



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



DANILO TORQUATO UBALDINE

**COMPARAÇÃO ENERGÉTICA DE DIFERENTES MÉTODOS DE SECAGEM
DE ALIMENTOS UTILIZANDO CÓDIGO COMPUTACIONAL EES**

ORIENTADORA:
Prof^a. Dr^a. Monica Carvalho

COORIENTADOR:
Prof. Dr. Adriano da Silva Marques

JOÃO PESSOA - PB
2022

PPGER / PROJETO ACADÊMICO/Nº 96

DANILO TORQUATO UBALDINE

**COMPARAÇÃO ENERGÉTICA DE DIFERENTES MÉTODOS DE SECAGEM
DE ALIMENTOS UTILIZANDO CÓDIGO COMPUTACIONAL EES**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) como requisito à obtenção do título de **Mestre em Energias Renováveis.**

Orientadora:

Prof^a. Dr^a. Monica Carvalho

Coorientador:

Prof. Dr. Adriano da Silva Marques

**JOÃO PESSOA - PB
2022**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

U12c Ubaldine, Danilo Torquato.

Comparação energética de diferentes métodos de secagem de alimentos utilizando código computacional EES / Danilo Torquato Ubaldine. - João Pessoa, 2022.
67 f. : il.

Orientação: Monica Carvalho.

Coorientação: Adriano da Silva Marques.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Consumo de energia. 2. EES - Engineering Equation Solver. 3. Entropia. 4. Irreversibilidades. 5. Fluidos refrigerantes. 6. Análise paramétrica. I. Carvalho, Monica. II. Marques, Adriano da Silva. III. Título.

UFPB/BC

CDU 621.317.38(043)

PPGER / PROJETO ACADÊMICO/Nº 96

DANILO TORQUATO UBALDINE

**COMPARAÇÃO ENERGÉTICA DE DIFERENTES MÉTODOS DE SECAGEM
DE ALIMENTOS UTILIZANDO CÓDIGO COMPUTACIONAL EES**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) como requisito à obtenção do título de **Mestre em Energias Renováveis**.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^ª. Yipsy Roque Benito – (UFJF) – examinadora externa

Prof. Dr. Márcio Rodrigo de Araújo Souza – (PPGER – UFPB) – examinador interno

Suplentes:

Prof. Dr. João Alves Lima – (DEER – UFPB) - suplente

Prof. Dr. Alvaro Ochoa (PPGEM – UFPE) - suplente

Prof^ª. Dr^ª. Monica Carvalho
(Orientadora)

Prof. Dr. Adriano da Silva Marques
(Coorientador)

**JOÃO PESSOA - PB
2022**

DEDICATÓRIA

*A Deus.
A minha família, em especial ao meu querido avô, que nos deixou após 102 anos de
dedicação e amor.*

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e por ter me sustentado até hoje, me proporcionando forças e fé para prosseguir nessa longa e árdua jornada.

A minha família, em especial a minha mãe e meu avô, pelo amor, incentivo, apoio incondicional e também a minha namorada, que sempre esteve comigo nos momentos de luta.

A minha orientadora, professora Monica Carvalho, e ao meu coorientador, professor Adriano da Silva Marques pela paciência, apoio, por toda orientação, incentivo e confiança durante toda a minha trajetória.

A todos os professores e colegas da UFPB que passaram pelo meu caminho ao longo desses anos por todo o conhecimento e experiências compartilhadas.

Aos meus amigos por todo carinho e amizade, que sempre falaram palavras de conforto, carinho e paciência. A todas as pessoas que passaram pela minha vida ao longo dessa jornada, contribuindo para que eu chegasse até aqui.

A Universidade Federal da Paraíba por todo o suporte técnico, estrutural e também pela bolsa concedida.

RESUMO

O processo de secagem de alimentos apresenta diversos benefícios, como facilidade de armazenamento, redução da contaminação microbiana e facilidade de transporte. Porém, é um processo que comumente consome muita energia. O presente trabalho apresenta um estudo que aborda a secagem de alimentos, a partir de uma avaliação termodinâmica dos objetos de estudo. A estrutura do trabalho é composta por cinco capítulos, e tem como objetivo geral realizar uma análise comparativa entre dois cenários diferentes de secagem de alimentos, o primeiro cenário composto por uma secadora de alimentos a bomba de calor, e o segundo cenário composto por uma secadora a resistência elétrica. O primeiro passo realizado foi uma revisão sistemática para avaliar os diversos estudos desenvolvidos na área de interesse. Posteriormente, foi desenvolvida uma avaliação termodinâmica da secadora a bomba de calor, através de uma aplicação da primeira e segunda leis da termodinâmica. Foi desenvolvida ainda uma análise paramétrica e uma comparação com diferentes fluidos refrigerantes. O próximo passo foi o desenvolvimento de uma avaliação termodinâmica da secadora a resistência elétrica e uma comparação com a secadora a bomba de calor. As avaliações termodinâmicas foram feitas com o auxílio do programa computacional *Engineering Equation Solver*. A partir do estudo, foi possível constatar que a secadora a bomba de calor apresentou resultados significativamente melhores do que a secadora a resistência elétrica em relação ao consumo de energia e à geração de entropia. A secagem utilizando a secadora a resistência elétrica apresentou um aumento de 209,9 % na demanda de energia para a secagem de batata doce e 74,7 % para a secagem de macaxeira. Em relação à entropia, a secadora a resistência elétrica apresentou valores maiores do que a secadora a bomba de calor utilizando o fluido refrigerante R717 em todos os cenários analisados. Por fim, foi desenvolvida uma análise do auxílio de energia solar fotovoltaica para a demanda de energia das secadoras de alimentos estudadas, para encontrar a área necessária para gerar a energia demandada no processo de secagem. O trabalho mostra que a utilização de bombas de calor no processo de secagem é uma alternativa viável do ponto de vista termodinâmico, para a redução do consumo de energia e desperdícios.

Palavras-Chave: *Engineering Equation Solver; Energia; Entropia; Irreversibilidades; Fluidos refrigerantes; Análise paramétrica.*

ABSTRACT

The food drying process has several benefits, such as ease of storage, reduction of microbial contamination and ease of transport. However, it is a process that usually consumes a lot of energy. The present work presents a study that approaches the drying of foods, from a thermodynamic evaluation of the objects of study. The structure of the work consists of five chapters, and its main goal is to carry out a comparative analysis between two different scenarios of food drying, the first scenario consisting of a heat pump food dryer, and the second scenario consisting of a electrical resistance dryer. The first step was developing a systematic review to evaluate the various studies developed in the area of interest. The second step was developing a thermodynamic evaluation of the heat pump dryer, through an application of the first and second laws of thermodynamics. A parametric analysis and a comparison with different refrigerants were also developed. The next step was developing a thermodynamic evaluation of the electric resistance dryer and a comparison with the heat pump dryer. The thermodynamic estimates were made with the aid of the Engineering Equation Solver computer program. From the study, it was possible to verify that the heat pump dryer presented significantly better results than the electric resistance dryer in relation to energy consumption and entropy generation. Drying using an electric resistance dryer showed an increase of 29.9% in energy demand for drying sweet potato and 74.7% for drying cassava. Regarding entropy, the electric resistance dryer showed higher values than the heat pump dryer dryer using R717 coolant fluid in all analyzed studies. Finally, an analysis of the aid of photovoltaic energy for the energy of the demand energy dryers was developed, to find the necessary area to generate the drying process. The work showed that the use of heat pump dryers in the drying process is a viable alternative in a thermodynamic point of view, for a reduction of energy consumption and waste.

Keywords: *Engineering Equation Solver; Energy; Entropy; irreversibilities; refrigerant fluids; Parametric analysis.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Gráfico ilustrativo da cinética de secagem.....	19
Figura 2.2. Gráfico ilustrativo da cinética de secagem.....	20
Figura 2.3. Gráfico ilustrativo da cinética de secagem.....	21
Figura 2.4. Esquema termodinâmico do funcionamento de ciclo de refrigeração por compressão de vapor.....	24
Figura 2.5. Comparação da temperatura de condensação entre diferentes fluidos refrigerantes.....	26
Figura 2.6. Esquema termodinâmico de uma bomba de calor para secagem de alimentos.....	27
Figura 2.7. Esquema termodinâmico de uma bomba de calor.....	29
Figura 3.1 Interface do programa EES.....	32
Figura 3.2. Tabela de opções de funções do EES.....	32
Figura 3.3. Diagrama de blocos do modelo computacional.....	33
Figura 3.4. Esquema termodinâmico da secadora a bomba de calor.....	34
Figura 3.5. Esquema utilizado para análise termodinâmica do painel solar fotovoltaico.....	40
Figura 3.6. Esquema da secadora a energia solar com auxílio de energia solar fotovoltaica.....	42
Figura 3.7 Diagrama esquemático da secadora por resistência elétrica.....	42
Figura 3.8. Esquema da secadora a resistência elétrica com painéis fotovoltaicos.....	43

Figura 4.1. Gráfico do caudal mássico vs. A) Temperatura de saída e b) umidade relativa de saída do ar. Secagem de macaxeira.....	52
Figura 4.2. Gráfico do caudal mássico vs. A) Temperatura de saída e b) umidade relativa de saída do ar. Secagem de batata doce.....	52
Figura 4.3. Gráfico do caudal mássico vs. A) Temperatura de saída e b) umidade relativa de saída do ar. Secagem de macaxeira.....	53
Figura 4.4. Gráfico do caudal mássico vs. A) Temperatura de saída e b) umidade relativa de saída do ar. Secagem de batata doce.....	53
Figura 4.5. Análise paramétrica da relação entra a temperatura de secagem e a troca de calor para a secagem utilizando a secadora a resistência elétrica.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Dados de entrada para o Ar.....	35
Tabela 3.2. Equações para o balanço de massa e energia de cada componente da bomba de calor.....	37
Tabela 3.3. Equações para a análise de geração de entropia e taxas de destruição de exergia da bomba de calor.....	39
Tabela 3.4. Dados de entrada para o Ar.....	44
Tabela 3.5. Balanços de massa e energia para cada componente nos esquemas de secagem.....	45
Tabela 3.6. Equações para a análise de geração de entropia e taxas de destruição de exergia de cada componente das secadoras de alimentos.....	46
Tabela 4.1. Análise energética para secagem com o R134a.....	48
Tabela 4.2. Fluxo mássico de água condensada no evaporador.....	51
Tabela 4.3. Análise energética para secagem com o R717.....	56
Tabela 4.4. Análise da geração de entropia e destruição de exergia.....	57
Tabela 4.5. Análise energética para secagem com a secadora a resistência elétrica.....	58
Tabela 4.6. Comparação da geração de entropia e taxas de destruição de exergia entre a secagem utilizando a secadora a resistência elétrica e a secadora a bomba de calor.....	59
Tabela 4.7. Comparação da área calculada do painel solar fotovoltaico para a secagem com a secadora a resistência elétrica e a secadora a bomba de calor.....	61

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AIE – International Energy Agency;

COP – Coeficiente de performance;

Cresesb – Centro de Referência para as energias solar e eólica Sérgio de S. Brito;

EES – Engineering Equation Solver;

EMBRACO – Empresa Brasileira de Compressores;

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária;

GLP – Gás liquefeito de petróleo;

UE – União Europeia.

SUMÁRIO

1. CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos.....	17
1.2 Estrutura da dissertação	17
2. CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Secagem de alimentos	18
2.2 Bombas de calor.....	22
2.2.1 Novos fluidos refrigerantes	24
2.3 Análise termodinâmica	26
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1 Secagem a bomba de calor.....	31
3.1.1 Análise termodinâmica.....	34
3.1.1.1 Análise energética.....	36
3.1.1.2 Análise de geração de entropia e taxas de destruição de exergia	38
3.2 Secador de alimentos a resistência elétrica.....	42
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1 Bomba de calor.....	47
4.1.1 Fluidos refrigerantes alternativos.....	53
4.1.2 Resultados da geração de entropia e destruição de exergia.....	56
4.2 Secadora elétrica.....	58
4.3 Influência da energia solar fotovoltaica.....	60
CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
REFERÊNCIAS.....	64

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tem-se observado um grande aumento na demanda e no consumo de energia elétrica, e conseqüentemente, um maior impacto ambiental. A preocupação crescente com o uso de recursos naturais e com fenômenos globais, como o aumento na temperatura média do planeta, decorrente de uma emissão cada vez mais acentuada de gases de efeito estufa, impõe medidas necessárias que tornem a geração de energia elétrica mais eficiente e menos nociva ao meio ambiente.

Dentre as atividades que contribuem para a poluição e para os impactos negativos no meio ambiente, o setor de geração de energia elétrica se encontra em destaque, devido ao seu grande potencial poluidor associado a sua importância para o desenvolvimento de um país. Segundo Kelly (2016), entre 1985 e 2012, foi observado um aumento de 450 terawatt-hora por ano no consumo de energia a nível mundial. Segundo o autor, esse aumento representa uma adição de um país equivalente ao consumo de energia do Brasil a cada ano no mundo. E ainda, a estimativa é que até 2035 esse aumento continue acentuado. Yusuf *et al.* (2020) argumenta sobre a relação entre o aumento do crescimento econômico e o aumento de energia, e um conseqüente aumento nas emissões de dióxido de carbono. Nejat *et al.* (2014), afirmam que 40% do consumo de energia e 33% da emissão de dióxido de carbono mundiais são provenientes da geração de energia em edifícios, dado que mostra a necessidade de pesquisas que investiguem meios para aumentar a eficiência na geração de energia elétrica nesses locais e Kemp (2011) afirma que entre 10 e 20% da energia demandada para o setor de indústria é referente à secagem de alimentos.

Além dos impactos ambientais relacionados à emissão de gases nocivos na atmosfera, existem também problemas relacionados a outros tipos de modais energéticos. Entre eles, podemos destacar as usinas hidroelétricas, que apesar de terem uma elevada capacidade de geração de eletricidade, causam grandes impactos socioeconômicos e ambientais, como por exemplo, emissão de gases de efeito estufa (principalmente metano), aumento na contaminação mercurial do pescado, perda de espécies, recursos pesqueiros, entre outros (KASPER *et al.*, 2014).

Em decorrência do aumento na demanda de energia elétrica, associado a uma tendência mundial na conscientização quanto ao uso sustentável dos recursos naturais, vem-se discutindo em todo o mundo, a incorporação de fontes renováveis à matriz energética dos países. Segundo Gonzáles-Garcia *et al.* (2012) e Luo *et al.* (2008), o uso de fontes de energias limpas tornou-se um assunto de interesse para a sociedade. Nesse cenário, o Brasil está em um papel de destaque, uma vez que sua matriz energética apresenta uma elevada taxa de modais energéticos de origem

renovável. De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2020), em 2020, 83% da matriz elétrica do país era composta por fontes renováveis, sendo as hidroelétricas responsáveis por 63,8%. Em 2017, o Brasil passou a ocupar o sétimo lugar entre os países com maior geração de energia eólica no mundo. Em 2018, houve um aumento de 3,4% na oferta de energia elétrica proveniente de fontes renováveis e a previsão para 2026 é que a capacidade eólica instalada chegue a 25,8 GW.

Ainda em relação às energias renováveis, o Ministério de Minas e Energia (2020), em seu plano nacional de energia, projetou que até 2050, a geração de energia elétrica pela fonte solar representará entre 4 e 12% da energia total gerada no país. Isso se deve a perspectiva positiva na redução dos custos dos sistemas fotovoltaicos, e de tecnologias que tornam melhor o custo-benefício da geração desse tipo de energia.

Em consonância com a incorporação de fontes renováveis, as bombas de calor, no contexto de refrigeração e aquecimento, com acoplamento de energia solar, para suprir a demanda de energia da bomba de calor e atender a outras demandas de energia, são recursos promissores para a geração distribuída, com muitas vantagens tanto do lado do suprimento (menores impactos ambientais) quanto do lado da demanda (maior eficiência e menos custos para o consumidor) (WANG *et al.*, 2018). Segundo Leonzio (2017), a energia solar possui baixíssimos custos operacionais e ampla disponibilidade, sendo uma tecnologia “verde” para a produção frigorífica, que pode atingir emissões de carbono ainda mais baixas se combinada com bombas de calor. Huang *et al.* (2019) mencionaram que o futuro da produção de calor industrial pode ser de baixo carbono, e Meyers *et al.* (2018) apresentaram uma metodologia para incorporação de energia solar térmica em bombas de calor.

Tradicionalmente, os sistemas energéticos são projetados com base em uma análise de viabilidade termodinâmica. A análise termodinâmica tem por finalidade reconhecer a performance energética do sistema e é normalmente feita levando em consideração a primeira e a segunda leis da termodinâmica, uma vez que as duas se complementam e tornam a análise mais completa, avaliando não só o balanço energético, mas também os locais críticos que podem estar comprometendo a performance do sistema: pontos de maior destruição de exergia.

No contexto de utilização de sistemas energéticos, o processo de secagem está entre os sistemas que apresentam alto consumo de energia. Segundo Kemp (2011), o processo de secagem é responsável por 10% a 20% da energia utilizada no setor industrial de países desenvolvidos, devido ao alto consumo de energia para suprir o calor latente de evaporação para remover a água dos alimentos. No entanto, segundo Amorim (2019), a secagem utilizando bomba de calor apresenta as vantagens de ser mais econômica e não necessitar de mão-de-obra

especializada. Ainda, segundo Fortes *et al.* (2018), a indústria de secagem utiliza uma grande quantidade de energia. Para avaliar a operação dos sistemas de secagem de alimentos, comumente é realizada uma avaliação termodinâmica, com o objetivo de analisar os fluxos de energia e os pontos de possíveis melhorias. Para a avaliação termodinâmica, normalmente é utilizada a aplicação da primeira e segunda leis da termodinâmica em cada componente do sistema.

A secagem de alimentos é fundamental no setor agrícola, podendo ser realizada ao sol ou utilizando sistemas artificiais, como bombas de calor. A secagem de alimentos tem por objetivo reduzir os custos de produção, armazenamento e transporte (AMORIM, 2019). A utilização de sistemas artificiais auxilia na qualidade dos alimentos armazenados para distribuição, e reduz a contaminação microbial (Singh e Pandey, 2011).

Levando em consideração a alta demanda de energia do setor de secagem de alimentos, diversos estudos são conduzidos no sentido de aliar a secagem de alimentos à energia solar. Sundari e Veeramanipriya (2020) desenvolveram um estudo para avaliar a secagem de macaxeira, utilizando uma fonte de energia solar fotovoltaica e térmica. No estudo, os autores afirmam que o reconhecimento dos ganhos ambientais relacionados a energia solar pode contribuir de forma significativa no desenvolvimento sustentável. Araujo *et al.* (2021) e Morais *et al.* (2019) desenvolveram estudos voltados para a construção de um secador solar no semiárido nordestino. Segundo os autores, uma das vantagens do sistema é que a energia solar além de ser abundante e renovável, não polui e não prejudica o ecossistema.

Tendo em vista os fatos supracitados, é perceptível a necessidade da realização de estudos voltados para a avaliação do consumo de energia, bem como a análise da geração de entropia e taxa de destruição de exergia, de sistemas de secagem de alimentos, uma vez que esses estudos podem auxiliar na tomada de decisão com respeito à utilização de melhores alternativas no processo de secagem de alimentos.

1.1 Objetivos

Objetivo geral:

- Desenvolver análise termodinâmica para avaliar a demanda energética, a geração de entropia e as taxas de destruição de exergia, com o uso de uma ferramenta computacional, para sistemas diferentes de secagem de alimentos.

Objetivos específicos:

- Desenvolver uma análise para avaliar a demanda energética, a geração de entropia as taxas de destruição de exergia, com o auxílio do programa computacional Engineering Equation Solver, para um sistema de secagem de alimentos a bomba de calor.
- Desenvolver uma análise para avaliar a demanda energética, a geração de entropia e as taxas de destruição de exergia, com o auxílio do programa computacional Engineering Equation Solver, para um sistema de secagem de alimentos a resistência elétrica, e comparar com a secagem utilizando bomba de calor, e avaliar a o auxílio de energia solar fotovoltaica em cada um dos esquemas de secagem.

1.2 Estrutura da dissertação

No capítulo 1 é apresentada uma introdução geral do tema, os objetivos gerais e específicos, a estrutura da dissertação e a fundamentação teórica necessária para os conteúdos gerais apresentados neste trabalho.

No capítulo 2, é apresentado um referencial teórico referente à secagem de alimentos, às bombas de calor, à análise termodinâmica, e ao programa computacional *Engineering Equation Solver*.

No capítulo 3, os materiais e métodos do trabalho estão descritos. No capítulo 4, são apresentados os resultados do trabalho. No capítulo 5, as conclusões gerais são apresentadas, juntamente com as sugestões para trabalhos futuros. Em seguida, são relacionadas todas as referências citadas ao longo da dissertação.

CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Secagem de alimentos

Segundo Embrapa (2010), a secagem é a operação por meio da qual a água ou qualquer outro líquido é removido de um material. Segundo Aviara *et al* (2014.), a secagem é um processo complexo, que envolve transferência de massa e calor, e resulta na redução de umidade do produto, até um nível seguro para armazenamento.

Segundo Fortes (2017), a secagem pode ser classificada como um processo com elevado consumo de energia, e por esse motivo se faz necessário propor tecnologias sustentáveis. O processo de secagem comumente utilizado é a secagem de alimentos utilizando resistência elétrica (secador de bandejas) para aquecer o ar até a temperatura de secagem desejada, o que requer um alto consumo de energia primária.

Para Andrade (2020), a secagem é um processo que promove a valorização do produto e permite a preservação da produção, por outro lado, requer uma quantidade elevada de energia, e por esse motivo, o processo de secagem é caro para as fazendas de pequeno porte. Ainda segundo Andrade (2020), nesse contexto, os sistemas de bombas de calor são uma alternativa interessante, uma vez que a combinação da passagem do ar pelo evaporador e pelo condensador aumenta a eficiência do processo.

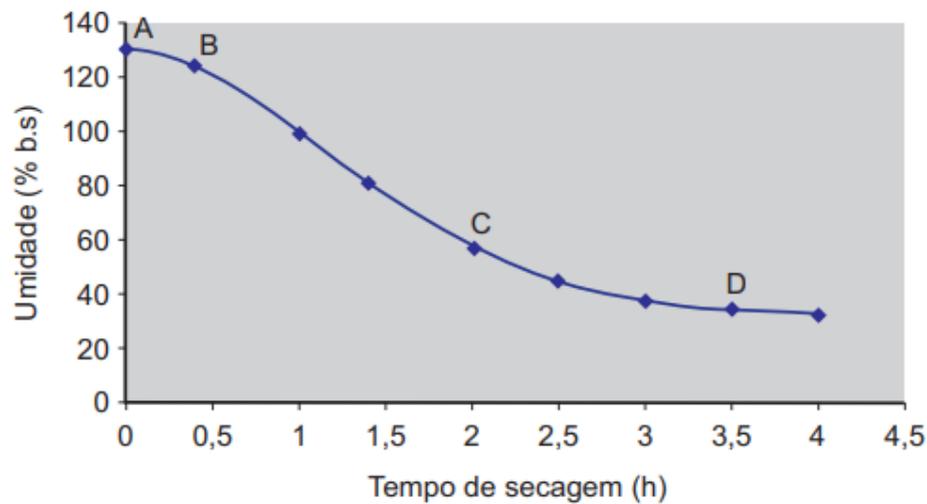
Na equação (2.1), a quantidade de água presente no alimento (em base seca), em porcentagem, é dada, a partir da relação entre a massa de água e a massa de sólido. Esse parâmetro é importante durante o processo de secagem, uma vez que o objetivo é reduzir esse parâmetro até um valor desejável para armazenamento.

$$b. s. = \left(\frac{\text{massa de água}}{\text{massa de sólido}} \right) \quad (2.1)$$

Além da quantidade de água presente no alimento, outros parâmetros também são levados em consideração na secagem de alimentos, entre eles: a atividade de água e a cinética de secagem. A atividade de água é definida como a relação entre a pressão de vapor de água do alimento e a pressão de vapor de água pura à mesma temperatura. Segundo Andrade (2020), esse parâmetro é importante, pois leva em consideração a natureza celular de cada alimento.

A cinética de secagem está relacionada à velocidade de perda de umidade do alimento. Segundo Embrapa (2010), existem quatro pontos de destaque no processo de secagem relacionados a cinética, ilustrados na Figura 2.1.

Figura 2.1. Gráfico ilustrativo da cinética de secagem.



Fonte: EMBRAPA (2010).

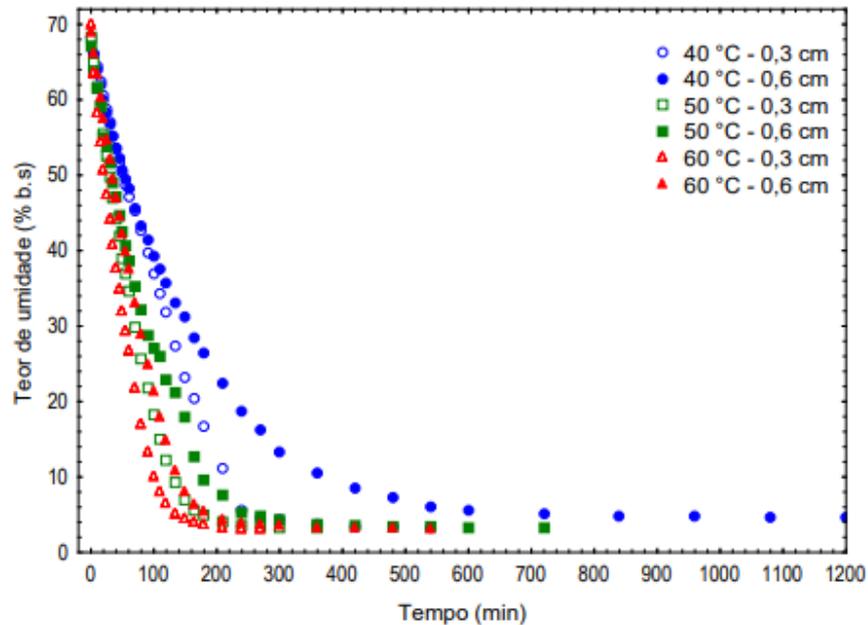
O segmento AB representa a etapa inicial de secagem, no qual a temperatura assume temperatura constante. O segmento BC representa a etapa na qual a secagem ocorre com uma velocidade maior. Nessa etapa, a superfície do alimento está saturada e a resistência para saída da água do alimento pela camada sólida é bem menor. No segmento CD, a quantidade de umidade removida é reduzida, uma vez que a quantidade de água presente no alimento está reduzida. Do ponto D em diante a velocidade de secagem diminui.

A secagem de alimentos é uma atividade que demanda um consumo alto de energia, por esse motivo é um assunto relevante estudado na academia, com o principal objetivo de avaliar a demanda de energia e as possíveis melhorias de eficiência nesses sistemas. Hidalgo (2021), avaliou a secagem de alimentos utilizando um secador solar direto, assistido por módulo solar fotovoltaico. O tipo de secador analisado no estudo é composto por uma placa solar fotovoltaica que auxilia a demanda de energia do sistema. A radiação solar, juntamente com a convecção forçada propicia o processo de secagem. Segundo a autora, apesar de usar uma fonte de energia limpa, renovável e abundante, o sistema demonstrou uma forte dependência das condições meteorológicas e psicrométricas.

Santos *et al.* (2019) avaliou a secagem e as propriedades termodinâmicas da polpa de patáua, utilizando um secador de alimentos a resistência elétrica. No estudo, os autores mostram que o tempo de secagem do alimento está relacionada à temperatura de secagem (quanto maior a temperatura, menor o tempo de secagem) e com a espessura da camada (quanto mais fino a espessura da camada, menor o tempo de secagem).

A Figura 2.2 mostra que, quanto maior a temperatura de secagem, mais rápido ocorre o processo de secagem, mesmo que seja mantida a espessura do alimento. Por esse motivo, é importante que a análise termodinâmica dos sistemas de secagem leve em consideração diferentes temperaturas de secagem, bem como diferentes condições psicrométricas.

Figura 2.2. Gráfico ilustrativo da cinética de secagem.



Fonte: Santos *et al.* (2019).

Comumente, a secagem de alimentos é feita utilizando secadoras de alimentos que utilizam resistência elétrica para controlar a temperatura do ar, através de um termostato. Nesse tipo de secadora, a fonte de energia utilizada para aquecer o ar que entra em contato com o alimento é proveniente da secadora elétrica. Nas secadoras a bomba de calor, ocorre duas trocas de calor entre o ar e o sistema, antes de entrar em contato com o alimento, primeiro no evaporador e depois no condensador (ANDRADE, 2020).

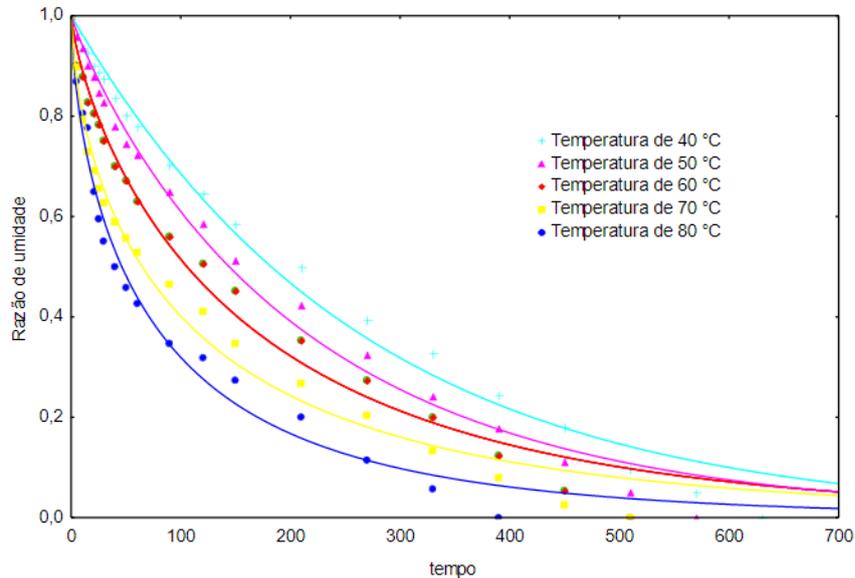
Almeida *et al.* (2019) desenvolveram uma análise termodinâmica da secagem de feijão azuki, variando a temperatura de secagem de 40 a 80 °C. Os autores utilizaram a equação de Page, equação (2.2), para descrever o processo de secagem.

$$RX = \exp(-kt^n) \quad (2.2)$$

Na equação (2.2), RX representa a razão de umidade, k representa a constante de secagem, t representa o tempo de secagem e n é um parâmetro do modelo (ALMEIDA *et al.*,

2019). Na Figura 2.3, está ilustrada a velocidade de secagem do alimento em relação à temperatura de secagem, em acordo com o trabalho de Santos *et al.* (2019).

Figura 2.3. Gráfico ilustrativo da cinética de secagem.



Fonte: Santos *et al.* (2019).

Como pode ser visto na Figura 2.3, a temperatura de secagem influencia no processo de secagem dos alimentos. Além disso, a temperatura de secagem tem relação com a energia demandada pelos sistemas. Pode-se perceber a necessidade de avaliar diferentes sistemas e cenários (temperaturas diferentes) de secagem, do ponto de vista termodinâmico, quando avaliados sistemas de secagem de alimentos.

Diversos estudos focam também na utilização de secadores de alimentos que são auxiliados por energia solar fotovoltaica. A busca por fontes alternativas de energia, associada aos benefícios da energia solar, entre eles, o fato de ser uma energia limpa e renovável, aumenta o interesse desse tipo de fonte de energia no processo de secagem. Santa (2022) desenvolveu um sistema de secagem com auxílio de energia solar. No trabalho, o autor afirma que o aproveitamento da energia solar é uma das alternativas mais promissoras para se enfrentar os desafios da demanda de energia. Além disso, as secadoras que utilizam a irradiação solar têm ganhado cada vez mais importância, uma vez que são uma alternativa para produtores que não têm acesso a energia elétrica. Esse fato indica a necessidade de uma análise termodinâmica que compare diferentes tipos de secadoras de alimentos, bem como a viabilidade da utilização de auxílio de energia solar fotovoltaica.

2.2 Bombas de calor

A primeira proposta para incorporação de painel térmico fotovoltaico em um esquema de bomba de calor foi feita por Ito *et al.* (1997), cujo resultado não foi economicamente viável e de complicada manutenção. Porém, ao longo dos anos houve avanços na melhoria da eficiência de células fotovoltaicas, com consequente redução de preço. Lazzarin (2020) menciona que as bombas de calor de configuração *dual-source* vão se tornar cada vez mais disseminadas.

As bombas de calor podem ser utilizadas para diversas finalidades, tais como: atender as demandas de calor e frio de ambientes residenciais, aquecimento de água utilizada nas residências, atender as demandas de calor e frio em processos industriais, secagem de alimentos, dessalinização (MOHANDRAJ *et al.*, 2018). Segundo Jordan (2019), as bombas de calor foram incluídas em diversos estudos de sistemas híbridos, como os estudos de: Li *et al.* (2013), Tagliaco *et al.* (2012), Kim *et al.* (2013) e Zhao *et al.* (2014). Jordan (2019) afirma, também, que as bombas de calor são mais eficientes quando comparadas com outras formas fontes de calor, como combustão e eletricidade; e que, embora as bombas de calor não sejam uma tecnologia recente, o conceito ainda não foi difundido em algumas partes do mundo. As pesquisas voltadas para esses sistemas mostram-se promissoras do ponto de vista ambiental. Larke *et al.* (2018) estudou a utilização de uma bomba de calor com energia solar para o caso de aquecimento de piscinas no sul do Brasil, e verificou que as principais aplicações para esse tipo de sistema energético no Brasil são o aquecimento de ambientes (conforto térmico) e produção de água quente.

Como mencionado anteriormente, a utilização conjunta de bombas de calor e fontes de energia renováveis é benéfica tanto do ponto de vista energético quanto do ponto de vista ambiental. A fonte de energia comumente utilizada nesses sistemas acoplados é a energia solar, que pode ser associada à energia elétrica da rede. O aproveitamento da energia proveniente do sol pode se dar de duas maneiras nesses sistemas: energia solar térmica e energia solar fotovoltaica; e, em alguns sistemas de bombas de calor, podem ser utilizadas as duas formas de aproveitamento simultaneamente. Na energia solar térmica, a energia proveniente do sol aquece diretamente o fluido que passa através da bomba de calor. Já na energia solar fotovoltaica, a energia advinda do sol é transformada em energia elétrica pelo efeito da radiação solar nos semicondutores (GRILO *et al.*, 2018), e uma parte da energia elétrica pode ser utilizada para o funcionamento da bomba de calor. Grilo *et al.* (2018) afirmam que o uso de energia renovável é recomendado para mitigar as emissões de gases relacionados ao

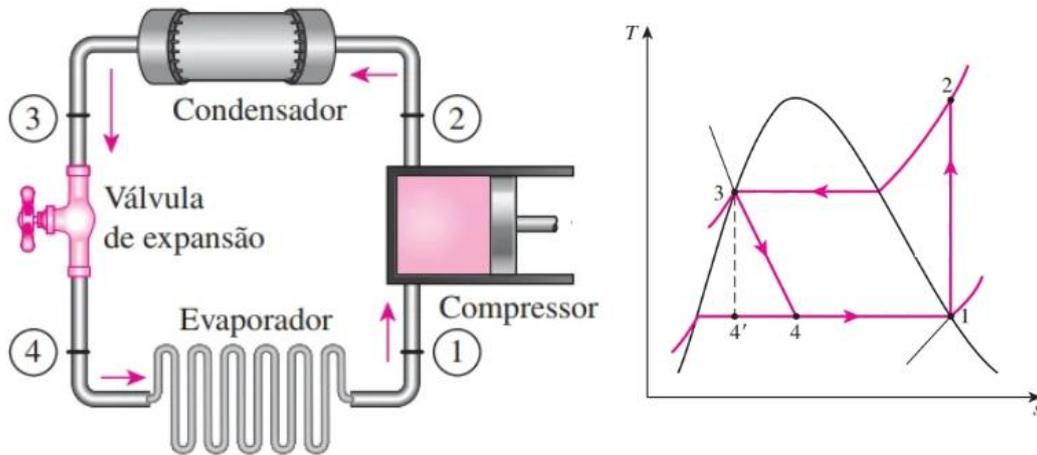
aquecimento global, e mostram que no Brasil, o uso de energia solar representava 1,4% da energia gerada no país no ano de 2018, um crescimento de 97% em relação ao ano anterior.

A utilização de energia solar tem se mostrado uma tendência tanto no Brasil, como no mundo. O Ministério de Minas e Energia e Empresa de Pesquisa Energética (2020), em seu plano decenal de expansão de energia, projeta que até 2029, a geração de energia elétrica pela fonte solar representará 8% da energia gerada no país. Isso se deve à perspectiva positiva na redução dos custos dos sistemas fotovoltaicos e da redução dos impactos ambientais quando utilizado essa fonte de energia.

Com o aumento da demanda de energia solar, os sistemas acoplados de energia solar fotovoltaica e bombas de calor se tornam ainda mais promissores. Segundo Wang *et al.* (2019), esses sistemas possuem diversas vantagens, tais como: baixo consumo de energia elétrica, estabilidade no desempenho relativamente alta, grande potencial de economia de energia, benefícios sociais expressivos, e características ambientais satisfatórias no que diz respeito aos impactos ambientais. Ainda segundo Wang *et al.* (2019), esses sistemas têm o potencial de reduzir as limitações dos sistemas isolados e fornecer soluções para a redução do consumo de energia em edifícios.

Ribeiro (2021) explica que a bomba de calor é um sistema que utiliza o ciclo frigorífico por compressão-expansão, para que o calor de uma fonte fria seja transportado para uma fonte quente. Essa transferência requer uma entrada, do ponto de vista termodinâmico, na forma de calor ou trabalho (HEROLD; RAERMACHER; KLEIN; 1996). Um parâmetro importante, utilizado para avaliar as bombas de calor é o coeficiente de performance (COP, sigla em inglês). Na Figura 2.4, está ilustrado o funcionamento de um ciclo de refrigeração, com o respectivo gráfico temperatura-entropia. O coeficiente de performance da bomba de calor é calculado de forma análoga ao cálculo utilizado para o ciclo de Carnot, levando em consideração o calor útil.

Figura 2.4. Esquema termodinâmico do funcionamento de ciclo de refrigeração por compressão de vapor.



Fonte: Moran e Shapiro (2013).

Na Figura 2.4, estão ilustrados os principais componentes de uma bomba de calor: o compressor, o condensador, o evaporador e a válvula de expansão. O evaporador e o condensador são os componentes responsáveis pelas trocas de calor que ocorrem na bomba de calor. No evaporador, ocorre um processo de refrigeração com desumidificação do ar, e no condensador ocorre um processo de aquecimento do ar. A característica das bombas de calor de retirar umidade do ar é útil nos processos de secagem de alimentos, pois pode reduzir a quantidade de energia primária necessária para secar os alimentos. O compressor e a válvula de expansão são responsáveis pelo aumento e pela redução da pressão do fluido refrigerante, respectivamente. O funcionamento dos quatro componentes em série descreve um ciclo termodinâmico.

Chua *et al.* (2010) afirmam que, apesar da tecnologia das bombas de calor ter avançado nas últimas décadas, esses sistemas ainda não são tão empregados quanto deviam. Um dos fatores que dificultam a disseminação das bombas de calor é o investimento inicial elevado. Chua *et al.* (2010) argumentam ainda que, uma abordagem para aprimorar a eficiência de operações industriais é a recuperação de todos os pontos de desperdício de calor. Nesse sentido, as bombas de calor são uma alternativa, uma vez que esses sistemas aproveitam calor que seria rejeitado para o ambiente, transformando em calor útil.

Uma característica importante das bombas de calor, que as tornam atrativas é a redução na demanda de energia primária, quando comparado com sistemas a resistência elétrica, por exemplo. Kalogirou (2004) afirma que o COP das bombas de calor é elevado o suficiente para

gerar uma grande quantidade de energia na forma de calor, a partir de uma quantidade reduzida de energia primária suprida para o compressor.

Devido à busca por alternativas energéticas que sejam mais eficientes e renováveis, diversos estudos têm sido desenvolvidos no sentido de avaliar também sistemas acoplados de bombas de calor e energia solar. James *et al.* (2020) desenvolveram um estudo para analisar a utilização de bombas de calor acopladas a painéis solares fotovoltaicos. No estudo, os autores avaliaram a utilização conjunta da energia fotovoltaica e do calor gerado pelos painéis fotovoltaicos, que é uma das possíveis montagens desses sistemas. Os estudos mostraram que esses sistemas são próprios para secagem e para aquecimento de água e ambientes.

Aste *et al.* (2020) desenvolveram um estudo para avaliar sistemas de bombas de calor com auxílio de energia solar fotovoltaica. No estudo, os autores afirmam que a utilização do sistema, em conjunto com outras fontes de energias renováveis, torna possível a redução da dependência de sistemas de bombas de calor em relação a energia da rede. Além disso, existe a possibilidade de armazenar o excesso de energia gerado pelos sistemas. Essa possibilidade é importante no setor de secagem de alimentos, uma vez que produtores de pequeno porte, em regiões remotas, encontram dificuldades relacionadas a secagem de alimentos por problemas com energia da rede.

2.2.1 Novos fluidos refrigerantes

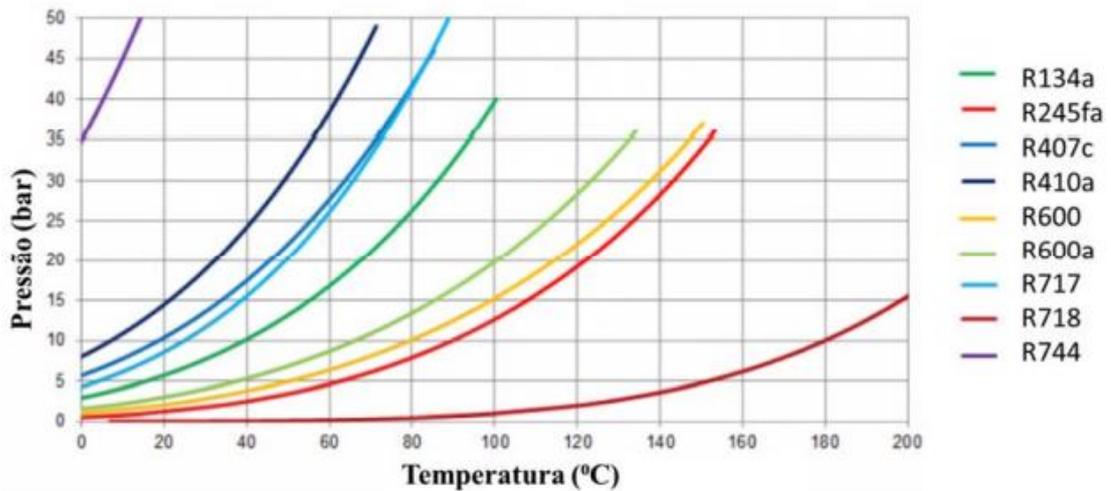
As aplicações de bombas de calor, refrigeração e aquecimento representam um dos setores que representam maior uso de energia elétrica na atualidade. Além disso, esse setor corresponde por uma parcela significativa de substâncias que corroboram com a depleção da camada de ozônio. O setor de refrigeração e aquecimento responde por aproximadamente 17% da energia utilizada a nível mundial (Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee, 2018).

Alguns dos refrigerantes sintéticos hidrofluorcarbonetos e clorofluorcarbonetos, que contribuem com a depleção da camada de ozônio têm sido descontinuados. Para minimizar o uso de refrigerantes nocivos ao meio ambiente, existem refrigerantes de baixo impacto, porém, ainda de uso reduzido (RIBEIRO, 2021). Dentre os refrigerantes de baixo impacto, encontra-se o R717 (amoniaco) que possui baixo impacto ambiental e elevada eficiência energética. Em contrapartida, refrigerantes como R134a que já foi amplamente utilizado, mas vem sendo substituído.

A Figura 2.5 mostra uma comparação entre alguns fluidos refrigerantes, em relação a temperatura e pressão de condensação. Pode-se perceber que para uma mesma pressão de condensação, o refrigerante R134a apresenta uma temperatura maior de condensação, quando

comparado com o refrigerante R717. Na Figura 2.5, percebe-se que, quanto menor a temperatura de condensação do fluido refrigerante, maior a eficiência. Esses dados indicam que, além de causar menos danos ao meio ambiente, o R717 apresenta uma maior eficiência, quando comparado com o R134a.

Figura 2.5. Comparação da temperatura de condensação entre diferentes fluidos refrigerantes.



Fonte: Ribeiro (2021).

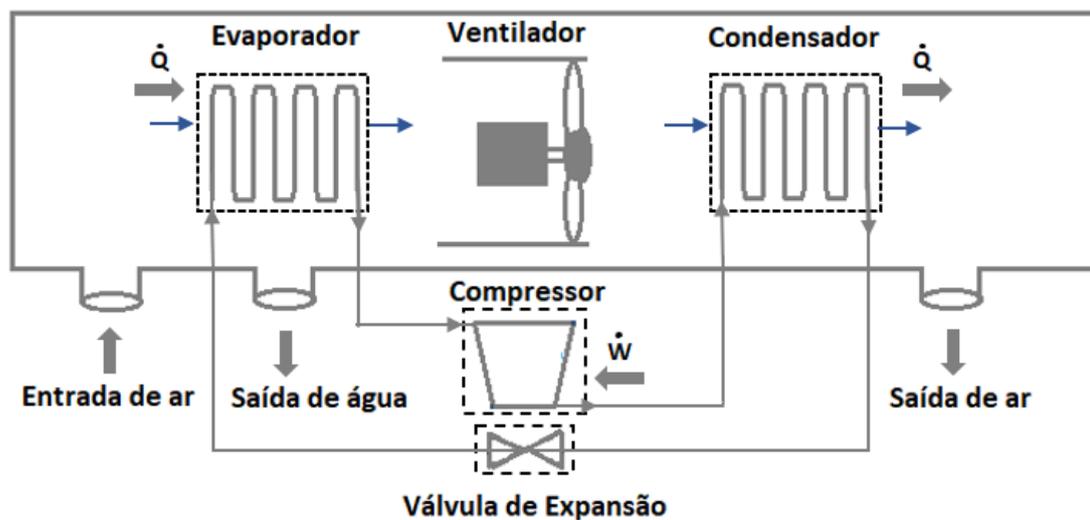
2.3 Análise termodinâmica

A análise termodinâmica aplicada às bombas de calor está relacionada principalmente a análise do aproveitamento do calor trocado entre o fluido refrigerante e o ar que passa pelo sistema, e os locais críticos de perda de eficiência durante o processo. Essa análise pode ser feita aplicando a 1ª e a 2ª leis da termodinâmica, para avaliar as transformações de energia e as gerações de entropia, que estão diretamente relacionadas à redução da eficiência da bomba de calor. Diversos estudos podem ser citados, com a aplicação da avaliação termodinâmica em sistemas de secagem, como os estudos desenvolvidos por Maia (2014), Leite (2015), Fortes (2017), e Grilo (2017), que utilizaram a bomba de calor disponível no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal da Paraíba, para estudar diferentes cenários de secagem de alimentos.

Para avaliar as transformações energéticas que ocorrem no sistema, é importante analisar cada componente separadamente, como ilustrado na Figura 2.6, e realizar uma análise

do sistema como um todo. Na Figura 2.6, está representado um sistema típico de bomba de calor, no qual o ar passa pelo evaporador e pelo condensador, o que torna possível um controle da umidade e da temperatura do ar durante a secagem.

Figura 2.6. Esquema termodinâmico de uma bomba de calor para secagem de alimentos.



Fonte: Autor.

As equações (2.3) e (2.4) estão relacionadas ao princípio de conservação da massa e à primeira lei da termodinâmica. A avaliação das trocas de calor que ocorrem entre o fluido e o ar podem ser feitas a partir da aplicação em cada volume de controle descrito na Figura 2.6.

$$\frac{d}{dt} \int_{VC} \rho dV = \sum_{Entrada} \dot{m} - \sum_{Saída} \dot{m} \quad (2.3)$$

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_{Entrada} \dot{m}h^T - \sum_{Saída} \dot{m}h^T \quad (2.4)$$

Na equação (2.3), o termo $\frac{d}{dt} \int_{VC} \rho dV$ representa a variação de massa no volume de controle, o termo $\sum_{Entrada} \dot{m}$ representa a entrada e o termo $\sum_{Saída} \dot{m}$, a saída de massa do volume de controle. Na equação (2.4), o termo $\frac{dE}{dt}$ representa a variação de energia do volume de controle em relação ao tempo, o termo \dot{Q} representa a potência calorífica recebida (ou rejeitada), o termo \dot{W} representa a potência em forma de trabalho recebida (ou rejeitada), o

termo $\sum_{\text{Entrada}} \dot{m}h^T$ representa a entrada de massa e entalpia e o termo $\sum_{\text{Saída}} \dot{m}h^T$ representa a saída de massa e entalpia do volume de controle, respectivamente.

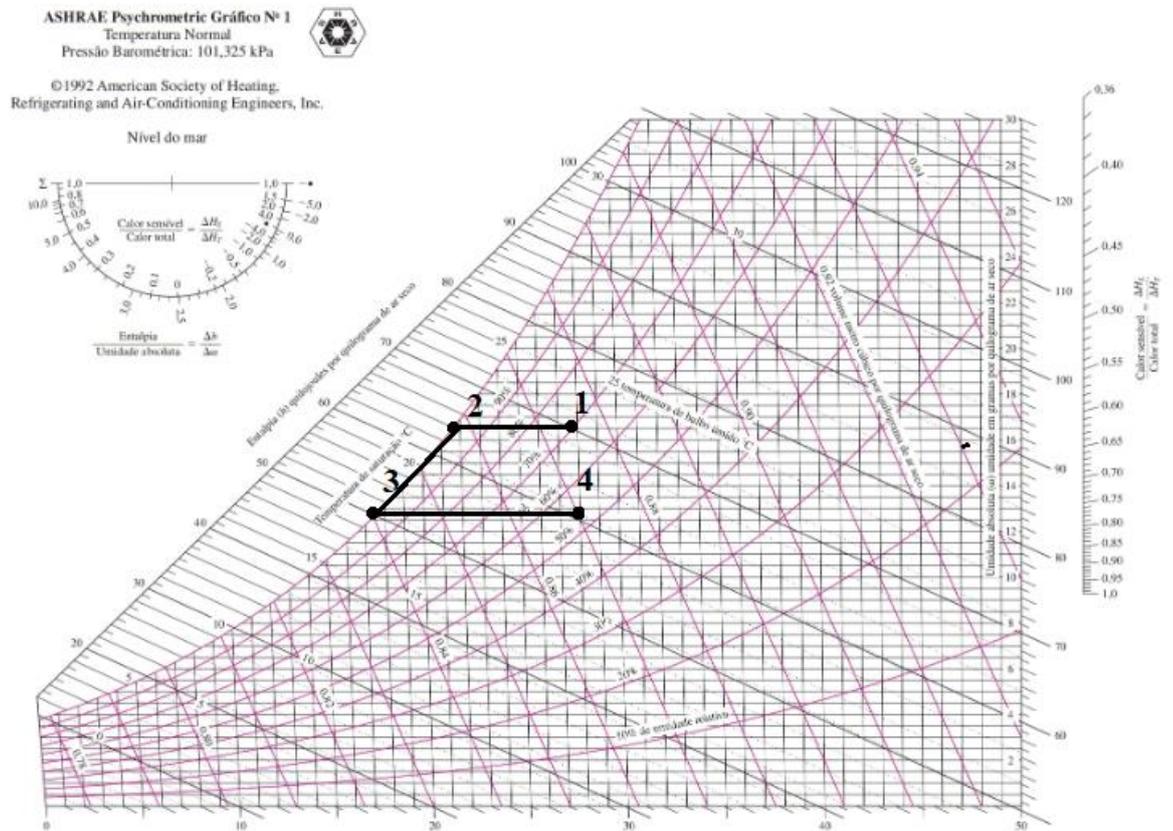
Durante o funcionamento da bomba de calor, o ar que entra em contato com o fluido refrigerante passa por diferentes estados. No evaporador, o ar perde calor e ocorre uma redução da temperatura. Durante esse processo, ocorre uma desumidificação do ar. As equações (2.5) e (2.6) representam a umidade relativa (Φ) e a umidade específica do ar (ω).

$$\Phi = \left(\frac{m_v}{m_g}\right) \quad (2.5)$$

$$\omega = \left(\frac{m_{va}}{m_a}\right) \quad (2.6)$$

Na equação (2.5), m_v representa a umidade do ar e m_g representa a umidade máxima que o ar pode conter em uma determinada temperatura. Na equação (2.6), m_{va} representa a massa de vapor da água e m_a representa a massa de ar seco. Durante o processo de refrigeração, no evaporador, o ar baixa a temperatura até que atinge o ponto de orvalho, no qual o ar está saturado, e sua umidade relativa é 100 %. Depois desse ponto, a refrigeração do ar acarreta uma condensação de parte da umidade presente no ar. Este processo está ilustrado na Figura 2.7, utilizando carta psicrométrica para descrever os estados do ar durante o processo.

Figura 2.7. Esquema termodinâmico de uma bomba de calor.



No ponto 1, o ar está a uma umidade relativa e temperatura específicas. Ao entrar em contato com o evaporador, o ar passa por um processo do ponto 1 para o ponto 2, até atingir o ponto de orvalho. Nesse ponto, o ar está saturado. Do ponto 2 para o ponto 3, o ar perde umidade ao passo que a temperatura continua reduzindo, devido a troca de calor com o evaporador, uma vez que a quantidade máxima de umidade presente no ar está diretamente relacionada à temperatura.

No condensador, o ar passa por um processo de aquecimento simples, no qual a temperatura é elevada, mas a umidade absoluta permanece constante. Esse processo está representado na Figura 2.7, pelos pontos 3 e 4.

A segunda parte da análise termodinâmica aplicada às bombas de calor envolve a aplicação da 2ª lei da termodinâmica e o conceito de entropia. A desigualdade de Clausius, representada na equação (2.7), pode ser utilizada para ilustrar os limites de eficiência dos ciclos termodinâmicos e avaliar a eficiência desses.

$$\oint \left(\frac{dQ}{T} \right) \leq dS \quad (2.7)$$

Na equação (2.7), dQ representa a troca de calor, T representa a temperatura média do processo. A equação de Clausius permite estabelecer que para um processo irreversível percorrendo um ciclo termodinâmico, a desigualdade de Clausius é sempre menor que 0.

A equação (2.8) introduz o conceito de entropia gerada e está diretamente relacionada aos processos reais, que apresentam irreversibilidades. A avaliação de geração de entropia é importante no estudo de sistemas energéticos, uma vez que dá uma indicação da possibilidade de melhorias nas perdas energéticas do sistema.

$$\frac{dS}{dt} = \sum_{\text{Entrada}} \dot{m}s - \sum_{\text{Saída}} \dot{m}s + \int \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{ger}. \quad (2.8)$$

Na equação (2.8), \dot{S}_{ger} representa o termo de geração de entropia. As equações (2.8) ilustra o balanço de entropia para um volume de controle, no qual o termo \dot{S}_{ger} é sempre maior que 0.

Além dos valores apresentados, a exergia e a destruição dessa são um importante parâmetro, ilustrado na equação (2.9).

$$\dot{E}_{des.} = T_0 \cdot \dot{S}_{ger}. \quad (2.9)$$

A exergia está relacionada ao potencial máximo de um sistema de produzir trabalho até que entre em equilíbrio com o meio ambiente. Por isso, a partir dela, pode-se avaliar quanto do potencial está sendo destruído e comparar com diferentes cenários para encontrar o cenário com menor destruição de exergia.

CAPÍTULO 3 – MATERIAL E MÉTODOS

Os materiais e métodos do trabalho foram estruturados da seguinte forma: as seções 3.1 e 3.2 reúnem a metodologia de acordo com os objetivos específicos do trabalho, respectivamente, a análise termodinâmica de um sistema de secagem de alimentos a bomba de calor e a análise termodinâmica de um sistema de secagem de alimentos a resistência elétrica, e avaliação do auxílio de energia solar fotovoltaica. Além disso, é abordado o programa computacional utilizado para auxiliar nas avaliações termodinâmicas, o *Engineering Equation Solver* (EES).

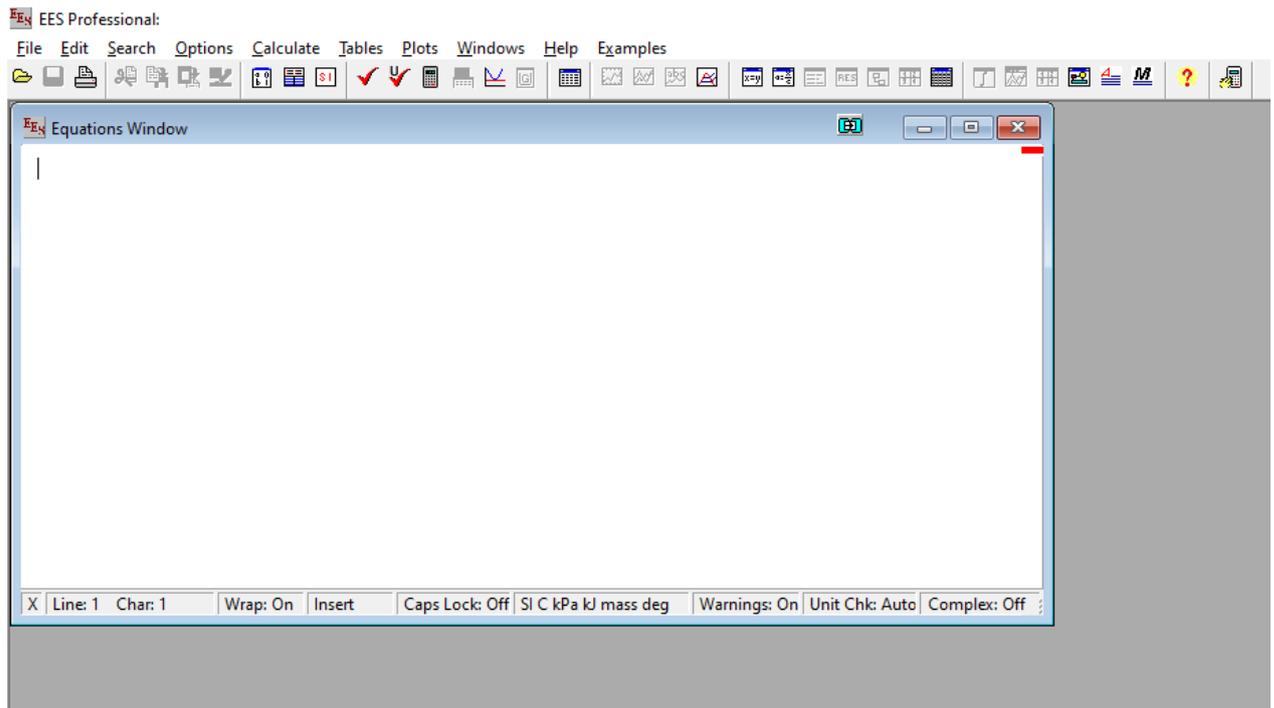
3.1 Secadora a bomba de calor

Para realizar a avaliação termodinâmica da secadora de alimentos a bomba de calor, foi desenvolvido um código no programa computacional *Engineering Equation Solver* (EES, 2022).

O programa computacional *Engineering Equation Solver* (EES) é uma ferramenta que auxilia no desenvolvimento de análises numéricas e pode, por exemplo, auxiliar o desenvolvimento de análises termodinâmicas, uma vez que possui tabelas termodinâmicas disponíveis para cálculos de propriedades termodinâmicas (EES, 2022).

A Figura 3.1 ilustra a interface do programa, com as funcionalidades disponíveis.

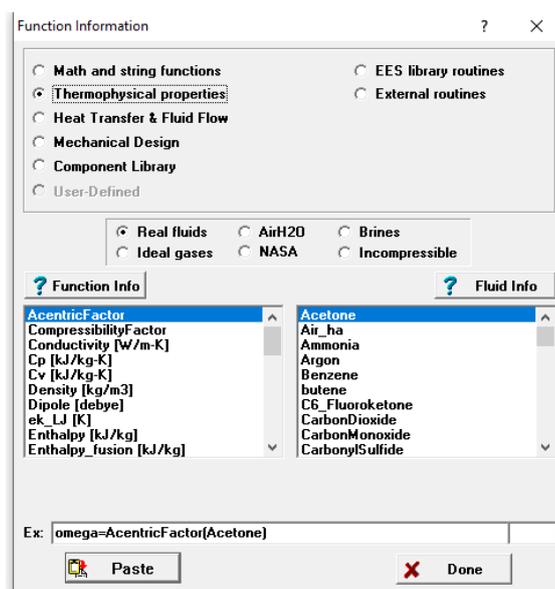
Figura 3.1 Interface do programa EES.



Fonte: Autor.

Na Figura 3.1, o espaço demarcado pelo retângulo é reservado para a inserção das equações a serem resolvidas pelo programa. No caso de avaliações termodinâmicas, além das equações termodinâmicas, podem ser definidas propriedades a partir do uso de tabelas do programa, como pode ser visto na Figura 3.2.

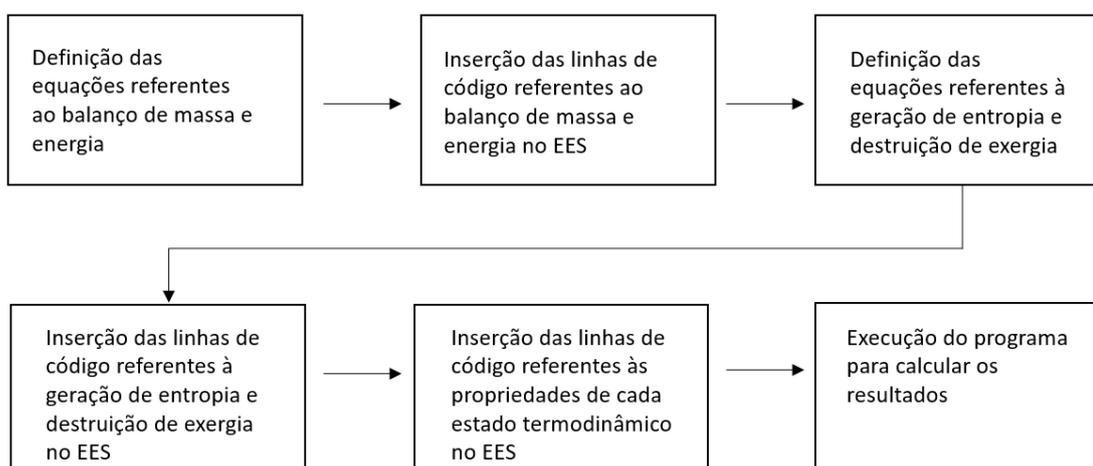
Figura 3.2. Tabela de opções de funções do EES.



Fonte: Autor.

A construção dos códigos computacionais referentes às análises termodinâmicas seguiu os passos descritos no diagrama de blocos da Figura 3.3. O primeiro passo consistiu em definir quais equações seriam utilizadas ao se tratar do balanço de massa e energia, em seguida, foram inseridas as equações codificadas do balanço de massa e energia. Na terceira etapa, foram definidas as equações da geração de entropia e das taxas de destruição de exergia, posteriormente foram codificadas e inseridas no programa. Na penúltima etapa foram inseridas as codificações das propriedades dos estados termodinâmicos utilizados nas análises e por fim, o programa foi executado para obter os resultados.

Figura 3.3. Diagrama de blocos do modelo computacional.



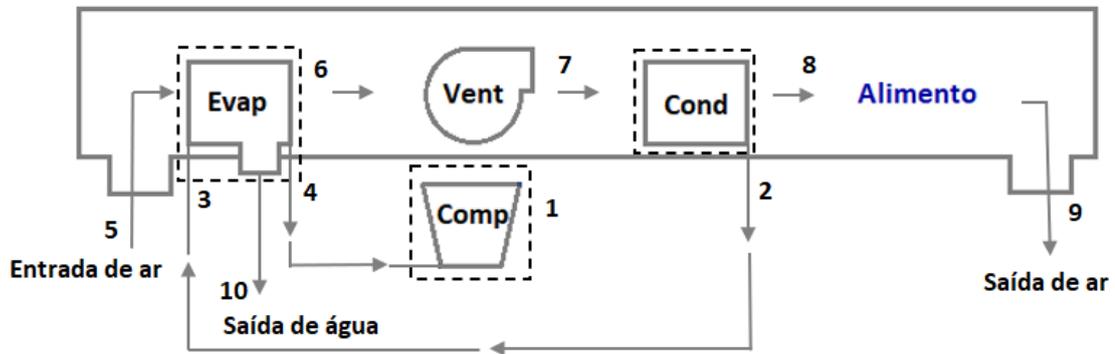
Fonte: Autor.

O código contém o modelo termodinâmico de uma bomba de calor, no qual foram usados dados de entrada de diferentes estudos: Fortes (2017) (bomba de calor para aquecimento e desumidificação de ar, em João Pessoa), Andrade (2020) (bomba de calor para secagem de cogumelos em bomba de calor), Aviara *et al.* (2014) (que avalia a secagem de macaxeira), e Singh e Pandey (2011) (que avalia a secagem de batata-doce).

A bomba de calor proposta neste estudo é composta por um evaporador, um compressor, um condensador e um ventilador. O compressor escolhido foi o modelo NEK6214Z, da EMBRACO (EMBRACO, 2022), que pode receber a alta pressão na linha de retorno, tornando desnecessário o uso de válvula de expansão no sistema. O tubo capilar do

sistema é suficiente para a redução da pressão na bomba de calor. A Figura 3.4 ilustra o esquema termodinâmico do objeto de estudo.

Figura 3.4. Esquema termodinâmico da secadora a bomba de calor.



Fonte: Autor.

No esquema da bomba de calor, é possível visualizar os volumes de controle referente ao ciclo do refrigerante, sendo composto pelo compressor, evaporador e compressor, pontos 1, 2, 3, 4. Em relação aos volumes de controle referentes ao fluxo da massa de ar, estão representados pelos pontos 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11. A massa de ar é admitida a partir da entrada de ar, no estado 9, passa pelo evaporador, com estado inicial no ponto 5, e chega ao estado 6. Depois o refrigerante passa pelo condensador, até o estado 8 e entra em contato com o alimento, onde ocorre o processo de secagem. A massa de ar sai do sistema no ponto 11, e a água produzida, proveniente do processo de secagem, no ponto 10. Do ponto 5 para o ponto 6, ocorre uma troca de calor entre o ar e o evaporador, o que reduz a temperatura e a umidade do ar. Posteriormente, o ar passa pelo condensador, onde recebe calor e ocorre um aumento da temperatura do ar.

3.1.1 Análise Termodinâmica

As análises energéticas dos objetos de estudo foram feitas aplicando volumes de controles nos componentes de cada sistema, e aplicando a primeira lei da termodinâmica, como o auxílio do programa computacional descrito na seção 3.1. Dessa forma, foram utilizadas a equação de conservação da massa e a equação da primeira lei da termodinâmica, ilustradas nas equações (2.3), referente a conservação da massa, e (2.4), referente a primeira lei da termodinâmica.

A análise energética foi desenvolvida considerando-se volumes de controle em cada componente da bomba de calor.

As seguintes considerações foram empregadas neste estudo:

- Regime permanente;
- Não foram consideradas variações de energia cinética e potencial;
- Compressor adiabático;
- Todo o calor rejeitado pelo refrigerante no condensador é absorvido pelo ar.

A Tabela 3.1 ilustra os dados de entrada utilizados no trabalho. Os valores iniciais definidos foram: a pressão e a temperatura de funcionamento do compressor escolhido (os dados foram retirados do catálogo da Embraco, do modelo NEK6214Z); a temperatura de entrada e saída do ar; as pressões e a umidade relativa do ar na entrada e na saída. Os valores dos estados do ar na entrada e na saída foram retirados de trabalhos relacionados, indicados na Tabela. Na secagem de macaxeira e batata doce, os autores utilizaram uma secadora a resistência elétrica, por esse motivo a umidade relativa na saída foi definida considerando um processo de secagem no qual a umidade relativa do ar alcança um valor próximo de 0 (0,05).

Os dados de entrada referentes ao ciclo do refrigerante foram: a temperatura de entrada de entrada e saída do compressor, 7,2 e 54,4 °C, respectivamente, e a pressão de entrada e saída do compressor, 377,5 e 1741 kPa, respectivamente.

Tabela 3.1. Dados de entrada para o Ar.

Ar	Fortes (2020)	Cogumelos	Macaxeira	Batata-doce
Te_ar [°C]	30	30	30	30
Tes_ar [°C]	45	80	45 – 60	50 – 90
Ur_ar [%]	74	100	55	50
Urs_ar [%]	24	0	n/a	n/a
ṁ_ar [kg/s]	0,0627	0,7216	0,3035	n/a

Fonte: Autor.

Os dados de entrada para secagem de cogumelos foram retirados do trabalho de Andrade (2020), os dados para secagem de macaxeira foram retirados do trabalho de Aviara *et al.*

(2014), e os dados para secagem de batata-doce foram retirados do trabalho de Singh e Pandey (2011).

Aplicando as equações referentes à primeira e segunda leis da termodinâmica, nos volumes de controle, utilizando os dados de entrada da Tabela 3.1, foi possível verificar o código desenvolvido.

O caudal mássico necessário para que a troca de calor requerida pelo processo de secagem em cada cenário seja alcançada, foi calculado utilizando os parâmetros de cada trabalho analisado. O caudal mássico varia de acordo com a temperatura de entrada e saída do alimento, a umidade relativa na entrada e saída de ar e o fluxo mássico do ar na secadora.

3.1.1.1 Análise energética

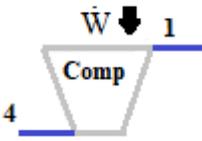
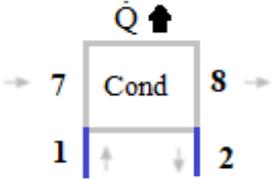
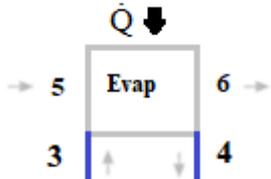
Aplicando um balanço de massa e energia para os volumes de controle, tem-se:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_{Ref}. \quad (3.1)$$

Na equação (3.1), \dot{m}_1 representa o fluxo de massa entrando no compressor, \dot{m}_2 representa o fluxo de massa saindo do condensador, \dot{m}_3 representa o fluxo de massa entrando no evaporador, \dot{m}_4 representa o fluxo de massa saindo do evaporador e \dot{m}_{Ref} representa o fluxo de massa do refrigerante. O refrigerante utilizado, determinado por Andrade (2020), foi o R134a.

Na Tabela 3.2, estão as equações para o balanço de energia em cada componente da bomba de calor.

Tabela 3.2. Equações para o balanço de massa e energia de cada componente da bomba de calor.

Componente	Balanço de massa e energia
<p>Compressor</p> 	$\dot{Q}_{41} = \dot{W}_{41} + \dot{m}_{Ref}(h_1 - h_4) \quad (3.2)$
<p>Condensador</p> 	$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_{Ref}(h_2 - h_1) \quad (3.3)$ $\dot{Q}_{78} = \dot{m}_{ar}(h_8 - h_7) \quad (3.4)$
<p>Evaporador</p> 	$\dot{Q}_{34} = \dot{m}_{Ref}(h_4 - h_3) \quad (3.5)$ $\dot{m}_{ar4} = \dot{m}_{ar5} = \dot{m}_{ar6} = \dot{m}_{ar7} = \dot{m}_{ar} \quad (3.6)$ $\dot{Q}_{56} = \dot{m}_{ar}(h_6 - h_5) \quad (3.7)$ $\dot{Q}_{56} = \dot{m}_{ar}(h_6 - h_5) + \dot{m}_{ág}h_{10} \quad (3.8)$ $\dot{m}_{ág} = \dot{m}_{ar}(\omega_5 - \omega_6) \quad (3.9)$

Fonte: Autor.

Na equação (3.2), \dot{Q} representa o calor rejeitado pelo compressor, \dot{W} é o trabalho do compressor e h é a entalpia em determinado estado. Como o compressor foi considerado adiabático, \dot{Q}_{41} é igual a 0.

Nas equações (3.3) e (3.4), \dot{Q}_{12} , representa o calor rejeitado pelo condensador, h representa a entalpia nos estados 1 e 2, 7 e 8, e \dot{m}_{ar} representa a massa de ar passando pelo condensador.

Na equação (3.5), \dot{Q}_{34} representa o calor trocado no evaporador, referente ao ciclo do refrigerante, \dot{m}_{Ref} representa a massa de refrigerante passando pelo evaporador, e h representa as respectivas entalpias. Na equação (3.7), \dot{Q} representa a troca de calor no evaporador, referente ao ciclo do ar e \dot{m}_{ar} representa a massa de ar passando pelo evaporador.

Na equação (3.8), h_6 e h_5 são as entalpias do ar nos estados 6 e 5. Na equação (3.9) $\dot{m}_{ág}$ representa o fluxo mássico de água condensada no evaporador e ω representa as respectivas umidades específicas do ar.

O coeficiente de performance da bomba de calor é calculado a partir da equação (3.10)

$$COP = \dot{Q}_{12} / (\dot{W}_{Comp}) \quad (3.10)$$

3.1.1.2 Análise de geração de entropia e taxas destruição de exergia

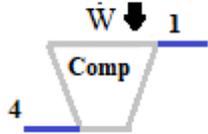
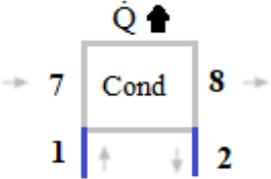
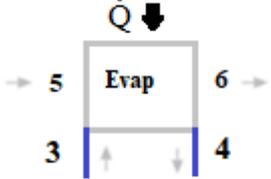
Para realizar a análise de geração de entropia e destruição de exergia, serão aplicadas as equações (3.13) e (3.14) nos volumes de controles dos objetos de estudo propostos.

$$\frac{dS}{dt} = \sum_{Entrada} \dot{m}s - \sum_{Saída} \dot{m}s + \int \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{ger}. \quad (3.11)$$

$$\dot{E}_{des.} = T_0 \cdot \dot{S}_{ger}. \quad (3.12)$$

Na equação (3.12), $\dot{E}_{des.}$ Representa a taxa de destruição de exergia, T_0 representa a temperatura e $\dot{S}_{ger.}$ representa a taxa de geração de entropia. Na equação (3.11) está representado o balanço de entropia. As equações (3.13) – (3.28), na Tabela 3.3, mostram a geração de entropia para cada componente da bomba de calor.

Tabela 3.3. Equações para a análise de geração de entropia e taxas de destruição de exergia da bomba de calor.

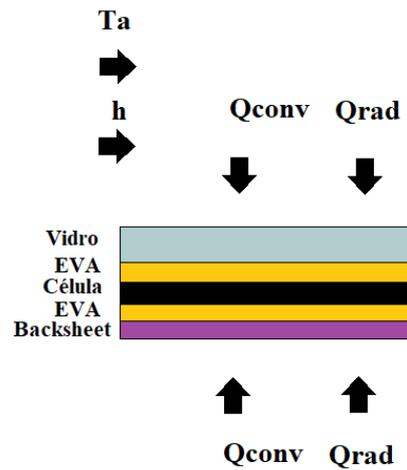
Componente	Entropia gerada e taxas de destruição de exergia
<p>Compressor</p> 	$\dot{S}_{ger.} = \dot{m}_{Ref}(s_1 - s_4) - (\dot{Q}_{41}/T_{Comp.}) \quad (3.13)$ $\dot{E}_{des.} = T_0 \cdot \dot{S}_{ger.} \quad (3.14)$
<p>Condensador</p> 	$\dot{S}_{ger.} = \dot{m}_{ar}(s_8 - s_7) + \dot{m}_{Ref}(s_2 - s_1) \quad (3.15)$ $\dot{E}_{des.} = T_0 \cdot \dot{S}_{ger.} \quad (3.16)$
<p>Evaporador</p> 	$\dot{S}_{ger.} = \dot{m}_{ar}(s_6 - s_5) + \dot{m}_{Ref}(s_4 - s_3) \quad (3.17)$ $\dot{E}_{des.} = T_0 \cdot \dot{S}_{ger.} \quad (3.18)$

Fonte: Autor.

Nas equações (3.13), (3.14), (3.15), (3.16), (3.17) e (3.18) $\dot{S}_{ger.}$ representa a entropia gerada, relacionadas aos fluxos mássicos em cada volume de controle, e $\dot{E}_{des.}$ representa as taxas de destruição de exergia para cada componente.

Quando se considera a contribuição da energia solar fotovoltaica para os sistemas de secagem, consideram-se as trocas de calor através de convecção, condução e radiação, como ilustrado na Figura 3.5, para geração de energia elétrica.

Figura 3.5. Esquema utilizado para análise termodinâmica do painel solar fotovoltaico.



Fonte: Siqueira (2020).

Na Figura 3.5, Q_{conv} refere-se à transferência de calor por convecção, Q_{rad} refere-se à transferência de calor por radiação, T_a refere-se à temperatura do ar e h refere-se ao coeficiente de transferência térmica.

A aplicação da primeira lei da termodinâmica para as células do painel fotovoltaico está representada pela equação (3.19) (SIQUEIRA *et al.*, 2020).

$$\dot{Q}_{cond, cel} = d_{ncel} * c_{cel} * d_{cel} * A_p * \frac{dT_{cel}}{dt} + \dot{Q}_{sw, cel} - \dot{W} \quad (3.19)$$

Na equação (3.19), $\dot{Q}_{cond, cel}$ representa a quantidade de calor trocado através de condução por unidade de tempo associada à célula fotovoltaica, d_{ncel} representa a densidade da célula, c_{cel} representa o calor específico da célula, A_p representa a área do painel, $\frac{dT_{cel}}{dt}$ representa a variação da temperatura da célula em relação ao tempo, $\dot{Q}_{sw, cel}$ representa a troca de calor por unidade de tempo em relação às ondas curtas na célula e \dot{W} representa a potência.

Implementando as considerações feitas nas análises termodinâmicas, obtém-se a equação (3.20).

$$\dot{Q}_{cond, cel} = \dot{Q}_{rad, cel} - \dot{W} \quad (3.20)$$

Na equação (3.20) o termo $\dot{Q}_{cond, cel}$ representa a troca de calor na célula fotovoltaica através da condução. O termo $\dot{Q}_{rad, cel}$ representa a troca de calor a partir da radiação. Levando em consideração que o mecanismo de transferência de calor predominante é a radiação térmica, que produz o efeito fotovoltaico (AMARANTE *et al.*, 2019), a potência gerada no painel pode

ser calculada a partir da avaliação da radiação térmica. A equação de Stefan-Boltzmann, equação (3.21), pode ser utilizada para determinar a troca de calor no painel solar fotovoltaico, de forma semelhante à análise desenvolvida por Amarante *et al* (2019).

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \times A \times T^4 \quad (3.21)$$

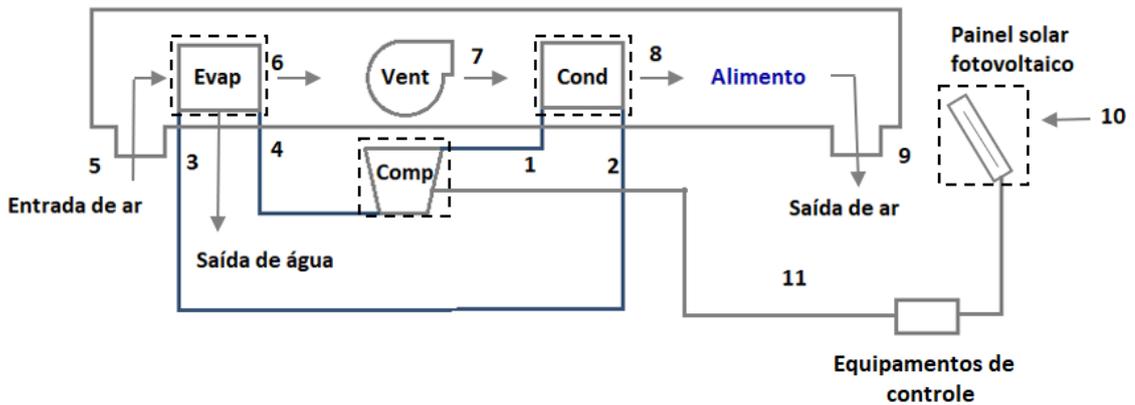
A eficiência do painel solar fotovoltaico é definida pela relação entre a potência gerada e a irradiação incidente sobre o painel solar fotovoltaico. A equação (3.22) expressa a eficiência do módulo fotovoltaico.

$$\eta = \frac{W}{I_C * A} \quad (3.22)$$

No trabalho foi levada em consideração uma eficiência de 10% para o painel fotovoltaico, valor médio dentro do intervalo estimado no trabalho de Barbosa (2020) e uma irradiação média de 230 W/m², com inclinação do painel solar de 0° norte no plano horizontal, foi possível estimar a área necessário para atender a demanda de energia de cada sistema de secadora, a partir da geração de energia solar fotovoltaica. Os valores de irradiação foram retirados do Cresesb (Centro de Referência para as energias solar e eólica Sérgio de S. Brito), para a cidade de Joao Pessoa (CRESESB, 2022). Nos dados do Cresesb estão disponíveis valores de inclinação do painel solar fotovoltaico de 0°, 5° e 7°, para a localização avaliada (próximo à Universidade Federal da Paraíba), com valores muito próximos de irradiação, divergindo na segunda casa decimal. Uma vez que na avaliação teórica as desvantagens do painel solar fotovoltaico com uma inclinação de 0°, como acúmulo de sujeira, não foram levados em consideração, optou-se por uma inclinação de 0°.

A secadora de alimentos a bomba de calor com auxílio de energia solar fotovoltaica tem como base a secadora da Figura 3.4, com a energia demandada pelo compressor e pelo ventilador sendo suprida pelos painéis fotovoltaicos (Figura 3.6). A potência demandada pelo arranjo foi usada para avaliar a área necessária de geração solar fotovoltaica.

Figura 3.6. Esquema da secadora a energia solar com auxílio de energia solar fotovoltaica.



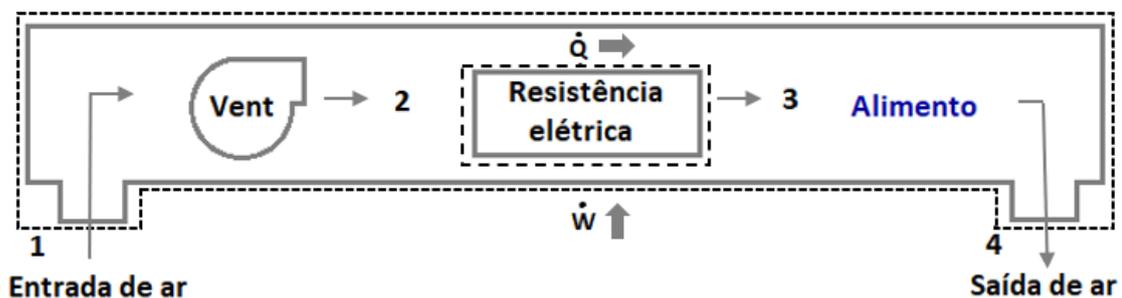
Fonte: Autor

3.2 Secador de alimentos a resistência elétrica

A resistência elétrica escolhida é da marca Sodromar Brastherm, com 12 kW de potência, tensão de 220 a 230 V (SODRAMAR, 2022). A secadora de bandeja está associada a uma resistência elétrica, que é utilizada para aquecer o ar que entra em contato com o alimento.

Na Figura 3.7, está representado um esquema do objeto de estudo.

Figura 3.7. Diagrama esquemático da secadora por resistência elétrica.



Fonte: Autor.

Neste tipo de secadora o aquecimento do ar que entra em contato com alimento se dá através de uma resistência elétrica, que fica localizada na parte posterior da secadora, antes das bandejas onde ficam os alimentos. Quando o ar entra em contato com a resistência elétrica ocorre uma troca de calor, entre o ar e a resistência elétrica, e o ar aquece. Posteriormente, o ar

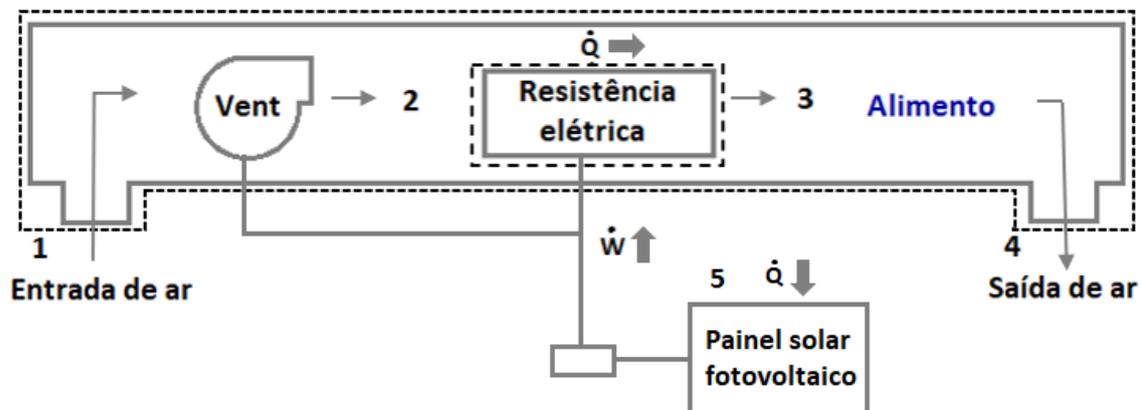
quente proveniente da troca de calor com a resistência elétrica entra em contato com o alimento e ocorre o processo de secagem.

No esquema da secadora a resistência elétrica, os volumes de controle da resistência e do sistema como um todo engloba o trabalho recebido da rede elétrica e o calor rejeitado pela resistência e recebido pela massa de ar, bem como o ar que passa pelo volume de controle. Nesse sistema, a massa de ar é admitida pela entrada de ar no estado 1, passa pela resistência elétrica até atingir o estado 3 e é rejeitada pela saída de ar.

Inclusão de energia solar fotovoltaica

Neste caso, a energia demandada pela resistência e pelo ventilador é suprida pelos painéis fotovoltaicos. A Figura 3.8 mostra o esquema do objeto de estudo. A potência demandada pela secadora será calculada e utilizada para avaliar a área necessária para a geração solar fotovoltaica.

Figura 3.8. Esquema da secadora a resistência elétrica com painéis fotovoltaicos.



Fonte: Autor.

As análises termodinâmicas dos objetos de estudo foram feitas utilizando a equação de conservação da massa, e a primeira e segunda leis da termodinâmica. A modelagem termodinâmica foi implementada no *Engineering Equation Solver* (EES, 2022), abordado na seção 3.1.

A análise termodinâmica foi desenvolvida considerando-se volumes de controle em cada componente da secadora de alimentos (Figuras 3.4 e 3.7), e aplicando-se as leis da conservação da massa e energia, com as seguintes considerações:

- Regime permanente;
- Desconsideradas as variações de energia cinética e potencial;
- As perdas de energia referentes ao aquecimento da resistência elétrica foram desconsideradas;
- Todo o calor rejeitado pela resistência elétrica é absorvido pelo ar.

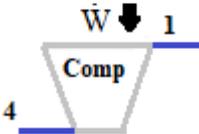
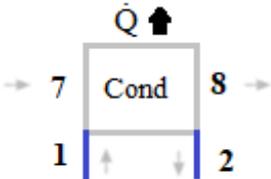
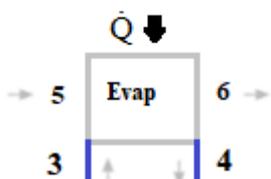
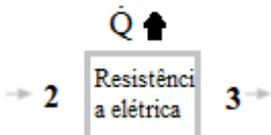
A Tabela 3.4 mostra os dados de entrada utilizados nas modelagens termodinâmicas da secadora a resistência elétrica. Com os valores de entrada, foi possível calcular a potência demandada. A Tabela 3.5 reúne os balanços de massa e energia aplicáveis a cada volume de controle. Na Tabela 3.6, estão dispostas as equações usadas para a análise da geração de entropia e destruição de exergia.

Tabela 3.4. Dados de entrada para o Ar.

Ar	Fortes (2020)	Cogumelos	Macaxeira	Batata-doce
Te_ar [°C]	30	30	30	30
Tes_ar [°C]	45	80	45 – 60	50 – 90
Ur_ar [%]	74	100	55	50
Urs_ar [%]	24	0	n/a	n/a
ṁ_ar [kg/s]	0,0627	0,7216	0,3035	n/a

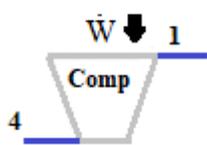
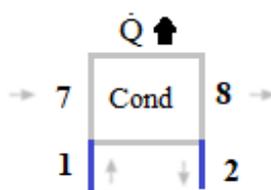
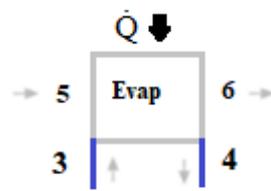
Fonte: Autor.

Tabela 3.5. Balanços de massa e energia para cada componente nos esquemas de secagem.

Componente	Balanço de massa e energia
<p>Compressor</p> 	$\dot{Q}_{41} = \dot{W}_{41} + \dot{m}_{Ref}(h_1 - h_4) \quad (3.23)$
<p>Condensador</p> 	$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_{Ref}(h_2 - h_1) \quad (3.24)$ $\dot{Q}_{78} = \dot{m}_{ar}(h_8 - h_7) \quad (3.25)$
<p>Evaporador</p> 	$\dot{Q}_{34} = \dot{m}_{ar}(h_4 - h_3) \quad (3.26)$ $\dot{m}_{ág} = \dot{m}_{ar}(\omega_5 - \omega_6) \quad (3.27)$ $\dot{Q}_{56} = \dot{m}_{ar}(h_6 - h_5) + \dot{m}_{ág}h_{10} \quad (3.28)$ $\dot{Q}_{56} = -\dot{Q}_{34} \quad (3.29)$
<p>Resistência elétrica</p> 	$\dot{Q}_{23} = \dot{m}_{ar}(h_3 - h_2) \quad (3.30)$

Fonte: Autor.

Tabela 3.6. Equações para a análise de geração de entropia e taxas de destruição de exergia dos componentes das secadores de alimentos

Componente	Entropia gerada e destruição de exergia
<p>Compressor</p> 	$\dot{S}_{ger.} = \dot{m}ar (s1 - s4) - (\dot{Q}_{41}/ T_{Comp.}) \quad (3.29)$ $\dot{E}_{des.} = T_0 \cdot \dot{S}_{ger.} \quad (3.31)$
<p>Condensador</p> 	$\dot{S}_{ger.} = \dot{m}ar (s8 - s7) + \dot{m}Ref(s2 - s1) \quad (3.32)$ $\dot{E}_{des.} = T_0 \cdot \dot{S}_{ger.} \quad (3.33)$
<p>Evaporador</p> 	$\dot{S}_{ger.} = \dot{m}ar (s6 - s5) + \dot{m}Ref(s4 - s3) \quad (3.34)$ $\dot{E}_{des.} = T_0 \cdot \dot{S}_{ger.} \quad (3.35)$
<p>Resistência elétrica</p> 	$\dot{S}_{ger.} = \dot{m}ar (s3 - s2) \quad (3.36)$ $\dot{E}_{des.} = T_0 \cdot \dot{S}_{ger.} \quad (3.37)$

Fonte: Autor.

Nas equações (3.31), (3.32), (3.33), (3.34), (3.35), (3.36), (3.37) e (3.38), a entropia gerada e as taxas de destruição de exergia estão relacionadas aos respectivos fluxos mássicos.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Bomba de calor

Com os dados de entrada e a aplicação das equações (3.2) a (3.18), foi possível verificar o código desenvolvido, e avaliar os parâmetros da secagem de macaxeira, batata-doce e cogumelos, utilizando os dados de entrada dispostos na Tabela 3.1.

Os resultados obtidos a partir da análise energética, para o processo de secagem utilizando o refrigerante R134a, estão dispostos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Análise energética para secagem com o R134a.

	Ponto analisado (Figura 3.4)	4	1	03/05	04/06	07/01	08/02	10
Circuito de R134a	T [°C]	7,2	54,4	7,2	7,2	59,1	54,4	-
	Entalpia específica [kJ/kg]	254,6	282,8	127,8	254,6	282,8	130,4	-
	Entropia específica [kJ/kg.K]	0,93	0,93	0,29	0,93	0,93	0,46	-
	P [kPa]	337,5	1741	377,5	377,5	1741	1741	-
Circuito de ar (FORTEES, 2017)	T [°C]	-	-	30	19,75	19,75	45	19,75
	Entalpia [kJ/kg]	-	-	81,02	56,53	56,53	82,59	82,78
	Umidade Relativa	-	-	1	0,74	0,74	0,24	
	Entropia específica [kJ/kg.K]	-	-	5,89	5,8	5,8	5,895	0,29
Cogumelo	T [°C]	-	-	29,85	29,85	-106,65	80	-106,65
	Entalpia [kJ/kg]	-	-	98,9	98,9	-106,9	130,4	-516,2
	Umidade Relativa	-	-	1	1	1	0	
	Entropia específica [kJ/kg.K]	-	-	5,95	5,95	5,11	5,87	-2,053
Macaxeira	T [°C]	-	-	30	6,95	6,95	60	6,95
	Entalpia [kJ/kg]	-	-	67,64	22,5	22,5	76,45	29,22
	Umidade Relativa	-	-	0,55	1	1	0,05	
	Entropia específica [kJ/kg.K]	-	-	5,85	5,69	5,69	5,87	-2,05
Batata-doce	T [°C]	-	-	30	13,65	13,65	70	13,65
	Entalpia [kJ/kg]	-	-	60,61	38,24	38,24	95,96	57,15

Umidade Relativa	-	-	0,5	1	1	0,05	
Entropia específica [kJ/kg.K]	-	-	5,823	5,75	5,75	5,93	0,2

Fonte: Autor.

Na Tabela 4.1, os pontos analisados são referentes ao esquema termodinâmico da Figura 3.4.

Para verificar o algoritmo desenvolvido, foram utilizados os parâmetros do trabalho de Fortes (2017). Os dados gerados para o refrigerante R134a e para o ar, estão ilustrados na Tabela 4.1, nas colunas referentes ao trabalho de Fortes (2017).

O COP avaliado para o sistema foi de 5,4, o fluxo mássico do R134a e do ar foram de 0,01073 kg/s e 0,06275 kg/s, respectivamente. O trabalho realizado pelo compressor foi de 0,3024 kJ/s. A troca de calor no evaporador foi de 1,509 kJ/s e no condensador, 1,635 kJ/s. Através da análise dos dados gerados na verificação, é possível verificar que o algoritmo desenvolvido pode ser utilizado para avaliar o processo de secagem de alimentos.

Os dados da Tabela 4.1, referentes ao ciclo do refrigerante R134a e para o ar, nas colunas referentes ao trabalho de Andrade (2020), foram gerados levando em consideração o processo de secagem de cogumelos.

O COP avaliado para o sistema foi de 5,4, o fluxo mássico do R134a e do ar foram de 0,8873 kg/s e 0,7216 kg/s, respectivamente. O trabalho realizado pelo compressor foi de 2,5 kJ/s. A troca de calor no evaporador foi de 15,86 kJ/s e no condensador, 13,52 kJ/s.

Como pode ser visto, para um regime permanente, hipótese feita neste trabalho, as condições para a secagem de cogumelos utilizando o compressor escolhido é impraticável, pois o ar passaria por estados incompatíveis com a realidade, uma vez que a água condensaria a uma temperatura muito baixa, e estaria no estado sólido. Isso pode ser explicado pela necessidade de uma grande troca de calor no evaporador para atingir o estado final desejado, quando comparado com o trabalho de Andrade (2020), no qual a secagem é feita em vários ciclos e realizada em regime transiente, com o aumento da troca de calor necessário aumentando a cada ciclo.

Os dados da Tabela 4.1, referentes ao ciclo do refrigerante R134a e para o ar, nas colunas referentes à secagem de macaxeira, foram gerados levando em consideração os dados de entrada retirados do trabalho de Aviara *et al.* (2014), para uma temperatura de saída de 60° C. O COP avaliado para o sistema foi de 5,4, o fluxo mássico do R134a e do ar foram de 0,01015 kg/s e 0,03035 kg/s, respectivamente. O trabalho realizado pelo compressor foi de 0,3028 kJ/s. A troca de calor no evaporador foi de 1,363 kJ/s e no condensador, 1,638 kJ/s. É possível perceber, a partir da análise das tabelas, que a secagem da macaxeira, utilizando o compressor escolhido e os parâmetros do trabalho de Aviara *et al.* (2014), é viável do ponto de vista termodinâmico.

Os dados da tabela 4.1, referentes ao ciclo do refrigerante R134a e para o ar, nas colunas referentes à secagem de batata-doce, foram gerados levando em consideração os dados de entrada do trabalho de Singh e Pandey (2011), para a temperatura de secagem de 70 °C. O COP avaliado para o sistema foi de 5,4, o fluxo mássico do R134a e do ar foram de 0,0115 kg/s e 0,03035 kg/s, respectivamente. O trabalho realizado pelo compressor foi de 0,324 kJ/s. A troca de calor no evaporador foi de 0,78 kJ/s e no condensador, 1,752 kJ/s. É possível perceber pela análise das tabelas que a secagem da batata doce também é viável, do ponto de vista termodinâmico.

A Tabela 4.2 apresenta os valores da avaliação referente ao tratamento psicrométrico do ar durante o processo de secagem dos alimentos. Na secagem utilizando a bomba de calor, além de haver um aquecimento do ar que entra em contato com o alimento, ocorre uma redução da umidade relativa, a partir da condensação de uma parte da umidade presente no ar que entra em contato com o evaporador. A Tabela 4.2 apresenta os fluxos mássicos da água condensada no evaporador para cada cenário de secagem utilizando a bomba de calor.

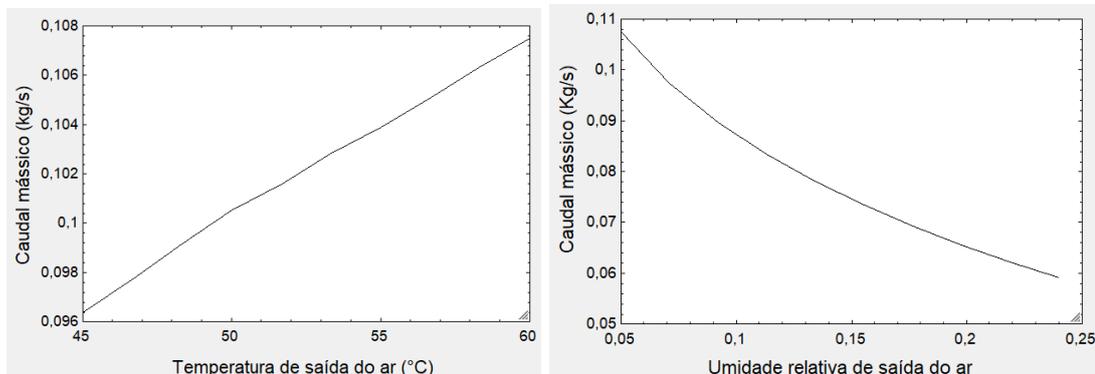
Tabela 4.2. Fluxo mássico de água condensada no evaporador.

	Fortes (2017)	Macaxeira	Batata-doce
\dot{m}_{ag} [kg/s]	0,00034	0,00026	0,00011

Fonte: Autor.

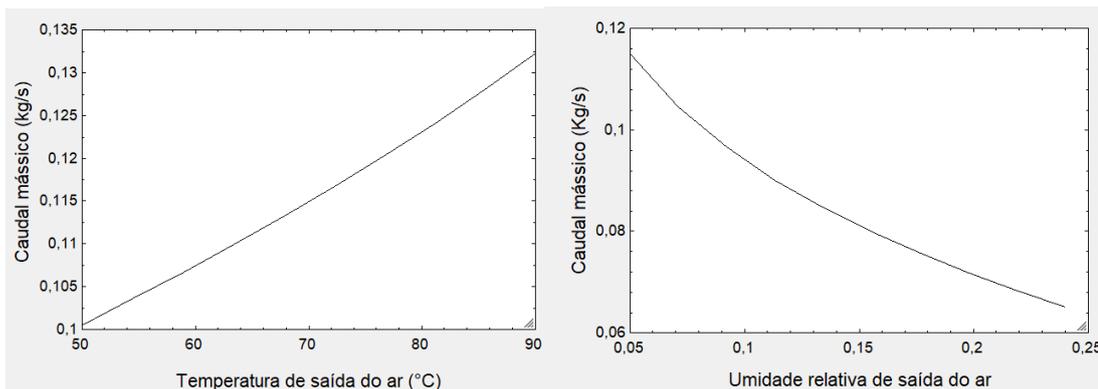
Nos experimentos para secagem de macaxeira e batata doce, foram realizadas também análises paramétricas do caudal mássico em relação à temperatura de secagem e à umidade relativa de saída. As Figuras 4.1 e 4.2 mostram, respectivamente, os gráficos para a macaxeira e batata doce.

Figura 4.1. Gráfico do caudal mássico vs. A) Temperatura de saída e b) umidade relativa de saída do ar. Secagem de macaxeira.



Fonte: Autor.

Figura 4.2. Gráfico do caudal mássico vs. A) Temperatura de saída e b) umidade relativa de saída do ar. Secagem de batata doce.



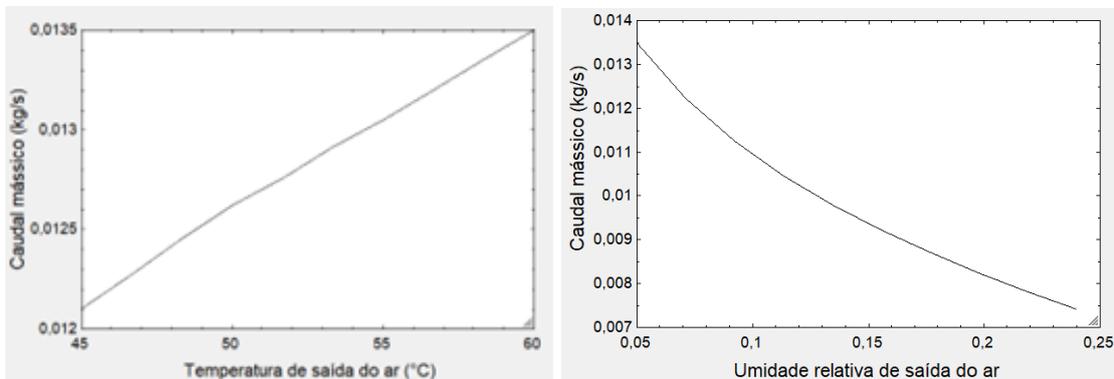
Fonte: Autor.

A análise da Figura 4.1 mostra que um aumento na temperatura de secagem de 45 para 60 °C representa um aumento de 12,5 % no caudal mássico necessário, e o aumento da umidade relativa de saída do ar de 0,05 para 0,24 representa uma redução de 45,45 % no caudal mássico necessário para a secagem de macaxeira.

A análise da Figura 4.2 mostra que um aumento na temperatura de secagem de 50 para 90 °C representa um aumento de 35 % no caudal mássico necessário, e o aumento da umidade relativa de saída do ar de 0,05 para 0,24 representa uma redução de 43,39 % no caudal mássico necessário para a secagem de macaxeira.

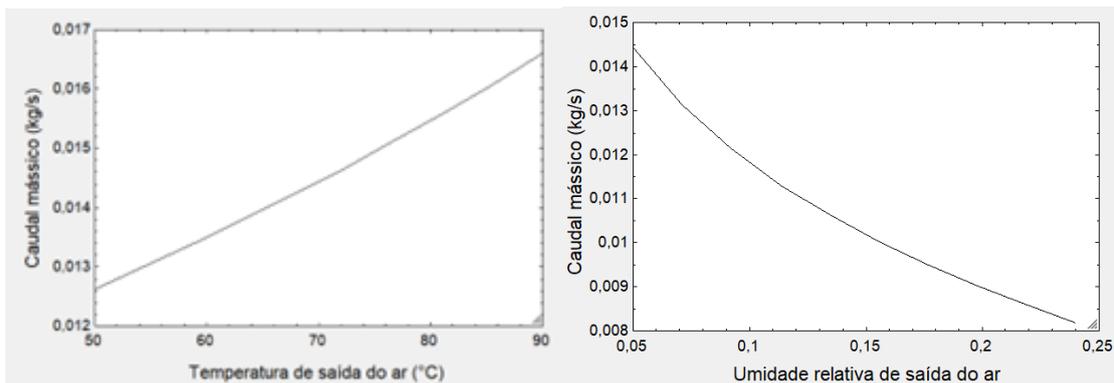
As Figuras 4.3 e 4.4 mostram, respectivamente, os gráficos da análise paramétrica para a macaxeira e batata doce, utilizando o refrigerante R717.

Figura 4.3. Gráfico do caudal mássico vs. A) Temperatura de saída e b) umidade relativa de saída do ar. Secagem de macaxeira.



Fonte: Autor.

Figura 4.4. Gráfico do caudal mássico vs. A) Temperatura de saída e b) umidade relativa de saída do ar. Secagem de batata doce.



Fonte: Autor.

A análise da Figura 4.3 mostra que um aumento na temperatura de secagem de 45 para 60 °C representa um aumento de 12,5 % no caudal mássico necessário, e o aumento da umidade relativa de saída do ar de 0,05 para 0,24 representa uma redução de 50 % no caudal mássico necessário para a secagem de macaxeira.

A análise da Figura 4.4 mostra que um aumento na temperatura de secagem de 50 para 90 °C representa um aumento de 42 % no caudal mássico necessário, e o aumento da umidade relativa de saída do ar de 0,05 para 0,24 representa uma redução de 47 % no caudal mássico necessário para a secagem de macaxeira.

4.1.1 Fluidos Refrigerantes Alternativos

Foram realizadas as análises energéticas, de geração de entropia e destruição de exergia para a secagem de macaxeira e batata doce, utilizando fluidos refrigerantes alternativos. O

fluido refrigerante escolhido para desenvolver a comparação com o R134a foi o fluido refrigerante R717, que apresenta um potencial de aquecimento global reduzido, quando comparado com outros fluidos refrigerantes (LI *et al.*, 2019).

Os valores obtidos para a secagem utilizando os fluidos refrigerantes alternativos estão dispostos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Análise energética para secagem com o R717.

	Ponto analisado (Figura 3.4)	4	1	02/05	04/06	07/01	08/02	10
Valores obtidos para o R717	T [°C]	7,20	54,40	7,20	7,20	59,10	54,40	-
	Entalpia específica [kJ/kg]	1470,00	1677,00	929,00	1470,00	282,80	463,10	-
	Entropia específica [kJ/kg.K]	5,54	5,54	3,60	5,54	5,54	1,87	-
	P [kPa]	337,50	1741,00	337,50	337,50	1741,00	1741,00	-
	T [°C]	-	-	30	6,95	6,95	60	6,95
Macaxeira	Entalpia [kJ/kg]	-	-	98,9	22,5	22,5	76,45	29,12
	Umidade Relativa	-	-	0,55	1	1	0,05	
	Entropia específica [kJ/kg.K]	-	-	5,85	5,69	5,691	5,867	-2,053
	T [°C]	-	-	30	13,65	13,65	70	13,65
Batata- doce	Entalpia [kJ/kg]	-	-	60,61	38,24	38,24	95,96	57,15
	Umidade Relativa	-	-	0,5	1	1	0,05	
	Entropia específica [kJ/kg.K]	-	-	5,82	5,75	5,746	5,93	0,2

Fonte: Autor.

Na Tabela 4.3, estão representados os resultados obtidos para o ciclo do refrigerante e para o ar para secagem de macaxeira. A temperatura de secagem utilizada foi de 60 °C, com o fluido R717.

O COP avaliado para o sistema foi de 5,86, o fluxo mássico do R717 e do ar foram de 0,0135 kg/s e 0,03035 kg/s, respectivamente. O trabalho realizado pelo compressor foi de 0,2795 kJ/s. A troca de calor no evaporador foi de 1,663 kJ/s e no condensador, 1,638 kJ/s.

A avaliação das tabelas mostra que, quando comparado com o R134a, o processo de secagem da macaxeira apresenta uma redução de 86% no caudal mássico necessário. Além disso, houve uma redução no trabalho realizado pelo compressor, na geração de entropia e destruição de exergia do processo.

Na Tabela 4.3, estão representados também os resultados obtidos para secagem da batata-doce, utilizando uma temperatura de secagem de 70 °C.

O COP avaliado para o sistema foi de 5,86, o fluxo mássico do R717 e do ar foram de 0,0144 kg/s e 0,03035 kg/s, respectivamente. O trabalho realizado pelo compressor foi de 0,299 kJ/s. A troca de calor no evaporador foi de 1,363 kJ/s e no condensador, 1,638 kJ/s.

4.1.2 Resultados da geração de entropia e destruição de exergia

Na Tabela 4.4, estão ilustrados os resultados obtidos para a secagem em todos os cenários discutidos anteriormente.

Tabela 4.4. Análise da geração de entropia e destruição de exergia.

		Condensador	Evaporador
Fortes (2017) – R134a	Geração de Entropia [kW/K]	0,001	0,31
	Destruição de exergia [kW]	1,63	94,42
Cogumelo – R134a	Geração de Entropia [kW/K]	0,05	0,36
	Destruição de exergia [kW]	16,5	108,7
Macaxeira – R134a	Geração de Entropia [kW/K]	0,01	0,15
	Destruição de exergia [kW]	1,62	45,25
Batata- doce – R134a	Geração de Entropia [kW/K]	0,01	0,15
	Destruição de exergia [kW]	2,0	44,96
Macaxeira – R717	Geração de Entropia [kW/K]	0,01	0,01
	Destruição de exergia [kW]	1,62	32,9
Batata- doce – R717	Geração de Entropia [kW/K]	0,01	0,01
	Destruição de exergia [kW]	2,0	22,8

Fonte: Autor.

Pela análise das tabelas, os valores de geração de entropia e destruição de exergia do ciclo utilizando o refrigerante R717 são menores quando comparados com o refrigerante R134a.

A análise do conjunto de resultados gerados mostra que o maior foco de geração de entropia no objeto de estudo é o evaporador. Por esse motivo, melhorias de eficiência do sistema devem focar nesse componente. Além disso, após o estudo desenvolvido, foi possível constatar a validade da metodologia utilizada para analisar os cenários propostos, atendendo aos objetivos do trabalho proposto.

A partir do algoritmo desenvolvido no programa computacional EES, foi possível avaliar o processo de secagem para diversos cenários, envolvendo secagem de diferentes alimentos,

entre eles: macaxeira, batata doce e cogumelos. As análises desenvolvidas envolveram a aplicação da primeira e segunda leis da termodinâmica nos volumes de controle aplicados no objeto de estudo. Além das análises energéticas, de geração de entropia e destruição de exergia, foi desenvolvida uma análise paramétrica do caudal mássico para diferentes temperaturas de secagem e umidade relativa final do ar.

Os resultados obtidos mostram que: 1) a variação da temperatura de saída do ar e da umidade relativa final do ar impactam de forma relevante o caudal mássico necessário para o processo de secagem. 2) a utilização do refrigerante R717, como alternativa ao R134a, reduz o caudal mássico necessário, a geração de entropia, a destruição de exergia e quantidade de trabalho necessário no compressor.

4.2 Secadora elétrica

A Tabela 4.5 mostra os resultados encontrados para a secadora de alimentos a resistência elétrica, de acordo com o esquema termodinâmico, para a secagem da macaxeira e da batata doce, utilizando a secadora a resistência elétrica.

Tabela 4.5. Análise energética para secagem com a secadora a resistência elétrica.

		Entrada de ar	Saída de ar
Macaxeira – R717	Temperatura [°C]	30	60
	Entalpia [kJ/kg]	68,78	257,6
	Umidade relativa	0,55	0,55
	Entropia [kJ/kg.K]	5,851	6,458
Batata-doce – R717	Temperatura [°C]	30	70
	Entalpia [kJ/kg]	65,22	368,2
	Umidade relativa	0,50	0,50
	Entropia [kJ/kg.K]	5,839	6,799

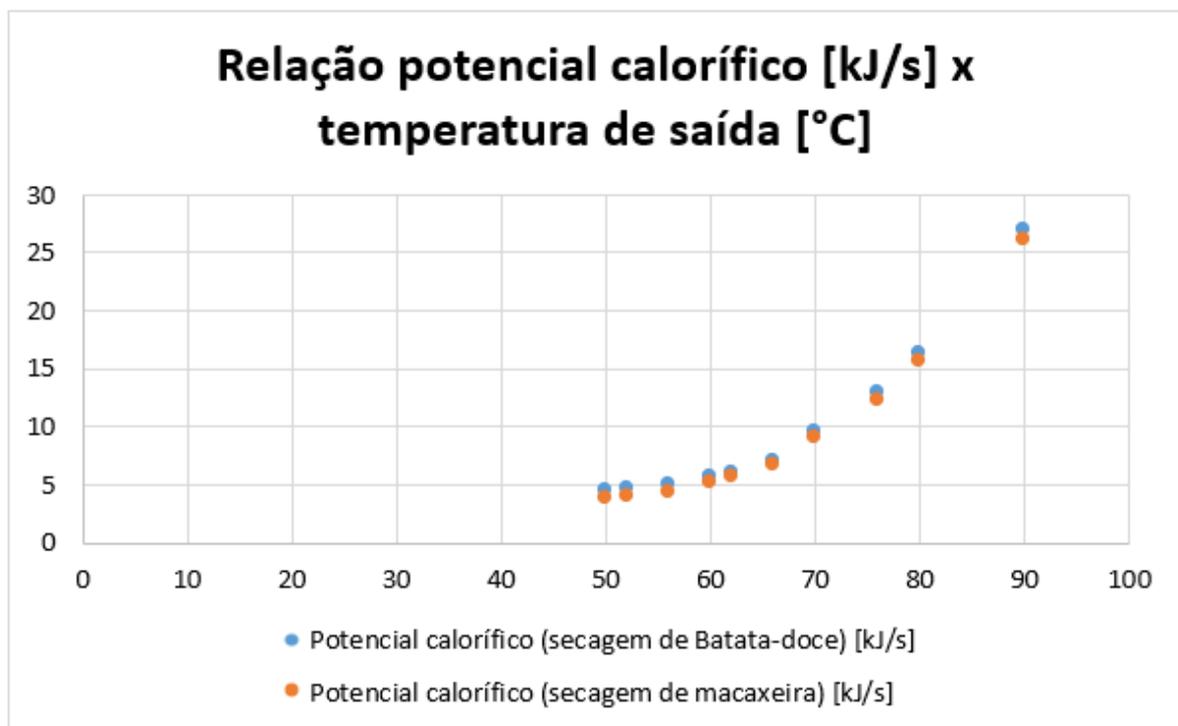
Fonte: Autor.

Os dados da Tabela 4.5 referentes à secagem de macaxeira, foram gerados levando em consideração uma temperatura de saída de 60 °C. O fluxo mássico do ar considerado na secagem foi de 0,03035 kg/s. O valor obtido para a troca de calor entre o ar e a resistência elétrica foi de 5,7 kJ/s. O calor necessário para o processo de secagem utilizando resistência elétrica representa um aumento de 74,7 % na quantidade de energia na forma de calor demandada, quando levado em consideração o calor trocado no evaporador e no condensador.

Os dados da tabela 4.5 referentes à secagem da batata doce, foram gerados levando em consideração uma temperatura de secagem de 70 °C. O fluxo mássico do ar considerado na secagem foi de 0,03035 kg/s. O valor obtido para a troca de calor entre o ar e a resistência elétrica foi de 9,197 kJ/s. O calor necessário para o processo de secagem utilizando resistência elétrica representa um aumento de 209,9 % na quantidade de energia na forma de calor demandada, quando levado em consideração o calor trocado no evaporador e no condensador.

Além das análises descritas anteriormente, foi desenvolvida uma análise paramétrica para avaliar a variação na demanda de energia de acordo com a variação da temperatura de secagem da macaxeira e da batata doce.

Figura 4.5. Análise paramétrica da relação entre a temperatura de secagem e a troca de calor para a secagem utilizando a secadora a resistência elétrica



Fonte: Autor.

A análise da Figura 4.5 mostra que uma variação de 45 para 60 °C na temperatura de secagem da macaxeira representa um aumento de 185 % na troca de calor, para o processo de com a secadora a resistência elétrica. Em relação a batata doce, um aumento de 50 para 90° C na temperatura de secagem representa um aumento de 391 % na demanda de calor para o processo de secagem, para o processo de com a secadora a resistência elétrica. Além disso, a

análise dos gráficos gerados mostra que a troca de calor aumenta de forma exponencial em relação a temperatura de secagem, para os intervalos analisados.

Os resultados na análise de geração de entropia e destruição de exergia estão dispostos na Tabela 4.6, para batata-doce e macaxeira, considerando a secadora elétrica e a bomba de calor.

Tabela 4.6. Comparação da geração de entropia e destruição de exergia entre a secagem utilizando a secadora a resistência elétrica e a secadora a bomba de calor.

		Resistência elétrica	Bomba de calor (R134a)		Bomba de calor (R717)	
			Condensador	Evaporador	Condensador	Evaporador
Macaxeira	Geração de Entropia [kW/K]	0,02	0,01	0,15	0,01	0,01
	Destruição de exergia [kW]	5,59	1,62	4,50	1,62	2,93
Batata-Doce	Geração de Entropia [kW/K]	0,03	0,01	0,15	0,01	0,01
	Destruição de exergia [kW]	8,84	2,00	4,49	2,00	2,82

Fonte: Autor.

Observa-se que os maiores valores de geração de entropia foram encontrados na secagem de alimentos utilizando a secadora de alimentos a resistência elétrica. Por outro lado, os menores valores de geração de entropia e destruição de exergia foram encontrados na secagem de alimentos utilizando a bomba de calor, com o fluido refrigerante R717.

A análise dos resultados obtidos nos experimentos mostra que os valores de geração de entropia e destruição de exergia dependem do fluido refrigerante. A secadora a bomba de calor apresentou melhores resultados em relação a quantidade de energia demandada para secagem dos alimentos, para os dois fluidos refrigerantes testados.

4.3 Influência da energia solar fotovoltaica

A Tabela 4.7 mostra o trabalho demandado pelo compressor, e a área necessária do painel solar fotovoltaico para cada caso estudado.

Tabela 4.7. Comparação da área calculada do painel solar fotovoltaico para a secagem com a secadora a resistência elétrica e a secadora a bomba de calor.

	Trabalho demandado pelo compressor [kW]	Área calculada do painel solar fotovoltaico [m ²]
Macaxeira – R134a	0,302	13,17
Macaxeira – R717	0,279	12,15
Macaxeira – Resistência	5,766	250,70
Batata-doce – R134a	0,324	14,09
Batata-doce – R717	0,299	13,00
Batata-doce – Resistência	9,299	404,30

Fonte: Autor.

A análise da Tabela 4.7 mostra a necessidade de uma área maior de geração de energia solar fotovoltaica para as bombas de calor a resistência elétrica. Isso se deve ao fato de que essas bombas demandam uma potência maior para o processo de secagem, acima de 5 kW.

Os resultados mostram que a secagem de macaxeira utilizando resistência elétrica representou um aumento na quantidade de energia demandada pelo sistema para que a secagem seja realizada. No caso da secagem de macaxeira, a secagem utilizando a secadora a resistência elétrica representou um aumento de 74,7 %, em relação a secadora a bomba de calor. Para a secagem de batata doce, a secagem utilizando resistência elétrica representou um aumento de 209,9 %, em relação a secagem utilizando bomba de calor. Além disso, foi possível perceber que, para o intervalo analisado, um aumento na temperatura de secagem utilizando a bomba de calor a resistência elétrica, representa um aumento exponencial na demanda de energia para secagem.

Em relação à geração de entropia e à destruição de exergia, quando comparado com a secagem utilizando bomba de calor, a secadora a resistência elétrica apresentou piores

resultados. A Tabela 4.3 mostra valores consideravelmente maiores para a geração de entropia utilizando a secadora a resistência elétrica.

A avaliação termodinâmica dos sistemas de secagem de alimentos a bomba de calor e a resistência elétrica possibilitou a comparação desses sistemas de secagem em relação ao consumo de energia, geração de entropia e destruição de exergia, para os casos de secagem de macaxeira e batata-doce.

A análise da secagem de alimentos com auxílio de energia solar fotovoltaica mostra que, para os cenários analisados, a aplicação de painéis solares demanda uma área menor para as secadoras a bomba de calor, uma vez que a potência demandada no processo de secagem é consideravelmente menor do que as secadores a resistência elétrica.

O conjunto de dados analisados permitem concluir que: 1) a quantidade de energia na forma de calor demandada pela secadora a resistência elétrica foi maior do que a secadora a bomba de calor, em todos os cenários analisados. 2) a variação da temperatura de secagem dos alimentos resulta em aumento exponencial da quantidade de calor demandado pela secadora, nos intervalos analisados. 3) os maiores de valores de geração de entropia foram encontrados na secagem de alimentos utilizando a secadora a resistência elétrica. 4) os menores valores de geração de entropia e destruição de exergia estão relacionados à secagem de alimentos utilizando a secadora a bomba de calor, com o fluido refrigerante R717. 5) a aplicação de energia solar fotovoltaica é mais viável nos cenários das secadoras a bomba de calor.

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho desenvolveu uma análise da secagem de alimentos utilizando diferentes sistemas de secagem: uma secadora de alimentos a bomba de calor, e uma secadora de alimentos a resistência elétrica. O primeiro passo foi o desenvolvimento de uma análise termodinâmica da secagem de alimento utilizando bomba de calor. Na avaliação termodinâmica dos sistemas de bombas de calor, foi realizada uma análise utilizando a primeira e a segunda leis da termodinâmica. Além disso, foram feitas análises paramétricas para analisar as alterações de alguns parâmetros de secagem em relação à quantidade de calor demandado pelo sistema e em relação ao caudal mássico.

Em relação à bomba de calor, foram analisados dois fluidos refrigerantes diferentes. Os principais parâmetros analisados na comparação foram a quantidade de energia demandada pelo sistema e a geração de entropia e destruição de exergia. Os estudos mostraram que, do ponto de vista termodinâmico, o refrigerante R717 apresenta melhores resultados, tanto na geração de entropia quanto na destruição de exergia, quando comparado com o R134a.

O segundo passo, foi o desenvolvimento de uma análise comparativa entre os dois cenários de secagem de alimentos. O primeiro cenário foi a secagem de alimentos utilizando a bomba de calor, e o segundo cenário foi a secagem de alimentos utilizando a resistência elétrica.

A secadora a bomba de calor apresentou resultados significativamente melhores do que a secadora a resistência elétrica nos parâmetros analisados, de forma condizente com o que foi visto no referencial teórico.

Por fim, foi desenvolvida uma avaliação da relação entre a potência demandada pelos sistemas e a área de um sistema fotovoltaico para atender a essa demanda. Como resultado, pode ser visto que a secadora a resistência elétrica demanda uma área consideravelmente maior, devido à uma maior demanda de potência do sistema.

Em relação a trabalhos futuros, é proposta uma análise ambiental dos sistemas presentes neste trabalho, para avaliar os impactos ambientais de cada um dos sistemas separadamente e realizar uma comparação mais aprofundado do ponto de vista ambiental. Além disso, é proposto que sejam realizadas análises termodinâmicas experimentais, utilizando os alimentos estudados na pesquisa para validar o modelo computacional em comparação com a secagem de alimentos desenvolvidos na literatura.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Energia solar**. Brasília, DF, 2016.
- ALMEIDA, R. L. J. et al. Cinética de secagem do feijão azuki: modelagem matemática e propriedades termodinâmicas. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 3, p. e27932316-e27932316, 2020.
- AMARANTE, H. M. *et al.* Avaliação da radiação térmica absorvida por placas fotovoltaicas para geração de energia. **Mostra Extensão UFMT**, 2019.
- AMORIM, I. M. M. **Bomba de calor compacta para secagem de alimentos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial -Ramo Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2019.
- ANCONA, M. A.; BIANCHI, M.; BRANCHINI, L.; PASCALE, A.; MELINO, F.; PARETTO, A.. Low-temperature district heating networks for complete energy needs fulfillment. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, v. 24, p. 33–42, 2019.
- ANDRADE, B. C. **Algoritmo de Dimensionamento de Secadores de Alimentos por Bomba de Calor a Ar**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Politecnico de Braganca, Portugal, 2018.
- ARAÚJO, C. V. M. *et al.* Construção de secador solar no semiárido nordestino utilizando materiais recicláveis. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 12, n. 1, p. 21-30, 2021.
- ASTE, N. *et al.* A renewable energy scenario for a new low carbon settlement in northern Italy: Biomass district heating coupled with heat pump and solar photovoltaic system. **Energy**, v. 206, p. 118091, 2020.
- AVIARA, N. A. *et al.* Energy and exergy analyses of native cassava starch drying in a tray dryer. **Energy**, v. 73, p. 809-817, 2014.
- AZIZ, W., CHATURVEDI, S.K.; KHEIREDDINE, A. Thermodynamic analysis of two-component, two-phase flow in solar collectors with application to a direct-expansion solar-assisted heat pump. **Energy**, v. 24, p. 247-259, 1999.
- BAHLAWANA, H.; MORINIB, M.; PINELLIA, M.; POGANIETZC, W.; SPINAA, P. R.; VENTURINIA, M.. Optimization of a hybrid energy plant by integrating the cumulative energy demand. **Applied Energy**, v. 253, 2019.
- BAHLAWANA, H.; POGANIETZ, W.; SPINAA, P. R.; VENTURINIA, M.. Cradle-to-gate life cycle assessment of energy systems for residential applications by accounting for scaling effects. **Applied Thermal Engineering**, v. 171, p. 1-13, 2020.
- BARBOSA, Gabriel V. et al. Análise de eficiência solar em painéis fotovoltaicos. **Revista Processos Químicos**, v. 14, n. 28, p. 108-115, 2020.
- BELLOS, E.; TZIVANIDIS, C.. Parametric investigation of a trigeneration system with an organic rankine cycle and absorption heat pump driven by parabolic trough collectors for the building sector. **Energies**, v. 13, n. 1800, p. 1-26, 2020.
- BESAGNIA, G.; CROCIA, L.; NESAB, R.. Solar-assisted dual-source multifunctional heat pump: field tests results and thermodynamic analysis. **Chemical Engineering Transactions**, v. 70, p. 253-258, 2018.
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2050**. Ministério de Minas e Energia. Brasília: MME/EPE, 2020.
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2029. **MME/EPE**, Brasília, 2020.
- CALISE, F., FIGAJ, R. & VANOLI, L (2017). A novel polygeneration system integrating photovoltaic/thermal collectors, solar assisted heat pump, adsorption chiller and electrical energy storage: Dynamic and energy-economic analysis. **Energy Conversion and Management**. 2017, p. 794–814.
- CELESTINO, S. M. C.. Princípios de secagem de alimentos. **Embrapa Cerrados-documentos (infoteca-e)**, Planaltina, DF, 2010.
- CHEN, J.. Thermodynamic analysis of the performance of a solar absorption heat transformer at maximum coefficient of performance. **International Journal of Energy Research**, v. 21, p. 975-984, 1997.
- CHEN, Y.; WANG, J.; MA, C.; SHI, G.. Multicriteria performance investigations of a hybrid ground source heat pump system integrated with concentrated photovoltaic thermal solar collectors. **Energy Conversion and Management**, v. 197, p.1-11, 2019.
- CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. **Potencial Solar**, 2022. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acessado em: 14 de Maio de 2022.
- DUARTE, W. M., PAULINO, T. F., TAVARES, S. G., MAIA, A. A., & MACHADO L. Feasibility of solar-geothermal hybrid source heat pump for producing domestic hot water in hot climates. **International Journal of Refrigeration**, v. 124, p. 184-196, 2021.
- EMBRACO. **Model NEK6214Z**. <<https://www.embraco.com/pt/>>. Acessado em 05 de Maio de 2022.

EN 16147 Heat pumps with electrically driven compressors – Testing and requirements for marking of domestic hot water units, EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, Brussels, 2016.

ENGINEERING EQUATION SOLVER. **F-Chart Software**. <<https://fchartsoftware.com/ees/>>. Acessado em 05 de Maio de 2022.

FAN, C.; YAN, G.; YU, J.. Thermodynamic analysis of a modified solar assisted ejector-compression heat pump cycle with zeotropic mixture R290/R600a. **Applied Thermal Engineering**, v. 150, p. 42-49, 2019.

FIASCHI, D.; MANFRIDA, G.; PETELA, Ka.; ROSSI, F.; SINICROPI, A.; TALLURI, Lorenzo. Exergo-economic and environmental analysis of a solar integrated thermo-electric storage. **Energies**, v. 13, n. 3484, p. 1-20, 2020.

FIRMO, N. S. H.. **Secador solar indireto**. 2020. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Industrial) - Instituto Politécnico de Bragança, Portugal, 2020.

FORTES, A. F. C. **Análise termoeconômica e ambiental de um secador por bomba de calor**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2017.

FORTES, A. F. C., Carvalho, M., & da Silva, J. A. (2018). **Environmental impact and cost allocations for a dual product heat pump**. *Energy Conversion and Management*, 173, 763-772.

GNOATTO, E. *et al.* Eficiência de um conjunto fotovoltaico em condições reais de trabalho na região de Cascavel. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 30, n. 2, p. 215-219, 2008.

GOMES, I. A.; MEDEIROS, P. G. P.; GRILO, M. B.. Secador solar de frutas: análise de dois sistemas. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**, 2018.

GOUVEIA, D. S. *et al.* Cinética de feijão preto (*Phaseolus vulgaris*, L.) em secador de bandeja. **HOLOS**, v. 1, p. 38-48, 2011.

GUARINOA, F.; LONGOA, S.; VERMETTE, C. H.; CELLURAA, M.; ROCCAA, V.. Life cycle assessment of solar communities. **Solar Energy**, v. 207, p. 209-217. 2020.

GYIMAH, J. *et al.* Renewable energy consumption and economic growth: New evidence from Ghana. **Energy**, 2022.

HIDALGO, L. F.. **Avaliação de processo em secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico: aplicação para secagem de alimentos**. 2021 Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos - São Carlos, 2021

HUANG, L.; ZHENG, R.; PIONTEK, U.. Installation and operation of a solar cooling and heating system incorporated with air-source heat pumps. **Energies**, v. 12, n. 6, p. 996, 2019.

INDIAMART. **Automatic Heat Pump Food Dryer**. Disponível em:<<https://www.indiamart.com/proddetail/heat-pump-food-dryer-20853720488.html>>. Acessado em: 20 de Maio de 2022.

ITO, S. *et al.* Heat pump using a solar collector with photovoltaic modules on the surface. 1997.

JABARI, F.; IVATLOO, B. M.; RASOULI, M.. Optimal planning of a micro-combined cooling, heating and power system using air-source heat Pumps for Residential Buildings. **Energy Harvesting and Energy Efficiency**, v. 37, p. 423-455, 2017.

JABARI, F.; NOJAVAN, S.; IVATLOO, B. Mohammadi; SHARIFIAN, M.B. Bannae. Optimal short-term scheduling of a novel tri-generation system in the presence of demand response programs and battery storage system. **Energy Conversion and Management**, v. 122, p. 95-108, 2016.

JAMES, A. *et al.* Thermal analysis of heat pump systems using photovoltaic-thermal collectors: a review. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 144, n. 1, p. 1-39, 2021.

JIA, T.; DAI, E.; DAI, Y.. Thermodynamic analysis and optimization of a balanced-type single- stage NH₃-H₂O absorption-resorption heat pump cycle for residential heating application. **Energy**, v. 171, p. 120-134, 2019.

JORDAN, R. A. *et al.* Cinética de secagem de tomate em secador convencional e bomba de calor. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e810998024-e810998024, 2020.

KALOGIROU, S. A. Solar thermal collectors and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, p. 231–295, 2004.

KARUNATHILAKEA, H.; HEWAGEA, K.; BRINKERHOFF, J.; SADIQA, R.. Optimal renewable energy supply choices for net-zero ready buildings: A life cycle thinking approach under uncertainty. **Energy & Buildings**, v. 201, p. 70-89, 2019.

KAUSHIK, C.; SHERIDAN, N. R. Computer modelling and thermodynamic assessment of an aqua-ammonia absorption cycle solar heat pump. **Building and Environment**, vo. 16, n. 3, p. 209-220, 1981.

KEMP, I. C. Fundamentals Of Energy Analysis Of Dryers. *Modern Drying Technology*. V.4, p. 1-46, 2011.

KORONEOS, C.; TSAROUHIS, M. Exergy analysis and life cycle assessment of solar heating and cooling systems in the building environment. **Journal of Cleaner Production**, v. 32, p. 52-60, 2012.

Lazzarin, R. Heat pumps and solar energy: A review with some insights in the future. **International Journal of Refrigeration**, 116, 146-160, 2020.

LEONZIO, G.. Solar systems integrated with absorption heat pumps and thermal energy storages: state of art. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 492-505, 2017.

LI, Z. *et al.* Comparative study on energy efficiency of low GWP refrigerants in domestic refrigerators with capacity modulation. **Energy and Buildings**, v. 192, p. 93-100, 2019.

LIA, H.; BIA, Y.; QINA, L.; ZANGA, G.. Absorption solar-ground source heat pump: Life cycle environmental profile and comparisons. **Geothermics**, v. 87, p. 1-12, 2020.

LYMAN, R. Why renewable energy cannot replace fossil fuels by 2050. **Friends of Science Society**, 2016.

MAHMOUDI, M.; DEGHAN, M.; HAGGOU, H.; RAN, M. K. Techno-economic performance of photovoltaic-powered air conditioning heat pumps with variable-speed and fixed-speed compression systems. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 45, 2021.

MAYER, M. J.; SZILÁGYI, A.; GRÓF, G.. Environmental and economic multi-objective optimization of a household level hybrid renewable energy system by genetic algorithm. **Applied Energy**, v. 269, p. 1-16, 2020.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A.R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, n. 1, 2016.

MEYERS, S.; SCHMITT, B.; VAJEN, K.. The future of low carbon industrial process heat: A comparison between solar thermal and heat pumps. **Solar Energy**, v. 173, p. 893-904, 2018.

MIRANDA, S. A.; SANTOS, K. G. dos. Produção de cebola desidratada em secador solar convectivo de bandeja. **Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação**, v. 5, n. 2, p. 98-111, 2020.

MOHANRAJ, M. *et al.* Research and developments on solar assisted compression heat pump systems—A comprehensive review (Part A: Modeling and modifications). **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 83, p. 90-123, 2018a.

MOHANRAJ, M. *et al.* Research and developments on solar assisted compression heat pump systems—A comprehensive review (Part-B: Applications). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 83, p. 124-155, 2018b.

MORAIS, D. Y. M. N. *et al.* Viabilidade técnica de secador solar no contexto do semiárido brasileiro. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 2, p. 1036-1045, 2019.

MUHAMMAD, H, F.; MAHADO, Md. S. U. R.; MIYAZAKI, T.; KOYAMA, S.; THU, K.. Exergy analysis of serpentine thermosyphon solar water heater. **Applied Sciences**, v. 8, n. 391, 2018.

MUNOZ, I.; PORTILLO, F.; ROSIEK, S.; BATTLES, F. J.; RÍO, J. M.; ACASUSO, I.; PIERGROSSI, V.; SANCTIS, M.; CHIMIENTI, S.; IACONI C.. Prospective environmental and economic assessment of solar assisted thermal energy recovery from wastewater through a sequencing batch biofilter granular reactor. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, p. 1300-1309, 2019.

NGUYEN, M.; RIFFAT, S. B.; WHITMAN, D. Solar/gas-driven absorption heat-pump systems. **Applied Thermal Engineering**, v. 16, n. 4, p. 347-356, 1996.

NOURI, G.; NOOROLLAHI, Y.; YOUSEFI, H.. Solar assisted ground source heat pump systems—A review. **Applied Thermal Engineering**, v. 163, p. 114351, 2019.

OBALANLEGE, M. A.; MAHMOUDI, Y.; DOUGLAS, R.; BAJESTAN, E. E.; DAVIDSON, J.; BAILIE, D.. Performance assessment of a hybrid photovoltaic-thermal and heat pump system for solar heating and electricity. **Renewable Energy**, v. 148, p. 558-572, 2020.

OZTURK, M.. Energy and exergy analysis of a combined ground source heat pump system. **Applied Thermal Engineering**, v. 73, p. 362-370, 2014.

PARADESHI, L.; SRINIVAS, M.; JAYARAJ, S. Thermodynamic analysis of a direct expansion solar-assisted heat pump system working with R290 as a drop-in substitute for R22. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 163, p. 63–78, 2019.

PORNPRAIPECH, P. *et al.* Effect of temperature and shape on drying performance of cassava chips. **Agriculture and Natural Resources**, v. 51, n. 5, p. 402-409, 2017.

RABELO, S. N., PAULINO, T. F., MACHADO, L., & DUARTE, W. M. Economic analysis and design optimization of a direct expansion solar assisted heat pump. **Solar Energy**, v.188, p.164-174, 2019.

RAD, E. A.; MADDAH, S.; MOHAMMADI, S.. Designing and optimizing a novel cogeneration system for an office building based on thermo-economic and environmental analyses. **Renewable Energy**, v. 151, p. 342-354, 2020.

RAMÍREZ-VILLEGAS, R.; ERIKSSON, O.; OLOFSSON, T.. Combined environmental and economic assessment of energy efficiency measures in a multi-dwelling building. **Energies**, v. 12, n. 2484, p. 1-13, 2019.

RAZI, F.; DINCER, I.. A new solar combined cycle integrated with heat pump system. **Applied Thermal Engineering**, v. 173, n. 114784, p. 1-14, 2020.

RIBEIRO, S. A. R S.. **Projeto bomba de calor para a indústria alimentar com recuperação de energia**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal, 2021.

RISTIMÄKI, M.; SÄYNNÄJOKI, A.; HEINONEN, J. H.; JUNNILA, S.. Combining life cycle costing and life cycle assessment for an analysis of a new residential district energy system design. **Energy**, v. 63, p. 168-179, 2013.

RIVA, C.; ROUMPEDAKIS, T. C.; KALLIS, G.; ROCCO, M. V.; KARELLAS, S.. Life cycle analysis of a photovoltaic driven reversible heat pump. **Energy & Buildings**, v. 240, p. 1-17, 2021.

RUHNAU, O.; HIRTH, L.; PRAKTIKNJO, A.. Time series of heat demand and heat pump efficiency for energy system modeling. **Scientific data**, v. 6, n. 1, p. 1-10, 2019.

SALEHI, F. Recent applications of heat pump dryer for drying of fruit crops: A review. **International Journal of Fruit Science**, v. 21, n. 1, p. 546-555, 2021.

SANTANA, V. L.. **Desenvolvimento de um sistema de secagem para beneficiamento de caulim usando energia solar**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2022.

SCHOENEBERGER, C. A., MCMILLAN, C. A., KURUP, P., AKAR, S., MARGOLIS, R., & MASANET, E. Solar for industrial process heat: A review of technologies, analysis approaches, and potential applications in the United States. **Energy**, v. 206, p. 118083, 2020.

SCHRAM, W.; LOUWEN A.; LAMPROPOULOS, I.; SARK, W.. Comparison of the greenhouse gas emission reduction potential of energy communities. **Energies**, v. 12, n.4440, p. 1-23, 2019.

SHWARTS, I.; SHITZER, A. Solar absorption system for space cooling and heating. **Ashrae Journal**, p. 51-54, 1977.

SILVA, M. B.. Avaliação de um secador solar em diferentes condições climáticas e meteorológicas. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 1, p. e15411124405-e15411124405, 2022.

SINGH, N. J.; PANDEY, R. K. Convective air drying characteristics of sweet potato cube (*Ipomoea batatas* L.). **Food and Bioproducts Processing**, v. 90, n. 2, p. 317-322, 2012.

SIQUEIRA, M. B. B.; LIMA, Ariane Martins Caponi; JUNIOR, Antonio Brasil. Balanço térmico de painel fotovoltaico: um estudo experimental In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018**. 2020.

SÖZEN, A.; ALTIPARMAK, D.; USTA, H.. Development and testing of a prototype of absorption heat pump system operated by solar energy. **Applied Thermal Engineering**, v. 22, p. 1847-1859, 2002.

STAFFELL, I., BRETT, D., BRANDOM, N. & HAWKES, A. A review of domestic heat pumps. **Energy & Environmental science**. 2012, p. 9291-9306, 2012.

STARKE, A. R. *et al.* Thermal analysis of solar-assisted heat pumps for swimming pool heating. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 39, n. 6, p. 2289-2306, 2017.

TAGLIAFICO, L. A.; SCARPA, F.; VALSUANI, F.. Direct expansion solar assisted heat pumps e A clean steady state approach for overall performance analysis. **Applied Thermal Engineering**, v. 66, P. 216-226, 2014.

TURCONI, R., BOLDRIN, A., & ASTRUP, T. (2013). Life Cycle Assesmente (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 2013, p. 555-565.

U.S., D. E. **Appliance and equipment standards rulemaking and notices**. Disponível em:<https://www1.eere.energy.gov/buildings/appliance_standards/standards.aspx?productid=32>. Acessado em: 22 de Maio de 2022.

ÜNAL, F.; TEMIR, G.; KÖTEN, H.. Energy, exergy and exergoeconomic analysis of solar-assisted vertical ground source heat pump system for heating season. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 32, n. 8, p. 929-942, 2018.

UTLU, Z.; AYDIN, D.; KINCAY, O.. Comprehensive thermodynamic analysis of a renewable energy sourced hybrid heating system combined with latent heat storage. **Energy Conversion and Management**, v. 84, p. 311-325, 2014.

VEERAMANIPRIYA, E.; SUNDARI, A. U. Performance evaluation of hybrid photovoltaic thermal (PVT) solar dryer for drying of cassava. **Solar Energy**, v. 215, p. 240-251, 2021.

WALLERAND, A. S. *et al.* Optimal heat pump integration in industrial processes. **Applied Energy**, v. 219, p. 68-92, 2018.

WANG, C.; GONG, G.; SU, H.; WAH, C.. Efficacy of integrated photovoltaics-air source heat pump systems for application in Central-south China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 1190-1197, 2015.

- WANG, J. *et al.* Economic benefits of integrating solar-powered heat pumps into a CHP system. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 9, n. 4, p. 1702-1712, 2018.
- WANG, X., XIA, L., BALES, C., ZHANG, X., COPERTARO, B., PAN, S. & WU, J. (2019). A sistematic review of recent air source heat pump (ASHP) systems assisted by solar thermal, photovoltaic and photovoltaic/thermal sources. **Renewable Energy**. 2019, p. 2472–2487.
- YAN, G.; BAI, T.; YU, J.. Energy and exergy efficiency analysis of solar driven ejector–compressor heat pump cycle. **Solar Energy**, v. 125, p. 243-255, 2016.
- YILMAZ, F.; OZTURK, M.; SELBAS, R.. Energy and exergy performance assessment of a novel solar-based integrated system with hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 34, p. 18732-18743, 2019.
- YOUSEFI, M.; MORADALI, M.. Thermodynamic analysis of a direct expansion solar assisted heat pump water heater. **Journal of Energy in Southern Africa**, v. 26, n.3, p. 110–122, 2015.
- YUSUF, A. M.; ABUBAKAR, A. B.; MAMMAN, S. O. Relationship between greenhouse gas emission, energy consumption, and economic growth: evidence from some selected oil-producing African countries. *Environmental Science and Pollution Research*, **Springer**, 2020.