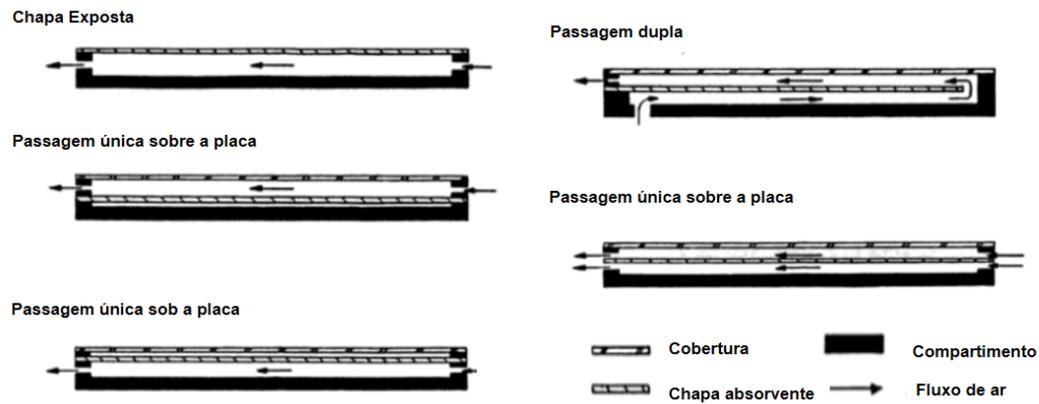
2.5.2 Coletor

Coletores solares são usados para obtenção de energia térmica proveniente do sol, normalmente usados no aquecimento de ar ou água. Podem ser construídos na forma de placas plana que são os mais indicados para secagem de insumos agrícolas, ou na forma concentradores que focalizam a radiação em uma região, podendo atingir temperaturas mais elevadas. Secadores de placas planas são constituídos basicamente por uma placa absorvedora onde a radiação solar é transformada em energia térmica transferida para o ar, além de também ser constituída por uma superfície transparente a cima do absorvedor, que reduz a perda de calor (BRENNENDORFER *et al.* 1985).

Ainda de acordo com Brenndorfer *et al.* (1985), a quantidade de energia absorvida pelo coletor depende da quantidade de insolação disponível na região, o ângulo de inclinação entre a insolação incidente e a placa coletora, a capacidade de absorção de calor da placa e a transmissividade da tampa translúcida.

Para a escolha do perfil de coletor dentre os inúmeros tipos existentes, destaca-se como fator determinante a temperatura que se deseja atingir no aquecimento. Para aumentos de até 10°C, o coletor de placas simples é ideal devido à sua simplicidade construtiva tendo como contraponto a sua grande perda de calor, fazendo-se necessário para a secagem adequada, o emprego de convecção forçada. Já para atingir temperaturas mais elevadas, com variação de até 35°C, é necessário o emprego de *designs* mais elaborados que façam uma melhor contenção do calor, como é o caso dos coletores com compartimento isolante ou os de passagem dupla, sendo estes parâmetros obtidos experimentalmente em estudo realizado no hemisfério norte (BRENNENDORFER *et al.* 1985). A figura 17 ilustra diversos *designs* construtivos usualmente empregados de coletores solares, como os modelos de placa exposta onde o fluxo de ar aquecido passa na parte inferior da chapa, o modelo de passagem simples sobre a placa em que o fluxo passa entre a chapa absorvente e a cobertura translúcida havendo um espaço vazio entre a placa e a parede do revestimento, além do modelo de passagem simples sob a placa em que o fluxo passa na parte inferior da placa havendo um espaço vazio entre a placa e a cobertura, ou ainda o modelo de passagem dupla onde o ar flui através das partes inferior e superior da placa coletora em fluxo contrário, e por fim também é mostrado o modelo de fluxo paralelo onde o ar flui nas duas superfícies da placa em mesmo sentido.

Figura 17- *Designs* de coletores de placas planas



Fonte: Adaptado de Brenndorfer *et al.* (1985).

Segundo Oguntola, Nwaokocha e Adunola, (2020) o ângulo de inclinação do coletor solar (β) é dado pela equação (16). Onde ϕ representa a latitude da localidade onde será instalado o coletor.

$$\beta = 10 + \phi \quad (16)$$

Assim como a área de coletor (A_c) pode ser obtida utilizando-se a equação (17). Onde V_a representa a vazão volumétrica, ρ_a é a densidade do ar na temperatura de secagem, ΔT é a variação entre temperatura de entrada e saída do coletor, C_{pa} é o calor específico do ar, I é a insolação solar e η é a eficiência do coletor que segundo Akoy *et al.* (2006), varia entre 30 e 50%.

$$A_c = \frac{V_a \rho_a \Delta T C_{pa}}{I \eta} \quad (17)$$

2.5.3 Transferência de calor e massa

O fluxo de massa de um fluido que passa por uma determinada seção transversal de área (A), é denominada vazão mássica (\dot{m}), obtida pela relação expressa na equação (18). Em que ρ é a densidade do fluido, V é a velocidade média do fluido (ÇENGEL e BOLES, 2006).

$$\dot{m} = \rho V A \quad (18)$$

Segundo Hussein *et al.* (2017) a equação 18 pode ser reescrita em termos do calor de secagem necessário (E_a), como mostra a equação (19). Onde C_p é o calor específico do ar, ΔT a variação da temperatura durante a secagem e t é o tempo de secagem.

$$\dot{m} = \frac{E_t}{(C_p \Delta T t)} \quad (19)$$

Para Çengel e Boles, (2006), o volume deste fluido que passa pela seção dada uma unidade de tempo é denominada vazão volumétrica \dot{V} , obtida por meio da equação (20).

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho_a} \quad (20)$$

De acordo com Hussein *et al.* (2017), o fluxo de calor (\dot{Q}) necessário para a secagem pode ser calculada por meio da equação (21).

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_s - h_e) \quad (21)$$

Onde h_e e h_s são respectivamente entalpias de entrada no coletor e entalpia de saída da câmara.

Já a quantidade de calor para evaporar a água do sólido pode ser dada pela equação (22), dada pelo calor necessário para elevar a umidade até 40°C acrescido do calor latente para remoção da umidade.

$$E_T = M_p C_M \Delta T + m_r L_V \quad (22)$$

Em que M_p é a massa inicial do produto úmido, C_M é o calor específico das folhas de *manjeriço*, ΔT é a variação entre a temperatura ambiente e a de secagem, m_r é a massa de água a ser removida e L_V é o calor latente de vaporização.

3 METODOLOGIA (MATERIAIS E MÉTODOS)

3.1 CONSIDERAÇÕES

Inicialmente, a partir da análise bibliográfica foi feita a fundamentação dos parâmetros de funcionamento e construtivos do secador, que foram necessários ao dimensionamento. Estas considerações serviram para delimitar as variáveis de interesse necessárias ao equipamento para o posterior cálculo de suas grandezas.

3.1.1 Premissas iniciais

Como condições iniciais para o projeto, foi estabelecido que o secador deveria ser desenvolvido para a desidratação de ervas aromáticas, ervas medicinais e condimentares, visando minimizar a degradação de propriedades de interesse dos materiais durante o processo. Além disso, foi idealizado que o equipamento deveria possuir pequenas dimensões, podendo ser facilmente transportado por uma pessoa sem a necessidade de qualquer tipo de auxílio, além disso, o equipamento foi pensado para possuir baixo custo de produção e operação, sendo um equipamento de fácil manuseio.

A partir das considerações iniciais, estabeleceu-se que a melhor opção seria o uso de um secador solar de secagem indireta, por não expor o material diretamente à ação dos raios solares, além de proteger os produtos de poeira, insetos e intempéries que de acordo com Ferreira e Candeias (2015) são as condições mais indicado no processo de secagem de materiais em que os compostos de interesse apresentam alta volatilidade como é o caso das plantas aromáticas, medicinais e condimentares. Também foi estabelecido que o secador deveria ser do tipo híbrido, utilizando energia térmica solar e elétrica para o aquecimento das culturas, reduzindo deste modo o custo da operação, uma vez que, segundo Ekechukwu e Norton, (1999), secadores híbridos podem trabalhar por muitas horas apenas com a energia proveniente da irradiação do sol. Já no período noturno ou em dias nublados, aciona-se a resistência elétrica que fornecerá o calor necessário para a manutenção da temperatura de secagem, reduzindo-se as oscilações no fornecimento térmico, conservando-se a homogeneidade da secagem.

Para atender a necessidade de um equipamento de pequenas dimensões, idealizou-se que o coletor solar fosse retrátil, podendo ser guardado como uma gaveta no interior do secador. Também pensando neste aspecto, estipulou-se que o secador deveria atender a uma demanda de secagem relativamente pequena, onde o abastecimento seria feito com 0,8 kg de erva aromática, medicinal ou condimento recém colhida. Foram adotados como base para o dimensionamento, as propriedades físicas do manjeriço, pela similaridade de suas propriedades com diversos outros materiais de interesse que podem ser desidratados. As propriedades da planta são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2- Propriedades físicas do manjeriço

Material de secagem	Manjeriço (<i>Ocimum basilicum L.</i>)
Densidade (ρ_m)	0,89 g/m ³
Calor Específico (C_p)	425 kcal/kg°C
Umidade inicial (U_i)	88,3%

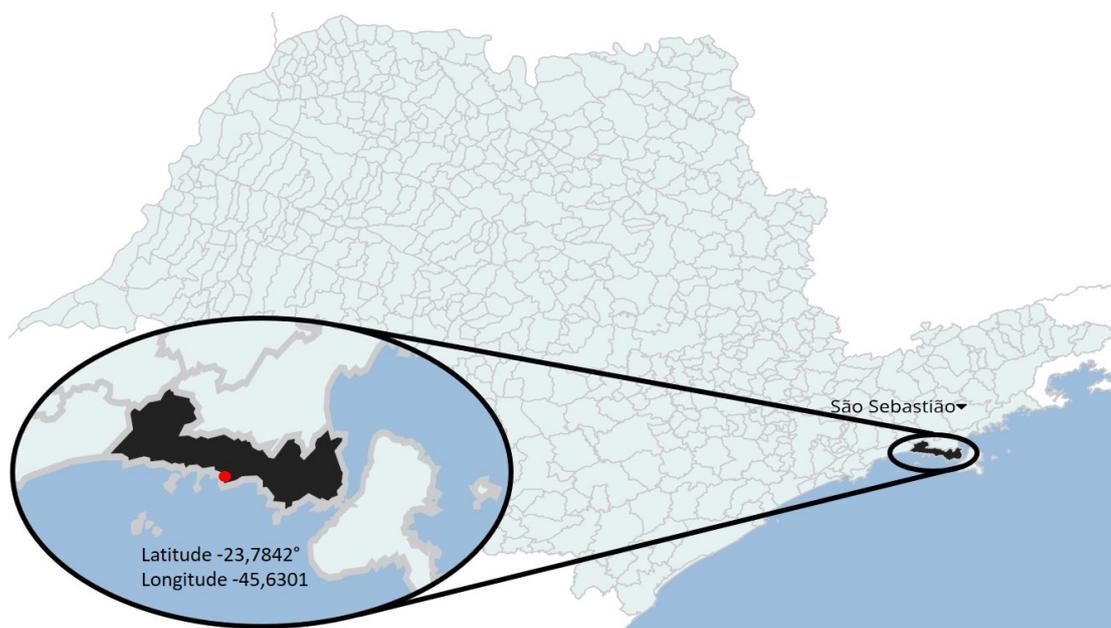
Fonte: Adaptado de Lima, (2013).

De acordo com Akoy, *et al.* (2006), para o dimensionamento de um secador, existem alguns pontos cruciais que devem ser levados em consideração como quesitos para que sirvam de parâmetro na execução do projeto. Em seu estudo são destacados propriedades pertinentes e compatíveis à realização deste trabalho, sendo elas a quantidade de umidade a ser removida, o tempo de secagem, a vazão de ar aplicada na secagem e as dimensões do coletor solar. Já no estudo realizado por Hussein *et al.* (2017), de modelagem e construção de um secador híbrido, também são destacadas variáveis importantes ao projeto, como o calor necessário para evaporar toda a umidade e o fluxo de calor para promover o processo de secagem.

3.1.2 Variáveis conhecidas e estipuladas

As variáveis ambientais usadas como referência são da cidade de São Sebastião no litoral norte paulista, latitude -23,7842° e longitude -45,6301°. A localização pode ser vista na figura 18.

Figura 18- Mapa do local de referência para a coleta dos dados ambientais



Fonte: Adaptado de São Paulo em Mapas (2021).

A tabela 3, mostra as médias das propriedades ambientais durante os últimos três anos, no município de São Sebastião.

Tabela 3- Dados ambientais da cidade de realização do experimento

Propriedade	Valor	Unidade
Pressão atmosférica (P)	1014,7	hPa
Temperatura média (T)	24,0	°C
Umidade relativa do ar média (UR)	78,6	%

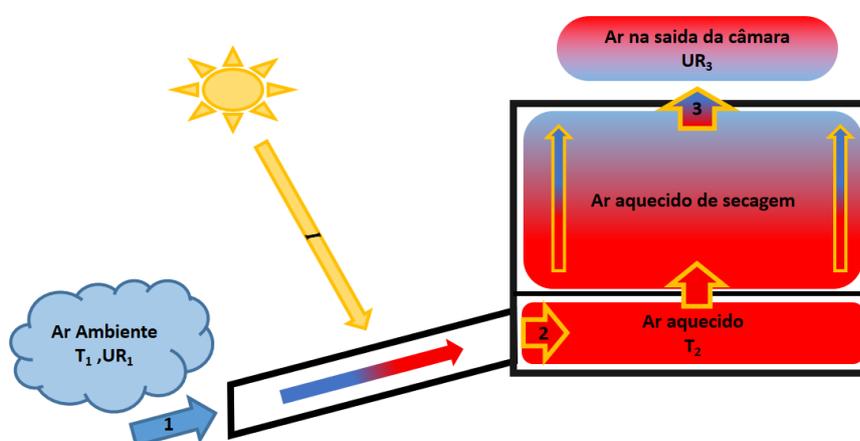
Fonte: INMET (2020).

As informações ambientais foram consideradas como condições iniciais de entrada do processo de secagem, assim são obtidas as variáveis já conhecidas T_1 e UR_1 , respectivamente temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar de entrada no coletor.

Além das variáveis conhecidas, foram definidos alguns parâmetros desejados ao ar aquecido de secagem com o intuito de executar o processo de modo que os produtos sejam desidratados de maneira adequada. Nesse sentido, Ferreira e Candeias (2015), sugerem que as plantas aromáticas devem ser secas sob temperaturas entre 30°C e 40°C, e Cornejo, (2018) recomenda a secagem de vegetais folhosos no intervalo de 40°C a 60°C, definido que o secador opere com à temperatura de secagem de 40°C, representado por T_2 .

Segundo Tunnermann, (2018) um indicador que a secagem está ocorrendo de forma eficiente é observar a umidade relativa na saída do secador, onde deve variar em percentuais superiores a 80%, desta forma foi estipulado que a umidade relativa na saída do secador simbolizada por UR_3 , seria de 80%. A figura 19 ilustra as variáveis que são conhecidas e que foram estipuladas para início dos cálculos das propriedades psicrométricas de secagem. Para facilitar a identificação de cada etapa do processo de secagem, os pontos na entrada do coletor solar, logo após o coletor solar e na saída da câmara foram identificados respectivamente com os números 1, 2 e 3.

Figura 19- Esquema de variáveis conhecidas e estipulada



Fonte: Autoria própria (2021).

A seguir, na tabela 4 estão os valores das condições conhecidas e preestabelecidas na concepção deste projeto de secador, que servem de ponto de partida para os cálculos das propriedades psicrométricas.

Tabela 4- Propriedades do ar no processo de secagem

Pontos	Propriedade	Valor
1	Temperatura de entrada (T_1)	24°C
1	Umidade relativa de entrada (UR_1)	78,6%
2	Temperatura de secagem (T_2)	40°C
3	Umidade relativa na saída da câmara (UR_3)	80%

Fonte: Autoria própria (2021).

Quanto ao produto a ser desidratado, foi adotado como referência o manjeriço (*Ocimum basilicum L.*), sendo definido como capacidade máxima de massa de produto no secador, o valor de 0,8 kg, onde a massa do produto é representada por m_p . Segundo Lima (2013), o percentual de umidade inicial, dado por U_i , encontrado no manjeriço é de 88,3%. Já de acordo com Ferreira e Candeias (2015), a umidade ideal após a secagem de plantas aromáticas deve ser de 5% a 10%

de sua massa inicial, sendo assim determinou-se que o percentual de umidade final do produto de 8% seria uma boa estimativa para fins de cálculo das variáveis subsequentes. Na tabela 5 são mostradas as propriedades obtidas na literatura e propriedades preestabelecidas no projeto, referentes ao material que será desidratado.

Tabela 5- Propriedades do material que será desidratado

Propriedade	Valor
m_p	0,8 kg
U_i	88,3%
U_f	8,0%

Fonte: Autoria própria (2021).

3.1.3 Variáveis psicrométricas

Inicialmente foram calculadas a massa de água removida (m_r) e a massa final do produto seco (m_{ps}), mostradas na tabela 6. Onde são mostradas as variáveis com seus respectivos valores, assim como as etapas de cálculo, em que são enumeradas em ordem crescentes a sequência dos cálculos realizados, além de também serem mostradas as equações utilizadas.

Tabela 6- Massa do produto e de umidade removidos

Etapa de Cálculo	Variável	Valor	Equação
1	m_r	0,7 kg	1
2	m_{ps}	0,1 kg	2

Fonte: Autoria própria (2021).

Em seguida, calculou-se as variáveis psicrométricas do ar de entrada do secador, na região identificada na figura 21 como ponto 1. Para o ar que passa por este local foram calculadas a pressão de vapor saturado (P_{s1}), pressão de vapor não saturado (P_{V1}), razão de mistura (ω_1) e entalpia de secagem (h_1). Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 7, e serão usados para os cálculos posteriores do dimensionamento.

Tabela 7- Propriedades psicrométricas do ar de entrada do coletor

Etapa de Cálculo	Variável	Valor	Equação
3	P_{s1}	29,8 hPa	3
4	P_{V1}	23,4 hPh	9
5	ω_1	0,0147 g vapor/g ar seco	8
6	h_1	61578 J/kg ar seco	15

Fonte: Autoria própria (2021).

Após o cálculo das propriedades na entrada do coletor, foram calculadas as propriedades psicrométricas do ar na entrada da câmara (saída do coletor), identificado como ponto 2. A transição da passagem do fluxo de ar pela fonte de calor, seja ela o coletor solar ou a resistência é caracterizado como aquecimento simples, onde a razão da mistura se mantém constante, servindo como ponto de partida dos cálculos das propriedades do ar aquecido. Os valores calculados são mostrados na tabela 8.

Tabela 8- Propriedades psicrométricas do ar de entrada da câmara

Etapa de Cálculo	Variável	Valor	Equação
7	ω_2	0,0147 g vapor/g ar seco	$\omega_2 = \omega_1$
8	P_{s2}	73,7 hPa	3
9	P_{V2}	23,5 hPa	8
10	h_2	77203,7 J/kg ar seco	15

Fonte: Autoria própria (2021).

Durante a passagem do fluxo de ar pela câmara de secagem (transição entre os pontos 2 e 3), considera-se que não há trocas de calor entre o interior do compartimento e o meio externo. Por este motivo, durante a transição a entalpia conserva-se constante. Com o valor estipulado como ideal para a umidade relativa na saída da câmara, utilizou-se da carta psicrométrica da figura 21 para identificar a temperatura de bulbo seco no ponto 3 ou temperatura de saída da câmara, sendo possível realizar o cálculo das demais propriedades. Os valores encontrados para esta etapa são mostrados na tabela 9.

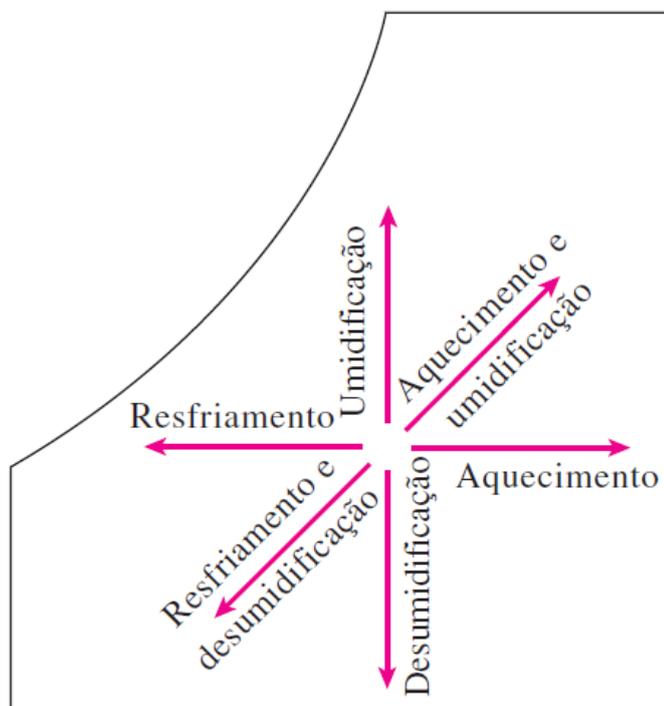
Tabela 9- Propriedades psicrométricas do ar na saída da câmara

Etapa de Cálculo	Variável	Valor	Equação
11	T_{sc}	28°C	Figura 13
12	h_3	77203,7 J/kg ar seco	$h_3 = h_2$
13	P_{s3}	37,6 hPa	3
14	P_{V3}	30,1 hPa	9
15	ω_3	0,019 g vapor/g ar seco	8

Fonte: Autoria própria (2021).

Deve-se destacar que as propriedades de secagem também podem ser obtidas com boa precisão fazendo uso da carta psicrométrica. A imagem 20 ilustra o comportamento de diversos fenômenos quando analisados na carta psicrométrica.

Figura 20- Fenômenos representados na carta psicrométrica



Fonte: Adaptado de Çengel E Boles (2006).

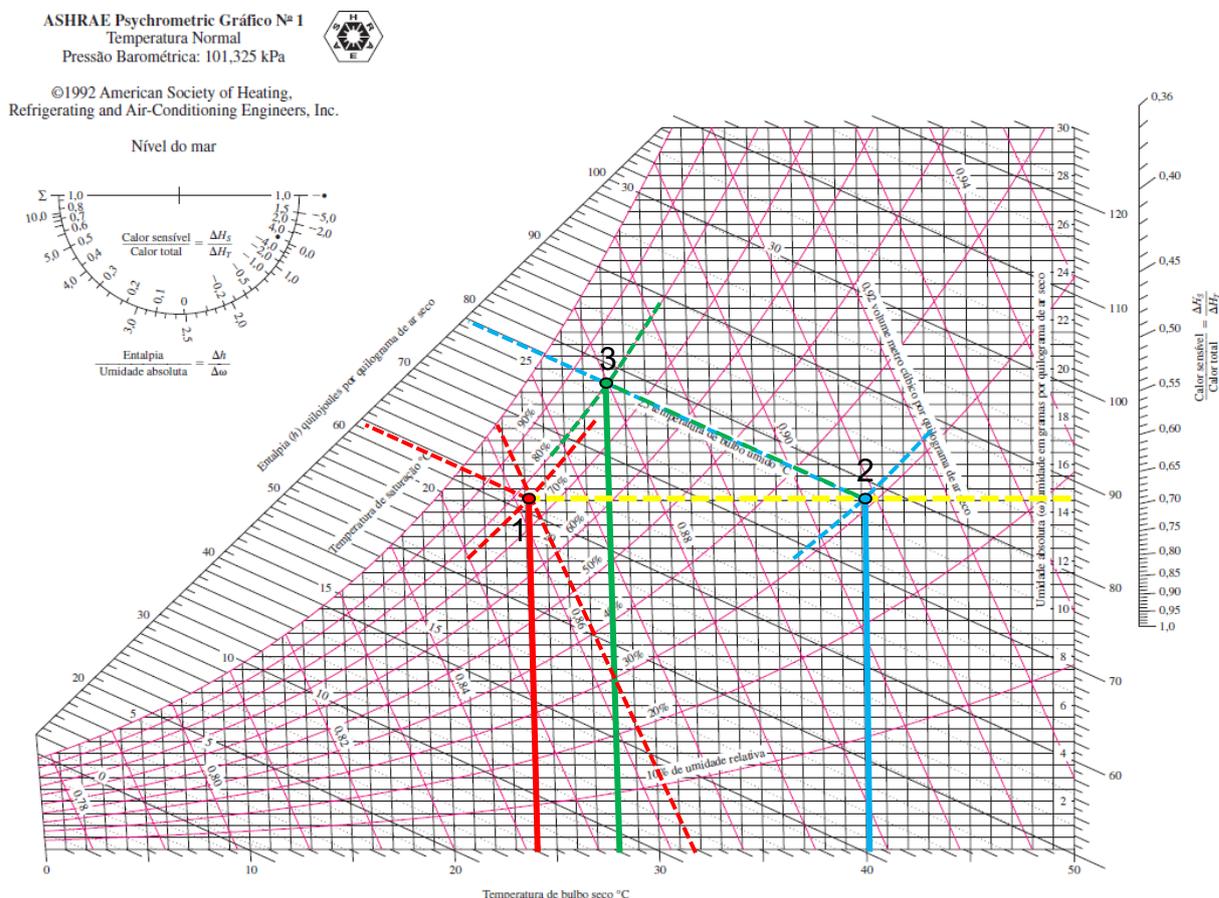
Em um primeiro momento, no processo caracterizado como aquecimento simples, a umidade específica mantém-se constante, ao passo que com o aumento da temperatura de bulbo seco a umidade relativa do ar diminui. A umidade relativa relaciona a quantidade de umidade com a capacidade de absorver umidade sob uma mesma temperatura, assim o aumento da temperatura de bulbo seco promove a redução da umidade relativa e por consequência o aumento da capacidade de absorver a umidade de materiais durante a secagem (ÇENGEL e BOLES, 2006). Este fenômeno é visto na figura 21 como a transição entre os pontos 1 e 2, onde o ponto 1 marca a entrada do ar no coletor, e o ponto 2 indica o ar de secagem na entrada da câmara.

Em um segundo momento, quando o ar de secagem passa pelo produto a ser desidratado, considera-se que o processo é adiabático desprezando-se quaisquer trocas de calor do interior da câmara para o meio, ignorando-se as transferências de calor por condução e radiação entre a câmara e o ambiente. Deste modo, o calor que promove a evaporação da umidade do produto, advém exclusivamente do ar de secagem (BROOKER, BAKKER-ARKEMA e HALL, 1992), interação que pode ser observada na figura 21 como a transição entre os pontos 2 e 3, onde o ponto 2

representa o ar de secagem na entrada da câmara, e o ponto 3 representa o ar já na saída da câmara. Nesta transição, ocorre a secagem do material, fenômeno denominado como resfriamento evaporativo, onde parte da umidade passa a evaporar do produto após absorver o calor do ar de secagem. Por sua vez, a corrente de ar sofre a redução da temperatura de bulbo seco, sua umidade relativa aumenta, ao mesmo tempo em que sua entalpia e temperatura de bulbo úmido são mantidos constantes (ÇENGEL e BOLES, 2006).

Por meio das propriedades psicrométricas calculadas, é possível dimensionar o sistema de aquecimento do secador, do qual fazem parte o coletor solar e a resistência elétrica.

Figura 21- Representação gráfica do processo e aquecimento simples

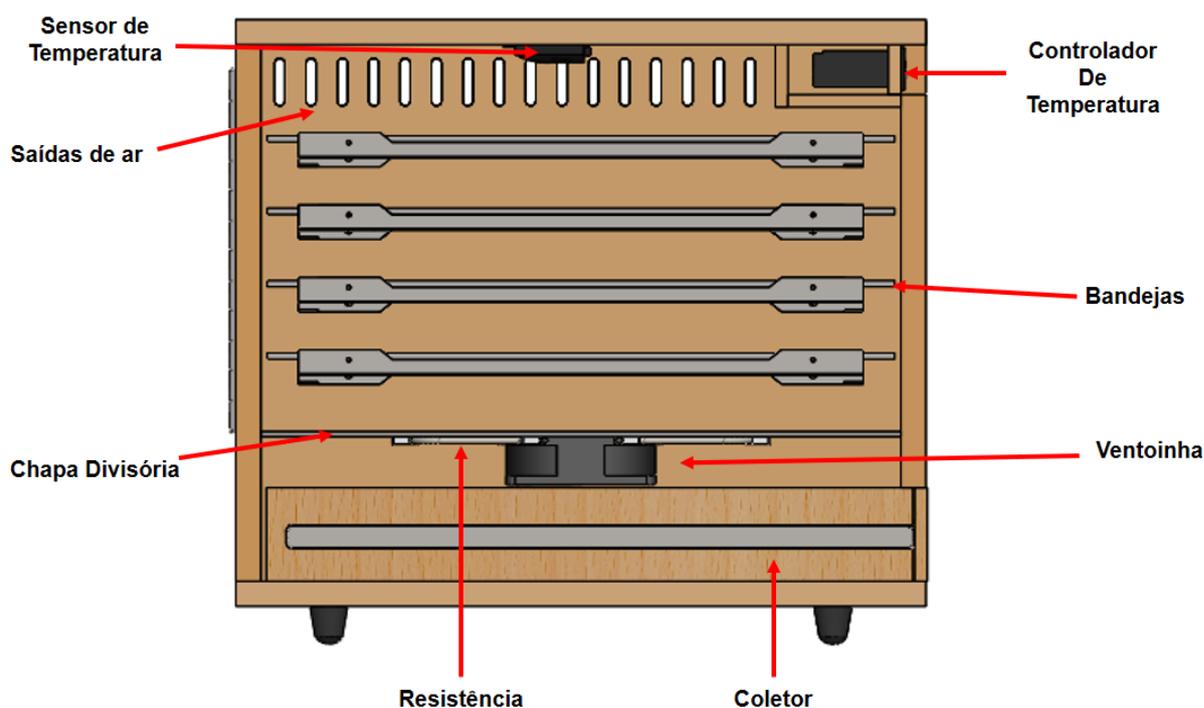


Fonte: Adaptado de ÇENGEL e BOLES (2006).

4 DIMENSIONAMENTO

O secador idealizado consiste em uma câmara de secagem onde devem ser posicionadas quatro bandejas móveis por meio de corrediças a fim de facilitar a operação, além de um sensor de temperatura na parte superior da câmara, em um pequeno compartimento isolado deve-se posicionar o controlador de temperatura. No compartimento inferior, separado da câmara por uma chapa divisória devem ser fixados a resistência elétrica e o micro ventilador, sendo acomodado logo abaixo destes, o coletor solar foi idealizado para ser retrátil com a finalidade atender a demanda térmica e ocupar menos espaço quando fora de operação. A figura 22 mostra o posicionamento dos componentes no interior do secador.

Figura 22- Identificação dos componentes do secador



Fonte: Autoria própria (2021).

A seguir estão descritas as etapas para o dimensionamento da câmara de secagem, bandejas, coletor solar e sugestão de componentes necessários para o controle da temperatura e umidade das culturas desidratadas.

4.1.1 Câmara de secagem e estrutura do secador

A câmara de secagem foi dimensionada a partir da premissa que seu volume ocupado pelo produto sob secagem (V_o), seja de 13% do volume total da câmara, proporção recomendada pela literatura como ideal para uma secagem eficiente. Primeiro, usando como modelo para dimensionamento das propriedades do manjeriço, foi possível calcular o volume ocupado por uma massa de produto (m_p) equivalente a 0,8 kg, como visto na equação (23).

$$V_o = \frac{m_p}{\rho_m} \quad (23)$$

Em seguida foi possível calcular o volume total (V) necessário para a câmara de secagem, considerando que o volume ocupado é igual a 13%. Como visto na equação (24).

$$V = \frac{V_o}{0,13} \quad (24)$$

Posteriormente se atribuiu proporções diferentes a cada aresta de modo que este volume fosse mantido, como mostrado na equação (25). Os valores calculados podem ser vistos na tabela 10.

$$V = \frac{V_o}{0,13} = L_i A_i C_i \quad (25)$$

Tabela 10- Dimensões internas da câmara de secagem

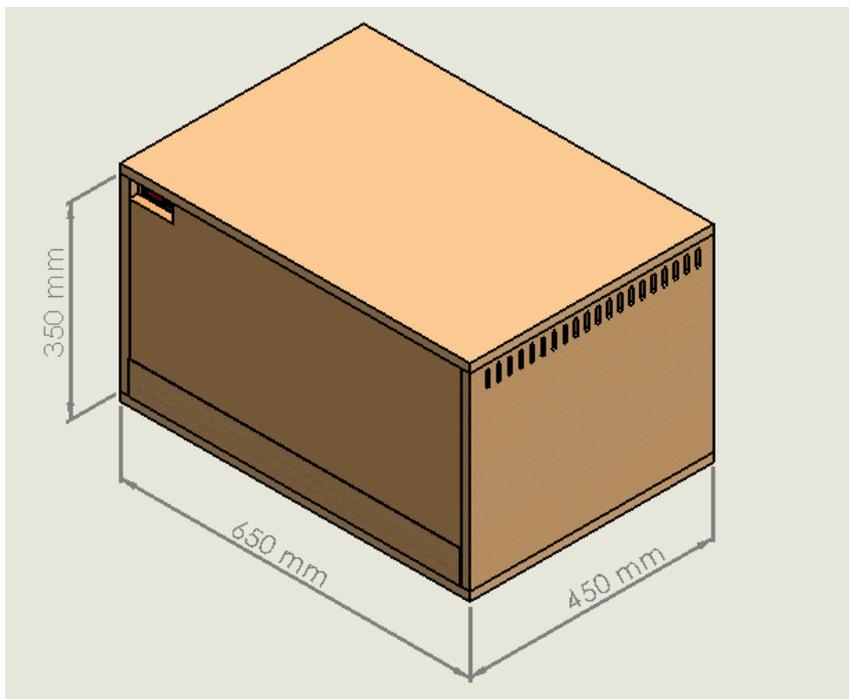
Etapa de Cálculo	Propriedade	Valor	Equação
16	Volume ocupado (V_o)	8989 cm ³	23
17	Volume (V_i)	69144 cm ³	24
18	Largura (L_i)	40 cm	25
19	Altura (A_i)	30 cm	25
20	Comprimento (C_i)	60cm	25

Fonte: Autoria própria (2021).

Uma estimativa das dimensões totais do secador, foram calculadas somando-se as dimensões da câmara de secagem, as dimensões das estruturas base do secador, revestimentos e compartimento para componentes e coletor solar, com

base em medidas comerciais de materiais que poderiam vir a ser empregados na construção de um protótipo. As dimensões estão ilustradas na figura 23.

Figura 23- Dimensões do secador solar



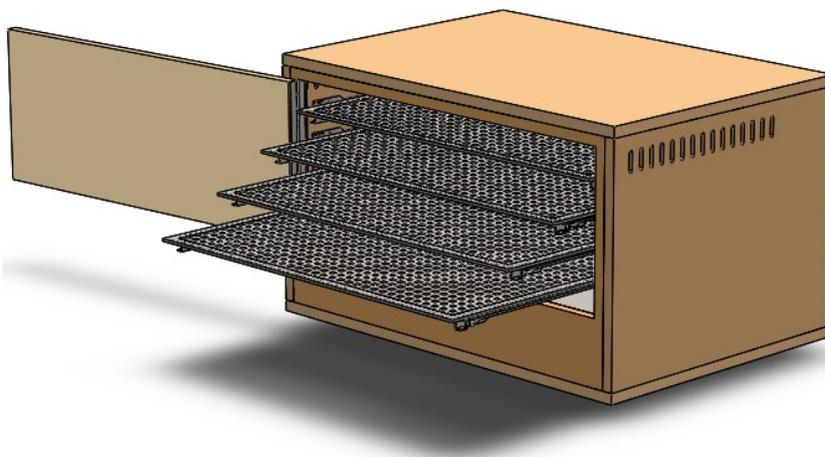
Fonte: Autoria própria (2021).

4.1.2 Bandejas

Para melhor distribuição das culturas, no interior da câmara foi definido que o material seria disposto sobre quatro bandejas, construídas em material vazado para que haja a menor restrição de fluxo de ar. Para facilitar a operação, optou-se pelo uso de corrediças para facilitar o manuseio das bandejas e a carga e descarga de material no secador.

As bandejas foram projetadas para serem leves, resistentes à temperatura de secagem, sendo fabricadas com matéria de baixo custo e que permitam o seu fácil manuseio, além de não promoverem contaminação de qualquer natureza sobre os produtos sob secagem. Deste modo, uma alternativa sugerida que é economicamente viável e que atenderia a todas as demais demandas, seria a fabricação das bases das bandejas em madeira, dispostas em forma retangular formando uma moldura de 38x58 cm, revestidas por tela de alumínio mesh 14, fio 0,30 mm. A figura 24 mostra a forma construtiva que foi idealizada para as bandejas.

Figura 24- Bandejas para secagem



Fonte Autoria própria (2021).

4.1.3 Aquecimento e circulação de ar

Foi considerado uma estimativa do tempo de secagem baseado no estudo feito por Filho *et. al.*, para a secagem de folhas de manjeriço com convecção forçada sob temperatura de 40°C. Neste trabalho destaca-se que a remoção da umidade ocorre majoritariamente nos dois primeiros dias de secagem, assim inferiu-se que uma boa estimativa para o tempo de secagem, seria o período de 24 horas. A demanda energética e o fluxo de ar mínimos necessários para a remoção da umidade do produto, estão expressos na tabela 11.

Tabela 11- Demanda energética necessária para a remoção da umidade

Etapa de Cálculo	Propriedade	Valor	Equação
22	Fluxo de calor necessário (\dot{Q})	276 W	21
23	Fluxo mássico (\dot{m}_T)	0,0175 kg/s	19
24	Fluxo Volumétrico (\dot{V}_T)	0,0156 m ³ /s	20

Fonte: Autoria própria (2021).

O coletor foi pensado para atender a demanda térmica de 276 W durante o dia, reduzindo o consumo de energia elétrica proveniente do acionamento da resistência, que por sua vez, também deve atender a demanda mínima de 276 W. O perfil do coletor escolhido foi o modelo de passagem única sobre placa, onde o fluxo de ar passa entre a chapa metálica para absorção da energia térmica e o material translúcido, que para este projeto optou-se por acrílico. Este modelo foi escolhido devido a temperatura de secagem não ser muito elevada, considerou-se este perfil

como suficiente para atender tal demanda, além é de simples construção. Para reduzir as dimensões do equipamento, o componente foi projetado para ser retrátil, podendo ser guardado para transporte em um compartimento abaixo da câmara de secagem. É importante destacar que as dimensões do coletor foram atribuídas de modo a respeitar a área mínima exigida para atender a demanda energética do secador, previamente calculada. A equação (26) mostra a relação usada para atribuir as dimensões do coletor.

$$A_c = C_c L_c \quad (26)$$

Foi considerado para o cálculo da área a eficiência de 40%, uma vez que de acordo com Akoy *et al.* (2006), a eficiência deste componente varia entre 30 a 50%. As características construtivas para o coletor estão expressas na tabela 12.

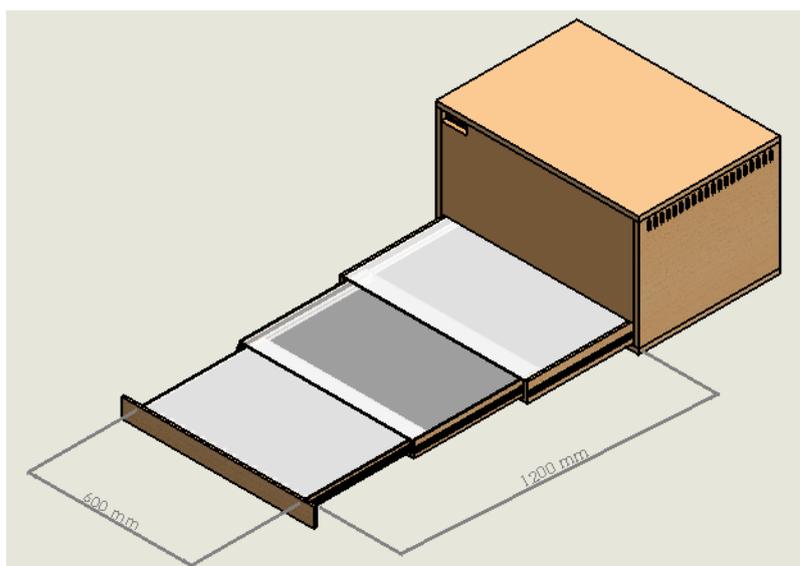
Tabela 12- Dados construtivos calculados para o coletor.

Etapa de Cálculo	Propriedade	Valor	Equação
25	Ângulo de Inclinação (β)	34 °	16
26	Área (A_c)	0,7 m ²	17
27	Comprimento (C_c)	0,6 m	26
28	Largura (L_c)	1,2 m	26

Fonte: Autoria própria (2021).

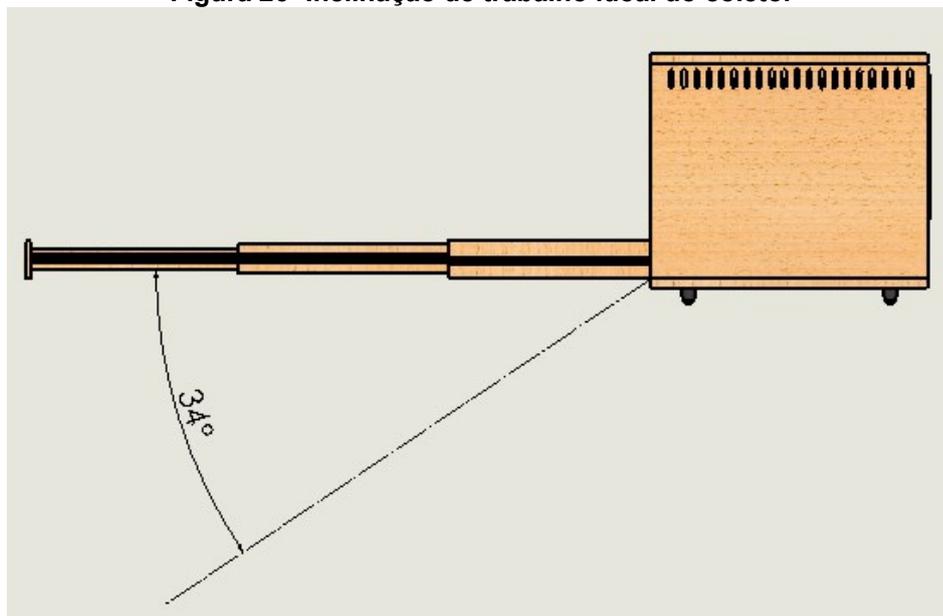
A figura 25 mostra as dimensões do coletor solar retrátil.

Figura 25- Dimensões do coletor solar



Fonte: Autoria própria (2021).

A figura 26 mostra a inclinação ideal de trabalho do coletor.

Figura 26- Inclinação de trabalho ideal do coletor

Fonte: Autoria própria (2021).

4.1.4 Instrumentos

Para o bom funcionamento do secador, sob parâmetros de secagem adequados é necessário que os equipamentos atendam alguns quesitos mínimos. Deste modo, foi considerado que a resistência de 300 W seria ideal ao aquecimento, por ser o valor comercial mais próximo de atender a demanda 276 W calculada. Quanto ao sistema de circulação de ar, foi escolhida a ventoinha com vazão volumétrica de 2220 l/min, também motivado pelo fato de ser o componente comercial com características mais próximas ao valor teórico encontrado de 936 l/min

Para realizar o controle da umidade e temperatura no interior da câmara optou-se por utilizar um controlador que seja capaz de acionar a resistência sempre que a temperatura no interior da câmara atinja valores abaixo do patamar estipulado. Como a potência empregada no aquecimento deve possuir potência de 300 W considerando que será alimentada com tensão de 227 V, o controlador deve possuir capacidade de suportar correntes elétricas de até 1,4 A em sua saída dedicada ao acionamento da resistência elétrica.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve a finalidade de dar início aos estudos para o desenvolvimento de um secador solar híbrido que possa realizar a secagem de plantas aromáticas, medicinais e condimentares de maneira adequada. Sendo identificado na bibliografia que as formas construtivas mais adequadas para um secador empregado na secagem destas culturas são aquelas em que os produtos não são expostos diretamente aos raios solares e que fiquem abrigadas das intempéries do ambiente, sendo expostos à convecção forçada. Deste modo a escolha mais indicada para atender as premissas definidas inicialmente são os secadores do tipo gaveta de secagem indireta. De acordo com a literatura, para este tipo de produto a temperatura de secagem ideal está na faixa de entre 30 a 60°C, sendo definido a temperatura de 40°C como ponto ótimo para a secagem, por promover a secagem sem os riscos de prolongar muito o processo, pois acarretaria na degradação devido a reações enzimáticas e contaminação pela proliferação de microrganismos, ou ainda a possibilidade de volatilização de princípios ativos de interesse, normalmente causada por exposição à temperaturas superiores ao recomendado para a secagem de cada cultura.

Mediante análise da literatura também se constatou que uma ótima alternativa para reduzir o custo de operação do equipamento, seria o emprego da energia térmica proveniente do sol, captada por meio do coletor solar para servir de fonte complementar de energia térmica, deste modo, reduzindo o tempo de uso da resistência na manutenção da temperatura de 40°C, tendo como consequência a economia de energia elétrica. Sendo que dada as temperaturas relativamente baixas optou-se por usar um coletor simples de passagem única. Além disso foi identificada à necessidade da manutenção das condições térmicas no interior da câmara, fazendo-se necessário o uso de uma resistência para fornecimento de calor trabalhando complementarmente ao fornecimento térmico solar. Foi definido que seria necessário o emprego de algum equipamento que pudesse realizar o monitoramento de temperatura e acionamento e desligamento da resistência elétrica durante os períodos de variação da insolação.

Além disso os resultados do dimensionamento apresentam características construtivas coerentes com as condições encontradas na literatura assim também são coerentes a produtos encontrados comercialmente. Onde a potência requerida pelo

sistema de aquecimento é de 0,3 kW, compatível com o trabalho realizado por Hussein *et al.* (2017), usado para a secagem de tomates, que foi projetado com potência de 0,5 kW.

Como sugestão para futuros trabalhos estão a construção e testes do secador assim como a realização de estudos mais aprofundados para o dimensionamento do coletor, onde pode-se destacar a escolha mais adequada para a chapa absorvente ou a possibilidade de variação no *design* construtivo, utilizando-se de um modelo mais elaborado e com menos perdas, como os modelos de dupla passagem de fluxo, ou ainda de fluxo paralelo, podendo-se inclusive realizar o teste comparativo entre diferentes modelos. Aplicação de isolante térmico na câmara e coletor, com a finalidade de redução das perdas energéticas ou ainda realização de análise comparativa com diferentes isolantes. Também fica como sugestão a adaptação do modelo para secagem mista, assim faria o uso do calor proveniente do coletor além do advindo da exposição direta a irradiação. Outra boa opção de estudo seria o uso de instrumentação mais robusta, que permita o monitoramento e registro preciso dos dados do processo, acarretando em uma análise mais assertiva dos resultados.

REFERÊNCIAS

- AKOY, E.- A. O. M. et al. **Design and Construction of A Solar Dryer for Mango Slices**. Proceedings of International Research on food, Natural Resource Management and Rural Development-Tropement. Bonn: University of Bronn. 2006.
- ALMAGRO, A. S. et al. Secagem de Fatias Cilíndricas de Banana em Um Secador Solar Artesanal Híbrido. **X Congresso Brasileiro de Engenharia Química Iniciação Científica**, Vassouras, v. 1, n. 1, Dezembro 2017.
- ARAÚJO, C. V. M.; GUERRA, F. K. D. O. M. V.; VALE, M. R. B. G. Construção de um Secador Solar no Semiárido Nordestino Utilizando Materiais Recicláveis. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 12, n. 1, p. 21-30, Julho 2021.
- BANOUT, J. Solar Drying Systems. In: PRAKASH, O. **Solar Drying Technology**. [S.l.]: Springer, v. 1, 2017. Cap. Part 2-2, p. 39-68.
- BLANCO, M. C. S. G.; SILVA, S. M. P. D. Panorama e Perspectivas da Cadeia Produtiva de Plantas Medicinais e Aromáticas. **Casa da Agricultura**, Campinas, v. 3, p. 13-14, Julho-Agosto 2013. ISSN ISSN 0100-6541.
- BRENNDORFER, B. et al. **Solar dryers their role in postharvest processing**. 1ª. ed. London : Commonwealth Science Council, 1985.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and Storage Of Grains and Oilseeds**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1992.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 5 ed. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.
- CORNEJO, F. E. P. **Documentos 130-Construa Você Mesmo um Desidratador de Alimentos**. Embrapa Agroindústria de Alimentos. Rio de Janeiro, p. 23. 2018. (ISSN 1516-8247).
- CORRÊA, R. A. B. L.; FREIRE, J. T.; FERREIRA, M. C. Caracterização de Meios Porosos Constituídos por folhas de MANjeriçãO (Ocimum basilicum L.). **XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, Florianópolis-SC, 19-22 Outubro 2014.
- COSTA, J. B. S. **Obtenção e Caracterização de Farinha de Frutas e Vegetais Através so uso de um Sistema de Srcagem solar de Baixo Custo**. Universidade Federal do rio Grande do Norte. Natal, p. 71. 2010.
- EHIEM, J. C.; IRTWANGE, S. V.; OBETTA, S. E. Design and Development of An Industrial Fruit and Vegetable Dryer. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v. 1, p. 44-53, August 2009. ISSN ISSN: 2040-7467.

EKECHUKWU, O. V.; NORTON, B. Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. **Energy Conversion & Management**, v. 40, p. 615-655, August 1999. ISSN PII:S0196-8904(98)00093-4.

EKOS BRASIL. **Introdução ao Sistema de Aquecimento Solar**. Brasília: [s.n.], 2010.

EMBRAPA. **Princípios de Secagem de Alimentos**. 1ª. ed. Planaltina-DF: [s.n.], v. Documento 276, 2010.

FEIDEN, A. et al. Desidratação de Frutas Utilizando Secador Solar. **Comunicado Técnico**, Corumbá, Dezembro 2015. ISSN ISSN 1981-7231.

FELLOWS, P. J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos princípios e Práticas**. 2ª. ed. [S.I.]: Artmed, 2006.

FERREIRA, A.; CANDEIAS, M. Secagem Solar de frutos e Plantas Aromáticas. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 28, n. 1, p. 363-370, 2015.

FERREIRA, M. D. C. A secagem de folhas aromáticas e medicinais analisada pela óptica de sistemas particulados. In: FREIRE, J. T. **Tópicos Em Secagem de Produtos Naturais**. 1. ed. São Carlos: [s.n.], v. 1, 2018. Cap. 4.

FILHO, A. J. T.; MENON, M. U.; JUNIOR, C. C. Caracterização da produção de plantas medicinais, aromáticas e condimentares no Território Centro-Sul do Paraná. **Ambiência-nRevista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**, Guarapuava, v. 6, n. 3, p. 511-520, Setembro/Dezembro 2010. ISSN ISSN 1808 - 0251.

FILHO, J. L. S. D. C. et al. Influência do Tempo de Secagem no Óleo Essencial de Manjeriço, São Cristóvão.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Processes and Unit Operations**. 3rd. ed. International Edition: Prentice-Hall Int. Editions, 1993.

HII, C. L. et al. **Solar Drying: Fundamentals, Applications and Innovations**. National University of Singapore, University of Nottingham. Singapore, Malaysia Campus, p. 150. 2012. (ISBN: 978-981-07-3336-0).

HUSSEIN, J. B. et al. Design, Construction and Testing of a Hybrid Photovoltaic (PV) Solar Dryer. **International Journal of Engineering Research & Science (IJOER)**, 5 May 2017. 1-14.

INMET. Dados meteorológicos. **Instituto Nacional de Meteorologia**, 2020. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 09 dez. 2021.

ISENBERG, C.; NOZAKI, M. D. H. Influência da Temperatura e das Posições na Secagem de Plantas Medicinais em um Secador a base de Energia Solar. **Revista Acadêmica Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v. 9, n. 1, p. 57-64, Janeiro/Março 2011. ISSN ISSN 0103-989X.

JÚNIOR, C. C.; SCHEFFER, M. C. As plantas medicinais, aromáticas e condimentares e a agricultura familiar. **Revista da Associação Brasileira de Horticultura**, v. 32, Julho-Setembro 2014. ISSN 0102-0536.

JÚNIOR, O. M.; SOUZA, C. C. D. Aproveitamento Fotovoltaico, Análise Comparativa Entre Brasil e Alemanha. **Interações**, Campo Grande, v. 21, n. 2, p. 379-387, abril-Junho 2020.

LIBERTY, J.; OKONKWO, W. I. Solar Crop Drying-A Viable Tool for Agricultural Sustainability and Food Security. **International Journal Of Modern Engineering Research (IJMER)**, June 2014. 08-19.

LIMA, R. D. A. B. **Análise da Secagem Convectiva de Folhas de Manjericão**. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos , p. 145. 2013.

MISQUITA, Í. D. S. et al. Utilização do Arduino na coleta automatizada de dados de um coletor solar. **XLVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, Maceió, 30 Julho 2017.

MORAN, M. J. et al. **Princípios de Termodinâmica Para Engenharia**. 7ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MOSELE, S. H.; CECCHIN, D.; FRARI, R. V. D. Estudo em Inteligência Competitiva para Cadeia Produtiva de Plantas Medicinais e Condimentares. **Perspectiva**, Erechim, v. 34, n. 127, p. 73-83, Setembro 2010.

NORTON, B.; ONYEGEGBU, S. Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. **Energy Conversion & Management**, n. 40, p. 615-655, August 1997. ISSN PII:S0196-8904(98)00093-4.

OGUNTOLA, A.; NWAOKOCHA, C.; ADUNOLA, O. Design and Construction of a Domestic Passive Solar Food Dryer. **Leonardo Journal of Sciences**, January-June 2020. 71-82.

PARK, K. J. B. et al. Seleção de Secadores: Fluxo Grama. **Revista Brasileira de Produtos Agrícolas**, Campina Grande, v. 9, n. 2, p. 179-202, 2007.

PARK, K. J. B. et al. SECAGEM: FUNDAMENTOS E EQUAÇÕES. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 93-127, Abril 2014. ISSN 1517-8595.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2ª. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

SÃO Paulo em Mapas. **INVESTSP**, 2021. Disponível em: <<https://www.investe.sp.gov.br/sp-em-mapas/#>>. Acesso em: 11 nov. 2021.

SENAR. **Plantas medicinais, aromáticas e condimentares: produção e beneficiamento**. Brasília: SENAR, 2017.

SILVA, J. D. S. E. et al. Princípios básicos de psicrometria. In: SILVA, J. D. S. E. **Secagem e Armazenamento de Produtos Agrícolas**. 2ª. ed. Viçosa-MG: Aprenda Fácil, 2008. Cap. 3, p. 42-69.

SILVA, L. R. D. **Sistema de Aquisição de Dados Utilizando Telemetria: Aplicação em Secador Solar de Produtos Agrícolas**. Universidade de São Paulo. Piracicaba, p. 106. 2011.

TORRES-GALLO, R.; LUG, P. J. M.; MARTÍNEZ-PADILLA, K. A. Design and construction of a hybrid system of heating air by combustion of biomass and solar radiation, using phase change material (PCM) as a source of thermal storage, for cassava drying, v. 20, Mayo-Agosto 2017. ISSN ISSN 0123-7799 - ISSN-e 2256-5337.

TSOTSAS, E.; GNIELINSKI, V.; SCHLÜNDER, E. U. Drying of Solid Materials. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**, 2000.

TUNNERMANN, H. **Metodologia Para Dimensionamento de Equipamento Para Secagem da Vagem Verde de Soja e Seus Resíduos**. Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, p. 85. 2018.

VIJAYSN, S.; ARJUNAM, T. V.; KUMAR, A. Fundamental Concepts of Drying. In: KUMAR, A.; PRAKASH, O. **Solar Drying Technology Concept, Design, Testing, Modeling**. 1ª. ed. Singapore: Springer, v. 1, 2017. p. 02-39.