



**UEPB**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CAMPUS I - CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM BACHARELADO ENGENHARIA SANITÁRIA E  
AMBIENTAL**

**RUTH PEREIRA FERNANDES**

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UM SECADOR SOLAR MISTO PARA A  
PRODUÇÃO DE FERTILIZANTE ORGÂNICO A PARTIR DE LODO DE ESGOTO**

**CAMPINA GRANDE  
2025**

RUTH PEREIRA FERNANDES

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UM SECADOR SOLAR MISTO PARA A  
PRODUÇÃO DE FERTILIZANTE ORGÂNICO A PARTIR DE LODO DE ESGOTO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Coordenação do Curso de  
Engenharia Sanitária e Ambiental da  
Universidade Estadual da Paraíba, como  
requisito parcial à obtenção do título de  
Bacharela em Engenharia Sanitária e  
Ambiental

**Orientador(a):** Prof. Dr. Márcia Ramos Luiz

**Coorientador(a):** Prof. Dr. Ivonete Batista dos Santos

**CAMPINA GRANDE  
2025**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto em versão impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que, na reprodução, figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

F363m Fernandes, Ruth Pereira.

Modelagem computacional de um secador solar misto para a produção de fertilizante orgânico a partir de lodo de esgoto [manuscrito] / Ruth Pereira Fernandes. - 2025.

43 f. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia sanitária e ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2025.

"Orientação : Prof. Dra. Marcia Ramos Luiz, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT".

"Coorientação: Prof. Dra. Ivonete Batista dos Santos, Departamento de Física - CCT".

1. Lodo de esgoto. 2. Simulação computacional. 3. Secador solar. 4. Fertilizante orgânico. I. Título

21. ed. CDD 628

RUTH PEREIRA FERNANDES

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UM SECADOR SOLAR MISTO PARA A PRODUÇÃO DE FERTILIZANTE ORGÂNICO A PARTIR DE LODO DE ESGOTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharela em Engenharia Sanitária e Ambiental

Aprovada em: 06/06/2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado eletronicamente por:

- **Marcia Ramos Luiz** (\*\*\*.975.784-\*\*), em **01/07/2025 21:03:15** com chave **f38054ee56d711f0ac361a7cc27eb1f9**.
- **Fernando Fernandes Vieira** (\*\*\*.840.164-\*\*), em **01/07/2025 21:04:14** com chave **16bee0b056d811f0ba2d1a7cc27eb1f9**.
- **Daniel Epifanio Bezerra** (\*\*\*.665.154-\*\*), em **02/07/2025 09:11:16** com chave **a7cd8bd2573d11f0925e06adb0a3afce**.
- **Morgana de Vasconcellos Araújo** (\*\*\*.601.564-\*\*), em **05/07/2025 09:20:05** com chave **61e79f4a599a11f0ac472618257239a1**.

Documento emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse [https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar\\_documento/](https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar_documento/) e informe os dados a seguir.

**Tipo de Documento:** Folha de Aprovação do Projeto Final

**Data da Emissão:** 08/07/2025

**Código de Autenticação:** 5d8275



A Deus, porque Dele e por Ele são todas as coisas A minha mãe, pela força, determinação e apoio, DEDICO.

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe, por ser pai e mãe ao mesmo tempo, pela confiança, força, dedicação e por sempre acreditar em mim.

À Edson Filho, meu namorado, pelo apoio constante, paciência e incentivo ao longo de toda essa jornada.

Às minhas irmãs e sobrinhos, pela presença acolhedora e por me trazerem alegria nos momentos difíceis.

Ao meu irmão de coração, José Douglas, por me acompanhar de perto durante a graduação e por todos os momentos vividos juntos.

Aos amigos Robson, Viníciu e Samuel, pela parceria no dia a dia, pelos risos compartilhados e pelos momentos de descontração.

À professora Márcia Ramos Luiz, pelas orientações, pelas leituras indicadas e por sua dedicação ao meu processo de formação.

Aos professores do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, em especial Ysa Helena Diniz Moraes de Luna, Fernando Fernandes Vieira, Ivonete Batista dos Santos e Daniel Epifanio Bezerra por suas contribuições e por serem fontes de inspiração.

Aos professores Morgana de Vasconcellos Araújo e Gilson Barbosa de Lima pela ajuda e disponibilidade da licença do *software Ansys*.

A todos, o meu sincero agradecimento.

## RESUMO

O lodo doméstico é uma substância rica em nutrientes essenciais, o que o torna potencialmente valioso para uso na agricultura como fertilizante orgânico. Seu reaproveitamento promove práticas mais sustentáveis contribuindo para a redução da dependência de fertilizantes sintéticos. No entanto, devido ao seu alto teor de umidade, o lodo de esgoto requer tratamentos prévios antes de ser aproveitado de forma segura e eficiente. Dentre as alternativas disponíveis, a secagem solar se destaca por ser de simples operação e por causar menor impacto ambiental quando comparada a outros métodos. Diante disso, este trabalho teve como objetivo analisar o processo de secagem solar do lodo por meio da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), com ênfase no uso de secadores do tipo misto, que combinam os princípios das tecnologias direta e indireta. Para isso, foi utilizada a plataforma ANSYS Inc.® (versão 2021), estruturando o estudo em três etapas principais: pré-processamento, processamento e pós-processamento. As simulações indicaram que, sob um fluxo de calor de  $1000 \text{ W/m}^2$ , a temperatura interna máxima alcançou  $362,4 \text{ K}$ , com velocidade do ar de  $0,45 \text{ m/s}$ , evidenciando o elevado potencial do protótipo. Também foram testadas condições com fluxos de calor de  $150$ ,  $250$ ,  $350$  e  $450 \text{ W/m}^2$ , resultando em temperaturas máximas de  $311,4 \text{ K}$ ,  $320,3 \text{ K}$ ,  $329,1 \text{ K}$  e  $338,8 \text{ K}$ , respectivamente. O modelo do secador solar proposto mostrou-se capaz de atender aos critérios de temperatura necessários para a utilização do lodo de esgoto seco como fertilizante orgânico, segundo a resolução nº 498/2020 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).

**Palavras-Chave:** lodo de esgoto; simulação computacional; desidratação; secador solar.

## ABSTRACT

Domestic sludge is a substance rich in essential nutrients, which makes it potentially valuable for use in agriculture as an organic fertilizer. Its reuse promotes more sustainable practices, helping to reduce dependence on synthetic fertilizers. However, due to its high moisture content, sewage sludge requires prior treatment before it can be used safely and efficiently. Among the alternatives available, solar drying stands out because it is simple to operate and has a lower environmental impact compared to other methods. In view of this, the aim of this study was to optimize the solar sludge drying process using Computational Fluid Dynamics (CFD), with emphasis on the use of mixed-type dryers, which combine the principles of direct and indirect Technologies. To do this, the ANSYS Inc.® platform (version 2021) was used, structuring the study into three main stages: pre-processing, processing and post-processing. The simulations showed that, under a heat flow of  $1000 \text{ W/m}^2$ , the maximum internal temperature reached  $362.4 \text{ K}$ , with an air speed of  $0.45 \text{ m/s}$ , demonstrating the high potential of the prototype. Conditions were also tested with heat fluxes of  $150$ ,  $250$ ,  $350$  and  $450 \text{ W/m}^2$ , resulting in maximum temperatures of  $311.4 \text{ K}$ ,  $320.3 \text{ K}$ ,  $329.1 \text{ K}$  and  $338.8 \text{ K}$ , respectively. The solar dryer model proposed proved capable of meeting the temperature criteria required for using sewage Sludge dry as an organic fertilizer, in accordance with resolution no. 498/2020 of the National Council of the Environment (CONAMA).

**Keywords:** sewage sludge; computer simulation; dehydration; solar dryer.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Características microbiológicas do lodo. ....	17
<b>Figura 2</b> - Secador solar direto do tipo estufa. ....	20
<b>Figura 3</b> - Diagrama esquemático de um secador solar indireto. ....	21
<b>Figura 4</b> - Diagrama esquemático de secadores solares mistos. ....	21
<b>Figura 5</b> - Secadores solares híbridos. ....	22
<b>Figura 6</b> - Estrutura da abordagem CFD proposta. ....	27
<b>Figura 7</b> - Secador solar misto. ....	28
<b>Figura 8</b> - Malha refinada do secador solar misto. ....	29
<b>Figura 9</b> - Condições de contorno do secador solar misto. ....	30
<b>Figura 10</b> - Distribuição de temperatura no secador solar sob fluxo de calor de 1000 W/m <sup>2</sup> . ....	32
<b>Figura 11</b> - Velocidade do fluido no secador. ....	35
<b>Figura 12</b> - Distribuição de temperatura no secador solar para diferentes fluxos de calor. ....	36

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Produção de lodo em sistemas aeróbios e anaeróbios de tratamento de lodo. ....	15
<b>Tabela 2</b> - Processos para obtenção de biossólido Classe A. ....	24
<b>Tabela 3</b> - Processos para obtenção de biossólido Classe B. ....	25
<b>Tabela 4</b> - Condições de contorno utilizadas. ....	30
<b>Tabela 5</b> - Resultados de temperatura obtidos para o fluxo de calor de $1000 \text{ W/m}^2$ . ....	33
<b>Tabela 6</b> - Valores de temperatura para diferentes fluxos de calor. ....	35
<b>Tabela 7</b> - Valores Encontrados na Literatura para Diferentes Condições de Fluxo de Calor. ....	37

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
<b>3.1</b>	<b>Lodo de estações de tratamento de esgoto</b> .....	<b>14</b>
3.1.1	Características físico-químicas do lodo .....	15
3.1.2	Características Biológicas do lodo .....	16
3.1.3	Contaminantes do lodo .....	17
<b>3.2</b>	<b>Tratamento do lodo</b> .....	<b>17</b>
3.2.1	Secagem do lodo .....	18
3.2.1.1	Secador solar .....	19
3.2.2	Destinação final .....	22
<b>3.3</b>	<b>Legislação atual para a aplicação de biossólido em solos</b> .....	<b>23</b>
<b>3.4</b>	<b>Modelagem computacional da secagem solar de lodo de ETE</b> .....	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>27</b>
<b>4.1</b>	<b>Geometria e domínio de fluxo</b> .....	<b>28</b>
<b>4.2</b>	<b>Geração da malha</b> .....	<b>28</b>
<b>4.3</b>	<b>Propriedades do fluido e condições de contorno</b> .....	<b>29</b>
<b>4.4</b>	<b>Simulação e modelagem matemática</b> .....	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>32</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>38</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>39</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado da população mundial tem impulsionado a urbanização e, conseqüentemente, o aumento na geração de esgoto urbano. Esse cenário tem acarretado um aumento no número de Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs), resultando em uma produção crescente de lodo doméstico. O tratamento e descarte desse resíduo representam um grande desafio ambiental e uma preocupação global, demandando soluções eficazes e sustentáveis.

O lodo é um material poroso com uma microestrutura complexa, constituído por uma matriz heterogênea de água, substâncias minerais e orgânicas, além de proteínas e microrganismos, os quais influenciam diretamente suas propriedades físico-químicas e seu comportamento durante o tratamento e a disposição final (Ling et al., 2022).

Quando não gerenciado adequadamente, esse resíduo pode representar sérios riscos à saúde humana e ao meio ambiente, contaminando o solo, a água e o ar, devido à presença de patógenos, metais pesados e compostos orgânicos (Li et al., 2025).

Segundo Gomes (2023), o gerenciamento do lodo envolve etapas como o adensamento, que visa reduzir seu volume por meio da remoção parcial da umidade, facilitando o manuseio. A estabilização, que tem como objetivo eliminar odores e patógenos. O desaguamento, que também reduz a umidade, contribuindo para a facilidade de transporte. E a secagem, etapa crucial antes da disposição final, que remove uma quantidade significativa de água, permitindo alcançar teores de Sólidos Totais (ST) superiores a 90%, sendo mais eficiente do que o adensamento e o desaguamento.

Após o processo de secagem, o lodo pode ser classificado como biossólido, desde que atenda aos requisitos sanitários e ambientais estabelecidos, devido ao seu potencial uso como fertilizante orgânico.

Nas ETEs, a secagem do lodo é tradicionalmente realizada ao ar livre. No entanto, esse método apresenta desafios significativos, como a necessidade de grandes áreas, o longo tempo de secagem e a dificuldade no controle do processo, o que pode comprometer a eficiência operacional em larga escala. Uma alternativa promissora para superar essas limitações é a utilização de secadores solares, que aproveitam a energia do sol para acelerar a remoção da umidade, expondo o produto

em uma estufa, tornando o processo mais sustentável, eficiente e economicamente viável (Othman et al., 2022).

O processo de secagem solar tende a ser mais eficiente devido à influência de fatores como a distribuição do tamanho das partículas de lodo. Durante a secagem solar, uma quantidade considerável de água evapora sob altas temperaturas, promovendo uma redução significativa do volume do lodo. Essa diminuição não apenas facilita o manuseio e o transporte, mas também contribui para a mitigação dos desafios relacionados à alta geração desse resíduo, tornando-o mais adequado para possíveis aplicações (Guo et al., 2021).

De acordo com Benhamza et al. (2021), a secagem solar pode ser realizada de três formas: direta, indireta e mista. Na secagem direta, os produtos são expostos ao sol em ambientes abertos, o que exige grandes áreas e longos períodos de tempo, além de torná-los suscetíveis às intempéries e à contaminação por microrganismos. Esse método pode empregar superfícies transparentes para permitir a incidência dos raios solares sobre os materiais, mas ainda assim demanda um tempo prolongado para a completa desidratação.

Já a secagem solar indireta é mais rápida, pois o fluido é aquecido e direcionado para a câmara de secagem, mantendo os produtos protegidos da radiação solar direta. E os secadores mistos combinam as vantagens dos métodos direto e indireto, o que resulta em um processo de secagem mais eficiente.

Hooge et al. (2023) relataram que após a secagem, o lodo segue para a disposição final, que normalmente são aterros sanitários, ocupando grandes áreas e gerando chorume como subproduto. A aplicação na agricultura surge como uma solução sustentável, especialmente diante do atual desequilíbrio de nutrientes nos sistemas agrícolas. A recirculação desses nutrientes por meio da aplicação de lodo no solo pode ajudar a reequilibrar promovendo a devolução dos elementos essenciais às áreas agrícolas e reduzindo a dependência de fertilizantes sintéticos.

Prenafeta-Boldú et al. (2020) propuseram um secador solar de estufa de convecção forçada capaz de estabilizar o lodo de esgoto de uma vinícola na Espanha, e o material seco atendeu aos parâmetros de qualidade para fertilizantes orgânicos.

Galliou et al. (2018) obtiveram um biossólido rico em potássio após o processo de secagem, resultando em um fertilizante orgânico rico em nutrientes e com baixo teor de fenóis, em uma ilha na Grécia. Esses exemplos evidenciam o potencial da

secagem solar não apenas como uma solução para a redução do volume do lodo, mas também como uma alternativa sustentável para a produção de fertilizantes orgânicos de alta qualidade.

Embora a secagem do lodo seja de grande relevância, esse processo é complexo e depende de múltiplos fatores, como a transferência de calor e o fluxo de ar, entre outros parâmetros.

Khanlari et al. (2020a) utilizaram a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), devido à sua capacidade de analisar esses parâmetros de forma detalhada, para avaliar um secador solar misto na secagem de lodo. Os resultados demonstraram que o processo permite a redução significativa da umidade do lodo, viabilizando seu uso seguro como fertilizante e para produção de energia. Essa abordagem evidencia o potencial da CFD na otimização de processos de secagem, permitindo a análise precisa das condições operacionais e contribuindo para a melhoria da eficiência e dos resultados do processo.

A análise CFD é uma ferramenta numérica amplamente utilizada para simular sistemas térmicos e fluidodinâmicos, possibilitando uma investigação detalhada do comportamento do ar, da dissipação de calor e da evaporação da umidade (Afshari et al., 2021). Com o CFD, é possível identificar os parâmetros ideais para maximizar a eficiência energética e reduzir o tempo de secagem. Além disso, permite a avaliação de diferentes configurações de secadores, o que favorece o desenvolvimento de sistemas mais sustentáveis e economicamente viáveis.

Com base nessas considerações, o intuito deste estudo é otimizar o processo de secagem por meio do CFD, não apenas aprimorando a eficiência do processo, mas também garantindo que o sólido final atenda aos requisitos de qualidade necessários para ser utilizado como fertilizante orgânico.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Propor uma configuração de secador solar misto para a secagem de lodo de esgoto, visando sua utilização como fertilizante orgânico.

### **2.1 Objetivos específicos**

- Realizar a modelagem e a simulação numérica do processo de secagem.
- Analisar o comportamento do fluxo de ar e das temperaturas no secador solar.
- Determinar se o secador solar atinge os requisitos de temperatura exigidos para ser utilizado para a produção de fertilizante orgânico.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Esta revisão foi estruturada em quatro partes principais. A primeira aborda a produção de lodo nas estações de tratamento de esgoto, detalhando suas características físicas, químicas e biológicas, bem como os contaminantes presentes. A segunda parte foca nos processos de tratamento do lodo, explorando as diferentes tecnologias e estratégias utilizadas. A terceira parte aborda a legislação brasileira vigente para a aplicação de bio-sólidos e a quarta examina a utilização da análise numérica no estudo da secagem de lodo, destacando a importância dessa abordagem para otimizar os processos e melhorar a eficiência na gestão do lodo.

#### **3.1 Lodo de estações de tratamento de esgoto**

As Estações de Tratamento de Esgoto geram lodo como subproduto, e sua produção tem aumentado significativamente devido ao crescimento populacional global e ao desenvolvimento industrial. O lodo é composto por uma mistura complexa de água, matéria orgânica e inorgânica, cuja composição varia conforme as características do esgoto tratado e o processo de tratamento utilizado (NIKUNA et al., 2024).

A etapa inicial das ETEs é o pré-tratamento, que consiste na remoção de sólidos grosseiros por meio do gradeamento e da separação de areia, com o objetivo de proteger os equipamentos e melhorar a eficiência das etapas subsequentes. Após essa fase, a água residual passa por processos físicos de separação para reduzir a quantidade de sólidos suspensos e sedimentáveis.

Posteriormente, ocorre o tratamento secundário, que compreende processos biológicos destinados à remoção da matéria orgânica e de nutrientes, no qual microrganismos utilizam a matéria orgânica como fonte de energia para sua sobrevivência e reprodução, promovendo a degradação da carga orgânica e melhorando a qualidade final do efluente (Emmanouil, Giannakis, Kyzas, 2024). O processo pode ser anaeróbio, quando ocorre na ausência de oxigênio, ou aeróbio, quando há presença de oxigênio. Durante esses processos, a biomassa microbiana cresce e se acumula, formando um sólido denominado lodo, que é separado do efluente para tratamento posterior.

De acordo com Von Sperling e Gonçalves (2007), a classificação do lodo de ETEs é realizada com base na fase do tratamento em que é gerado:

- Lodo primário: proveniente do tratamento físico-químico inicial.
- Lodo secundário: originado no tratamento biológico.
- Lodo misto: resultante da combinação dos dois anteriores.

A quantidade gerada e as características do lodo variam de acordo com as propriedades do afluente e a tecnologia utilizada no processo de tratamento, como pode ser verificado na Tabela 1.

**Tabela 1** - Produção de lodo em sistemas aeróbios e anaeróbios de tratamento de lodo.

Tipo de tratamento	Características do Lodo Produzido			
	kgSS/ kgDQO aplicado	Sólidos Totais (%)	Massa de lodo (gSS/hab.dia)	Volume de lodo (L/hab.dia)
Fossa séptica	0,20-0,30	3-6	20-30	0,3-1,0
Lagoa facultativa	0,12-0,32	5-15	12-32	0,1-0,25
Lagoa anaeróbia- lagoa facultativa	0,26-0,55	-	26-55	0,15-0,45
Lagoa aerada facultativa	0,08-0,13	6-10	8-13	0,08-0,22
Fossa séptica + filtro anaeróbico	0,27-0,39	1,4-5,4	27-39	0,5-2,8
Lodo ativado convencional	0,60-0,80	1-2	60-80	3,1-8,2
Lodos Ativados (aeração prolongada)	0,50-0,55	0,8-1,2	40-45	3,3-5,6
Filtro biológico (baixa carga)	0,55-0,75	1,5-4,0	55-75	1,4-5,2
Filtro biológico (alta carga)	0,60-0,80	1-2	60-80	3,1-8,2
Reator UASB	0,12-0,18	3-6	12-18	0,2-0,6
UASB + pós-tratamento aeróbico	0,20-0,32	3-4	20-32	0,5-1,1

Fonte: Adaptada de Von Sperling; Gonçalves, 2007.

De acordo com a tabela, o processo que gera maior volume de lodo é o de lodo ativado e filtro biológico de alta carga, enquanto os processos que resultam em menor volume de lodo são a lagoa facultativa e o UASB (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente).

### 3.1.1 Características físico-químicas do lodo

Normalmente, o lodo de esgoto possui alto teor de matéria orgânica, incluindo resíduos humanos, restos de alimentos e outras substâncias presentes nas águas residuais. Quando ainda não está seco, apresenta elevada umidade, contendo grande quantidade de água livre e intersticial.

Suas propriedades físico-químicas são altamente variáveis e dependem de fatores como a origem do esgoto, a técnica de tratamento aplicada, a reutilização de água, as condições ambientais, o estágio de tratamento, as mudanças climáticas e as condições de armazenamento. Mesmo quando produzido pela mesma estação de tratamento, o lodo pode apresentar características diferentes ao longo dos dias, refletindo as variações nas cargas poluentes afluentes e nas condições operacionais (Giwa et al., 2023).

Os principais componentes do lodo são nitrogênio, fósforo e potássio que podem ser reincorporados via solo em grandes ciclos geoquímicos, utilizando seu potencial fertilizante. Esses elementos representam seu potencial como fonte de nutrientes (Raclavsk et al., 2023).

Além disso, o lodo contém sólidos totais, divididos em sólidos voláteis, relacionados à fração orgânica, e sólidos fixos, que correspondem à fração mineral. A alcalinidade e o pH também são parâmetros fundamentais, pois influenciam a estabilidade, o tratamento e a disposição final do lodo.

### 3.1.2 Características Biológicas do lodo

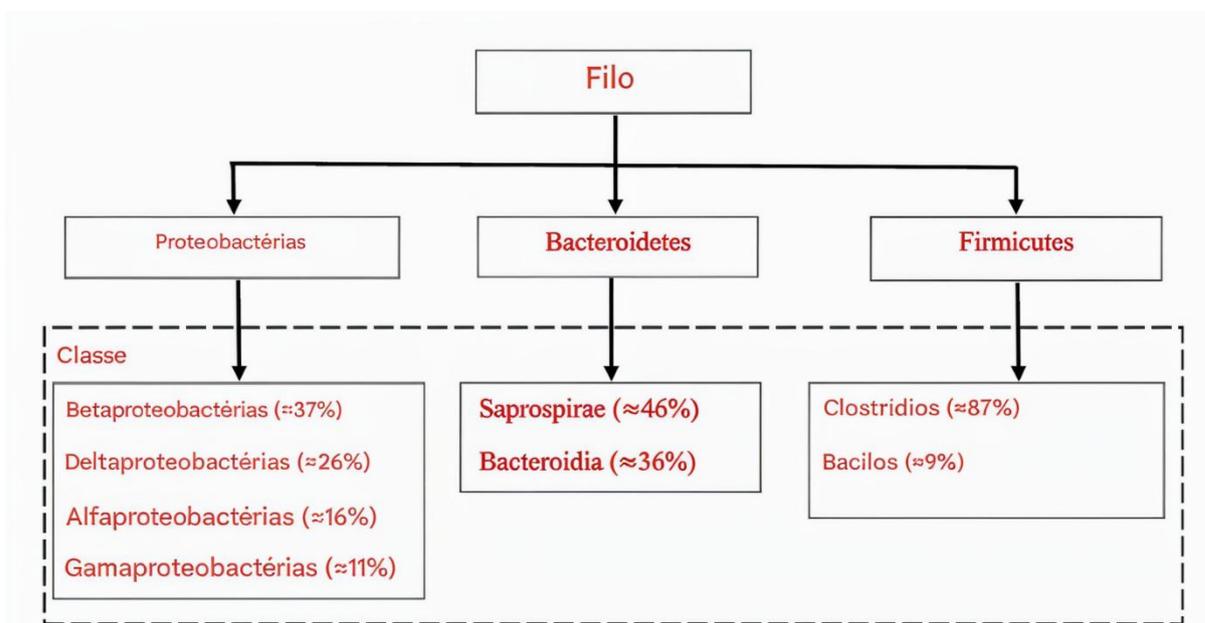
O lodo pode conter organismos patogênicos, como helmintos, protozoários, fungos, vírus e bactérias, que podem ser originados tanto de fontes humanas quanto animais. A quantidade de patógenos varia conforme fatores como o nível socioeconômico, condições de saneamento, região geográfica, presença de agroindústrias e tipo de tratamento de lodo. (Silva; Fernandes; Morita, 2007). Esses fatores influenciam os riscos à saúde humana e animal, tornando essencial o controle adequado do lodo gerado nas ETEs.

Giwa et al. (2023) relataram que o lodo de ETEs apresenta alta concentração de bactérias, desempenhando um papel crucial nos processos biológicos de tratamento. Os filos bacterianos mais abundantes são *Proteobacteria*, *Bacteroidetes* e *Firmicutes*, que contribuem significativamente para a digestão anaeróbica (Figura 1) especialmente encontrados na microbiota intestinal humana.

As *Proteobacteria* ajudam na degradação de compostos como propionato, glicose e acetato. Os *Firmicutes*, por sua vez, fermentam ácidos graxos voláteis, enquanto os *Bacteroidetes* participam da hidrólise de matéria orgânica, contribuindo

para a produção de hidrogênio, dióxido de carbono e ácidos orgânicos (Giwa et al., 2023).

**Figura 1** - Características microbiológicas do lodo.



Fonte: Adaptada de Giwa et al., 2023

### 3.1.3 Contaminantes do lodo

O lodo de esgoto pode conter metais pesados como Níquel (Ni), Chumbo (Pb), Cromo (Cr), Zinco (Zn), além de uma variedade de poluentes perigosos, incluindo desreguladores endócrinos, inseticidas, produtos farmacêuticos e produtos de higiene pessoal. Os níveis elevados de íons de metais pesados, como Cobre (Cu) e Zinco (Zn), são especialmente preocupantes, pois podem contaminar o solo e a água, apresentando riscos para a saúde humana e os ecossistemas, caso o lodo seja inadequadamente tratado ou descartado (Elgarahy et al., 2024).

Os metais nas águas residuais provêm principalmente de descargas industriais, como galvanoplastia, indústrias químicas (orgânicas e farmacêuticas), fundições, refinação de petróleo e fabricação de corantes. Esses metais pesados acabam presentes no lodo gerado nas estações de tratamento, aumentando a complexidade do processo de gestão e descarte do resíduo (Silva et al., 2007).

## 3.2 Tratamento do lodo

A gestão inadequada do lodo de esgoto pode causar impactos ambientais e à saúde pública. O tratamento sustentável do lodo tem ganhado destaque com o

desenvolvimento de tecnologias inovadoras, como processos termoquímicos e secagem solar, que visam reduzir o volume e a carga poluente (Wang et al. 2022).

De acordo com Von Sperlin (1996), alguns sistemas de tratamento de águas residuais apresentam particularidades quanto à frequência e necessidade de remoção do lodo gerado:

Determinados sistemas de tratamento têm a retirada do lodo apenas eventual. Nestes casos, o lodo já sai usualmente estabilizado, requerendo apenas a sua disposição final. Tal é o caso, por exemplo, dos sistemas de tratamento anaeróbio. Em outros sistemas, como o de lagoas facultativas, o lodo usualmente permanece retido no sistema durante todo o horizonte de operação, não necessitando ser removido e tratado (Von Sperling, 1996, v. 2, p. 208).

Diferentes processos de tratamento podem modificar as propriedades físicas e químicas dos sólidos de esgoto bruto. As principais etapas incluem o adensamento, responsável pela redução do volume, seguido da estabilização, que promove a remoção de sólidos voláteis (Le; Price, 2024).

O condicionamento, etapa fundamental para a preparação do lodo para a desidratação, desempenha papel essencial para o sucesso dessa operação (Wang et al., 2022). A desidratação, por sua vez, tem como objetivo a remoção do volume de água, facilitando o manejo e transporte. Por fim, ocorre a disposição final dos subprodutos, etapa que demanda critérios ambientais rigorosos para minimizar os impactos ambientais.

Dentre os processos de desidratação, destaca-se a secagem do lodo, por ser um método eficiente na redução do teor de umidade e volume.

### 3.2.1 Secagem do lodo

A secagem representa uma alternativa promissora para a redução do volume e do teor de umidade do lodo, possibilitando a concentração e retenção de seus nutrientes. Esse processo resulta na produção de um produto com alto valor nutricional, que pode ser aproveitado como insumo comercializável, ampliando as possibilidades de aproveitamento sustentável do lodo (Patil; Sharara, 2025).

Entre as principais vantagens desse processo destacam-se a significativa redução do volume do lodo, a diminuição dos custos de transporte e armazenamento, além da geração de um produto estabilizado, facilitando seu manuseio e estocagem. A secagem também resulta na eliminação de patógenos, contribuindo para a

segurança sanitária do material. Além disso, o lodo seco apresenta maior facilidade para a disposição final (Von Sperling; Gonçalves; Ludovice, 2007).

De acordo com Krawczyk (2016), o processamento de lodo constitui um dos maiores custos operacionais em uma ETE. A secagem, frequentemente realizada de forma mecanizada, enfrenta desafios devido às características físico-químicas específicas do lodo, que, mesmo após a desidratação mecânica, ainda retém mais de 70% de água em peso.

Esse elevado teor de umidade gera dificuldades no manuseio, principalmente no transporte e armazenamento do material. Nesse contexto, os secadores solares se apresentam como uma alternativa simples e econômica para reduzir o peso do lodo.

#### 3.2.1.1 Secador solar

De acordo com Ezzariai et al. (2022), a secagem solar é uma das alternativas viáveis para o gerenciamento de lodo de esgoto e pode ser considerada uma tecnologia sustentável, principalmente devido ao seu baixo custo. Esse processo não só contribui para a diminuição do volume de resíduos, mas também promove uma solução ambientalmente amigável e de baixo impacto econômico.

O mesmo autor utilizou um secador de estufa em escala piloto, construído em policarbonato, para realizar a secagem do lodo coletado em uma ETE. O lodo foi amostrado durante o estágio de desidratação, após passar por filtros de correia, apresentando um teor médio de matéria seca de 30%. Em seguida, foi diretamente submetido ao processo de secagem solar. O estudo também investigou a remoção de algumas moléculas de antibióticos e hidrocarbonetos presentes no lodo, avaliando o impacto da secagem solar na diminuição desses contaminantes.

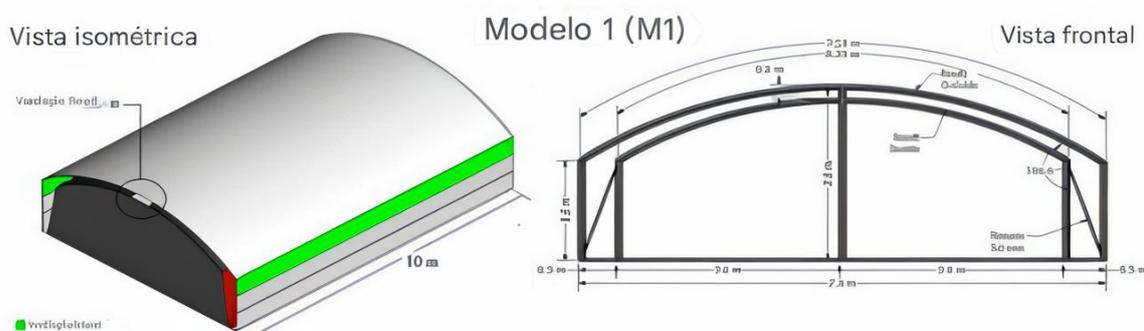
Khanlari et al. (2020b) utilizaram um secador solar para a secagem de lodo de esgoto municipal, com o objetivo de transformar esse resíduo em material reutilizável para aplicações industriais. Foram testadas duas configurações, que incluíam aquecedores de ar de passagem tripla e passagem quádrupla, ambos com ranhura em V, acoplados a duas câmaras de secagem cilíndricas diferentes. Os resultados demonstraram que a câmara de secagem absorvedora, equipada com energia solar, teve um efeito positivo significativo tanto na eficiência do processo de secagem quanto no desempenho térmico do sistema, otimizando a redução do teor de umidade do lodo.

Afshari et al. (2021) projetaram um sistema de secagem em túnel para o tratamento de lodo doméstico. Foram realizadas análises experimentais e de modelagem matemática. Foram fabricados secadores de túnel com duas geometrias distintas, com o objetivo de desenvolver secadores sustentáveis assistidos por energia solar. Os secadores modelados incluíram: o túnel retangular, o túnel *quonset* e o túnel *quonset* com aletas. A análise numérica permitiu avaliar o desempenho térmico e a eficiência de cada configuração, visando otimizar o processo de secagem assistido por energia solar.

Os secadores solares podem ser classificados em quatro categorias principais: direto, indireto, misto e híbrido. Cada tipo apresenta características distintas quanto à forma de aproveitamento da energia solar e à aplicação prática no processo de secagem. A escolha do tipo de secador deve considerar fatores como eficiência energética, custo de implantação e operação, além da confiabilidade do sistema frente às variações climáticas (Behera; Mohanty; Mohanty, 2022).

O secador direto (Figura 2) expõe o material diretamente à radiação solar, utilizando estruturas transparentes que permitem a passagem da luz.

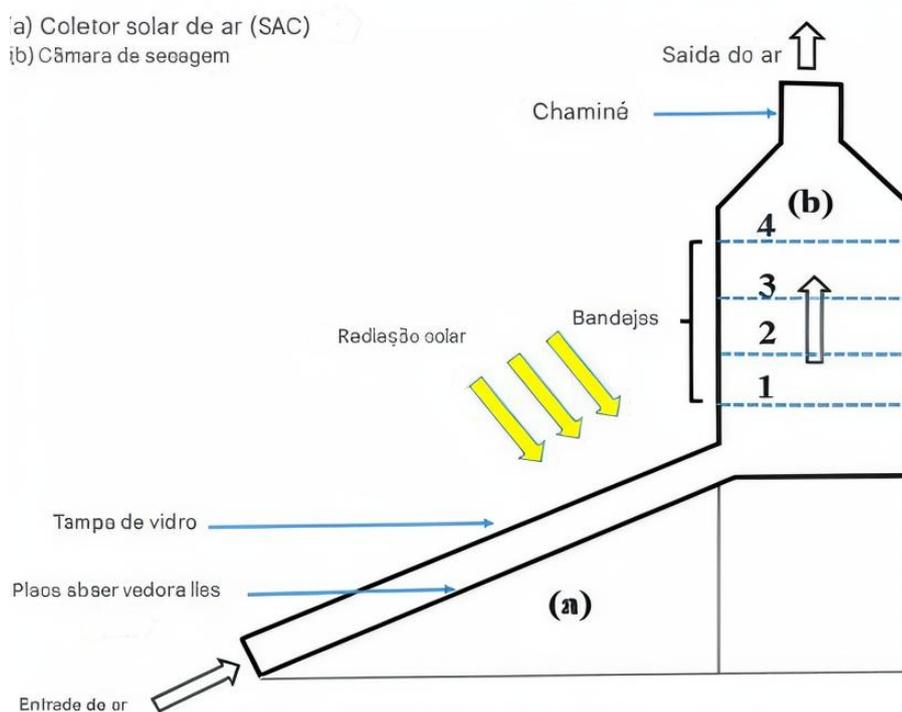
**Figura 2** - Secador solar direto do tipo estufa.



Fonte: Adaptada de Villagran, Henao-Rojas e Franco, 2021.

O secador indireto (Figura 3) aquece um fluido térmico por meio de um coletor solar, o qual transfere calor ao material sem exposição direta à luz solar.

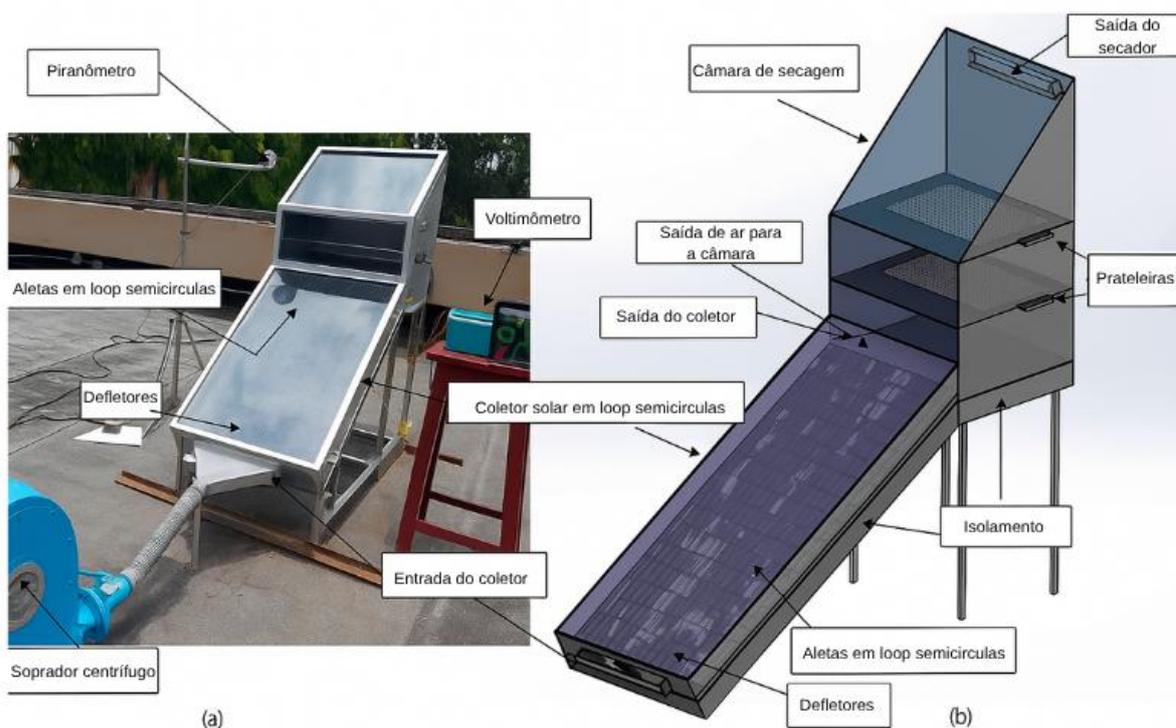
**Figura 3** - Diagrama esquemático de um secador solar indireto.



Fonte: Adaptada de Ennissoui et al., 2023.

O modelo misto (Figura 4) integra as abordagens direta e indireta, oferecendo maior flexibilidade operacional ao se adaptar eficientemente às variações das condições climáticas.

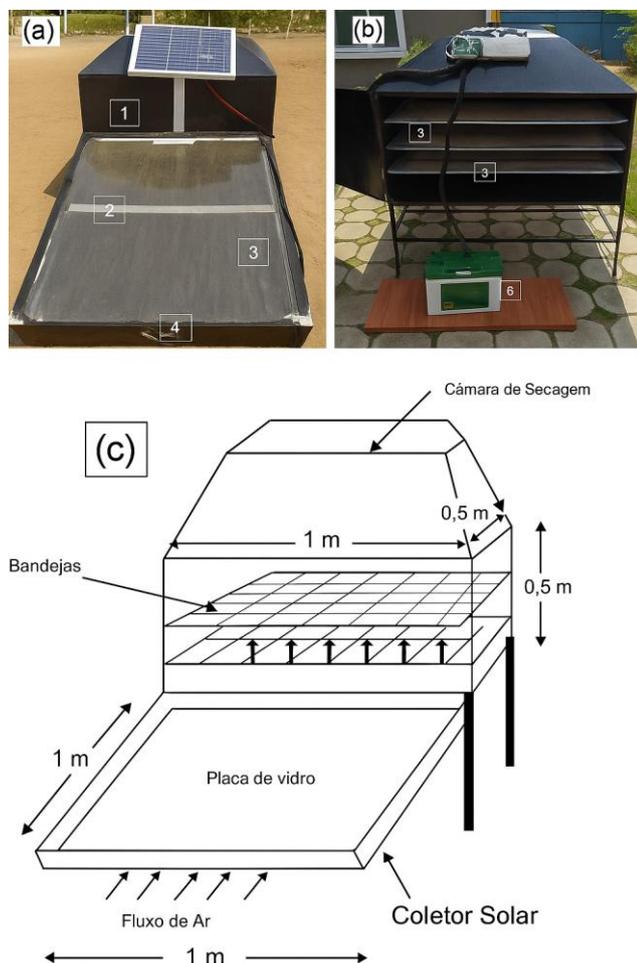
**Figura 4** - Diagrama esquemático de secadores solares mistos.



Fonte: Adaptada de Rani; Tripathy, 2023.

O secador híbrido (Figura 5) associa a energia solar a fontes convencionais, como eletricidade ou gás, garantindo o funcionamento contínuo, mesmo em períodos de baixa radiação solar, como dias nublados ou à noite.

**Figura 5 - Secadores solares híbridos.**



(a) e (b) Parte frontal e traseira do secador solar híbrido, (c) Diagrama esquemático.

Fonte: Adaptada de Behera, Mohanty e Mohanty, 2023.

Gomes et al. (2023) destacam que o secador solar em modo misto representa uma solução eficiente e sustentável para a secagem de lodo de esgoto. Essa configuração contribui significativamente para a otimização do aproveitamento da energia solar, elevando a eficiência do processo.

### 3.2.2 Destinação final

O lodo proveniente de ETE, denominado biossólido, é tradicionalmente destinado a aterros sanitários, porém seu reaproveitamento em compostagem, construção civil e agricultura surge como uma alternativa sustentável.

A aplicação de biossólidos em terras agrícolas permite o aproveitamento de nutrientes e carbono orgânico a baixo custo. Além disso, os biossólidos podem ser utilizados em projetos de engenharia civil, como cobertura de aterros sanitários e materiais de construção. Outra abordagem promissora é o uso de processos térmicos, que promovem a redução de volume e a recuperação de energia, tornando-se uma estratégia viável para o gerenciamento futuro de biossólidos (Elgarahy et al., 2024). Na literatura, estudos abordam meios alternativos para a disposição final do lodo.

Um novo sistema de geração de energia foi desenvolvido com base na co-combustão de biomassa agrícola e lodo de esgoto, integrado à secagem solar de lodo por Xue et al. (2022). O estudo propõe estratégias para combinar energia solar térmica e lodo seco com uma unidade de geração de energia a partir de biomassa, proporcionando uma abordagem eficiente e flexível para aumentar a produção líquida de energia. O sistema tem o potencial de gerar 9.640,03 MWh de eletricidade adicional por ano. O aumento da proporção de co-combustão, da irradiação solar ou a redução da umidade do lodo melhora significativamente a produção de energia adicional, tornando o processo mais sustentável e eficiente.

Chagas, Figueiredo e Ferreiro (2021) avaliaram os efeitos diretos e residuais do biochar nas propriedades do solo e na produtividade e nutrição do milho em um experimento de campo de cinco anos. Os resultados confirmaram a hipótese de que a aplicação de biochar promove efeitos residuais no fornecimento de nutrientes do solo, com benefícios observados por até três anos após a suspensão da aplicação, demonstrando a eficácia do biochar em melhorar a fertilidade do solo a longo prazo.

A secagem solar é uma tecnologia promissora para a redução do volume de lodo, mas a investigação na literatura sobre o reaproveitamento do lodo seco ainda é limitada.

### **3.3 Legislação atual para a aplicação de biossólido em solos**

A Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), define os critérios e procedimentos para a produção e aplicação de biossólidos em solos, com o objetivo de garantir a proteção ambiental e a saúde pública. A Resolução classifica o biossólido em duas categorias: Classe A e Classe B, de acordo com a presença de patógenos.

O biossólido Classe A deve apresentar uma concentração máxima de  $10^3$  *Escherichia coli* por grama de sólidos totais ( $g^{-1}$  de ST). E ser submetido a processos que garantam a redução de patógenos, conforme descrito na Tabela 2, com a comprovação dos parâmetros operacionais.

**Tabela 2** - Processos para obtenção de biossólido Classe A.

Processo	Requisitos
Lodo com teor de ST igual ou maior que 7%	A temperatura do lodo deve ser mantida em 50°C ou mais por, no mínimo, 20 minutos para garantir a redução de patógenos.
Lodo com teor de ST menor que 7%	A temperatura do lodo deve ser mantida igual ou acima de 50°C por no mínimo 30 minutos de tempo de contato.
Lodo tratado por processos que proporcionem valores elevados de pH e temperatura.	Processos que proporcionem elevação do pH (valores acima de 12, por pelo menos 72 horas) e da temperatura (mantida acima de 50°C, por pelo menos 12 horas durante o período em que o pH estiver acima de 12) e secagem do lodo de esgoto sanitário por exposição ao ar, no caso de materiais que permaneçam com teor de ST maior que 50%, após o período de 72 horas da mistura do material alcalino.
Lodo tratado em processo de redução adicional de patógenos.	Secagem térmica direta ou indireta para reduzir o teor de água no lodo de esgoto a 10% ou menos, devendo a temperatura das partículas de lodo superar 80°C ou a temperatura de bulbo úmido de gás, em contato com o lodo de esgoto, no momento da descarga do secador, ser superior a 80°C.

Fonte: Adaptada da Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020 do CONAMA.

O biossólido Classe A pode ser aplicado em diferentes tipos de solos, com algumas restrições. No cultivo de alimentos consumidos crus e cuja parte comestível tenha contato com o solo, a aplicação do biossólido deve ocorrer com no mínimo 1 mês de antecedência ao período de colheita. Em pastagens e forrageiras, a aplicação também deve respeitar o prazo de 1 mês antes da colheita ou do início do pastejo. Não há restrições para o uso do biossólido Classe A em florestas plantadas, recuperação de solos e áreas degradadas.

O biossólido Classe B deve atender ao limite máximo de  $10^6$  *Escherichia coli* por grama de sólidos totais ( $g^{-1}$  de ST) ou ser tratado por processos indicados na Tabela 3, com a devida demonstração dos parâmetros operacionais.

**Tabela 3** - Processos para obtenção de bio sólido Classe B.

Processo	Requisitos
Lodo tratado em um processo de redução significativa de patógenos.	Secagem em leitos de areia ou em bacias (solarização), pavimentadas ou não, cobertas ou não, até atingir teor de sólidos mínimos de 60%;
Lodo tratado em um processo equivalente aos de redução significativa de patógenos.	O lodo de esgoto sanitário é tratado por um outro processo, comprovadamente equivalente a um processo de redução significativa de patógenos e aceito pelo órgão ambiental competente.

Fonte: Adaptada da Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020 do CONAMA.

O bio sólido Classe B é proibido no cultivo de alimentos consumidos crus. Ele pode ser utilizado no cultivo de alimentos que não sejam consumidos crus e em produtos não alimentícios, desde que aplicado com no mínimo 4 meses de antecedência à colheita. Para pastagens e forrageiras, deve-se respeitar o prazo de 2 meses antes do pastejo e 4 meses antes da colheita. A aplicação em árvores frutíferas deve ocorrer apenas após a colheita. Essas restrições visam minimizar os riscos à saúde pública e garantir a segurança ambiental.

### 3.4 Modelagem computacional da secagem solar de lodo de ETE

Benhamza et al. (2021) destacaram a aplicação da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) como ferramenta indispensável para otimizar o desempenho de secadores solares. Simulações computacionais possibilitam ajustes precisos na geometria e nos parâmetros operacionais, garantindo maior uniformidade de temperatura e fluxo de ar (Rojas e Huarcaya, 2023).

Os estudos numéricos sobre a secagem de lodo doméstico ainda são bem limitados na literatura. As descobertas obtidas em pesquisas sobre a secagem solar de produtos agrícolas servem como referência para o desenvolvimento de estudos aplicados à secagem solar de lodo de ETEs, contribuindo para a otimização dos processos e maior eficiência na redução da umidade (Gomes, 2023).

Rani e Tripathy (2023) utilizaram o *software* COMSOL *Multiphysics* para simular dois secadores solares mistos um com coletores planos e outro com coletores aletados sob convecção forçada. O primeiro modelo apresentou distribuição de ar não uniforme, com velocidades entre 0,4 à 0,55 m/s e regiões laterais entre 0,1 à 0,2 m/s,

resultando em variações térmicas nas amostras, com temperatura máxima de 352,15 K. O segundo modelo exibiu fluxo de ar mais homogêneo (0,25 à 0,35 m/s), proporcionando maior uniformidade térmica, embora com temperatura máxima ligeiramente inferior (335 K), destacando-se pela melhor qualidade de secagem.

Sileshi, Hassen e Adem (2022) utilizaram o *software Ansys Fluent* para avaliar o desempenho de distribuidores de ar em secadores solares misto. A incorporação de um canal vertical de distribuição de ar no sistema promoveu uma distribuição homogênea dos parâmetros de fluxo, otimizando a circulação interna. O modelo proposto apresentou resultados expressivos na melhoria da eficiência e uniformidade da secagem, evidenciando-se como uma alternativa promissora para aprimorar o desempenho de secadores solares mistos.

Fernandes et al. (2024) utilizaram a modelagem de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) para comparar o desempenho de dois modelos de secadores solares indiretos, visando identificar a configuração mais eficiente no processo de secagem. A abordagem permitiu analisar a distribuição do fluxo de ar, o perfil térmico e a uniformidade da transferência de calor dentro das câmaras de secagem. Para eliminar a desvantagem da desuniformidade térmica comumente presente nesses secadores, os autores propuseram ajustes no *design* do sistema de distribuição de ar, o que resultou em uma distribuição mais homogênea de calor e uma melhoria significativa na eficiência e na qualidade do processo de secagem.

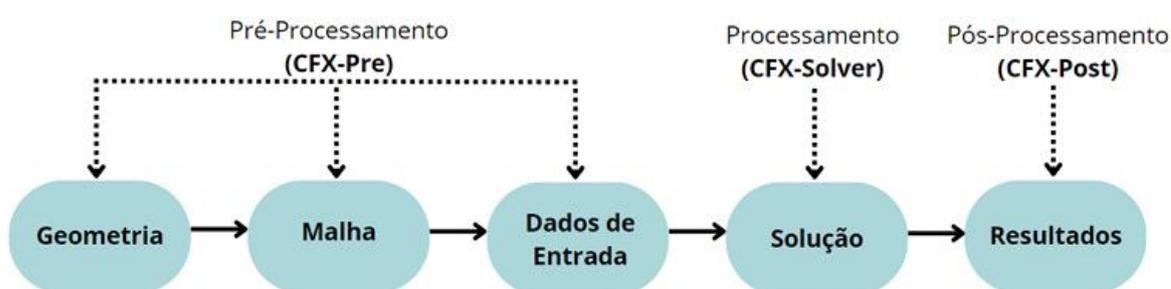
Durante a revisão da literatura, foram encontrados diversos estudos sobre a simulação de secadores solares. Contudo, muitos não apresentavam de forma completa as condições de contorno, dificultando a comparação com os resultados deste trabalho. Em alguns casos, mencionavam-se apenas os valores máximos de radiação solar. Essa limitação destaca a importância de uma apresentação criteriosa dos dados de entrada, essencial para garantir comparações precisas e a reprodutibilidade dos resultados.

## 4 METODOLOGIA

Neste estudo, um secador solar misto foi analisado utilizando a metodologia da Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD). A modelagem CFD foi amplamente utilizada devido à sua capacidade de resolver as equações de Navier-Stokes usando métodos numéricos para prever os perfis de temperatura e velocidade na câmara de secagem.

As simulações numéricas foram realizadas utilizando o *software ANSYS – Fluid Flow (CFX)*, versão 2021 Inc.®. A configuração foi iniciada no *Workbench*, plataforma da ANSYS que integra diversos módulos de análise em um ambiente unificado. Os métodos empregados durante a simulação estão apresentados na Figura 6.

**Figura 6** - Estrutura da abordagem CFD proposta.



Fonte: Barbosa (2023).

Durante a fase de pré-processamento foi realizada a modelagem computacional do problema físico a ser simulado. Nessa etapa, construiu-se um modelo geométrico do domínio computacional, sobre o qual foi gerada uma malha estruturada, subdividindo o domínio em pequenas células.

Também foram definidas as propriedades dos materiais, as condições de contorno e as configurações iniciais do *solver*. A fase de processamento envolveu a execução dos cálculos necessários para simular a solução do problema. Finalmente, o pós-processamento consistiu na apresentação gráfica e na interpretação dos resultados obtidos.

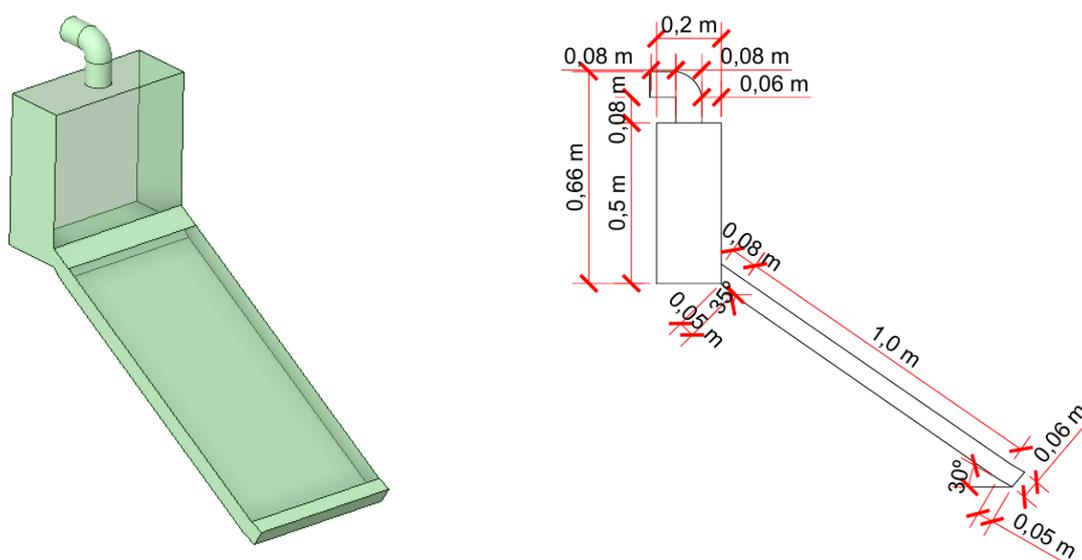
Para facilitar a compreensão da fase de processamento, o conteúdo foi dividido em subseções. A Seção 4.1 que aborda a construção da geometria e do domínio de fluxo; a Seção 4.2 que trata da geração da malha; a Seção 4.3 discute as propriedades do fluido e as condições de contorno; e a Seção 4.4 que detalha o processo de

simulação e a modelagem matemática envolvida.

#### 4.1 Geometria e domínio de fluxo

A geometria do secadores solare foi desenvolvida no *ANSYS SpaceClaim*, com base na metodologia proposta por Fernandes et al. (2024), sendo adaptada para contemplar uma alteração no tipo de secador, que passou de indireto para misto. O sistema é composto por um coletor solar de placa plana, com largura de 0,5 m, cujas demais dimensões estão detalhadas na Figura 7. O coletor foi projetado com uma inclinação de  $30^\circ$  em relação ao plano horizontal, com o intuito a otimizar a captação da radiação solar ao longo do dia.

Figura 7 - Secador solar misto.



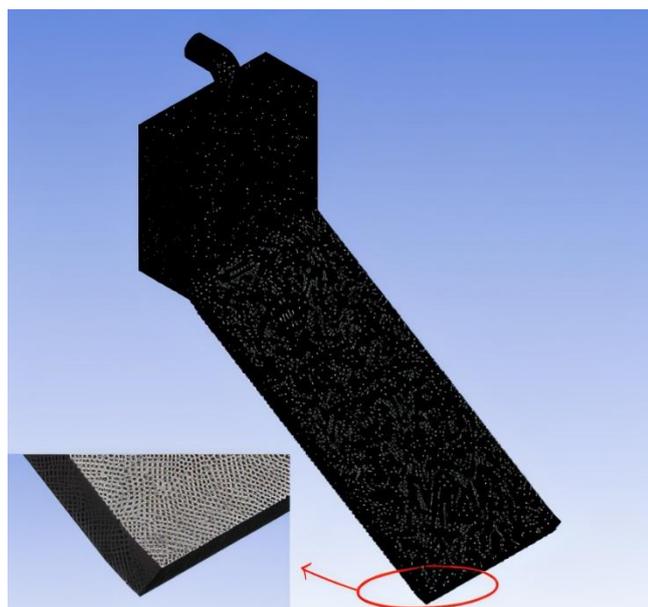
Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

A câmara de secagem junto com o coletor faz um domínio de fluxo 3D simétrico. Os suportes estruturais das estantes e colunas verticais dentro da câmara de secagem foram desconsiderados do domínio do fluxo, porque esses componentes não influenciaram o fluxo de ar de forma significativa. Foi realizado o estudo apenas do equipamento, sem material dentro da câmara.

#### 4.2 Geração da malha

Uma malha não estruturada formada por elementos tetrahedricos representando o domínio de fluxos 3D simétricos foi gerada a fim de capturar parâmetros de fluxo próximos às paredes (Figura 8).

**Figura 8** - Malha refinada do secador solar misto.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

A precisão da solução da simulação depende, principalmente, do número de elementos na malha e da forma como estão distribuídos. Uma malha bem construída pode prevenir instabilidades e discrepâncias nos resultados. A malha atingiu a independência em 3.690.135 elementos e 653.467 nós, a partir desse refinamento, não houve impactos significativos nos resultados das simulações. Essa escolha garantiu que os resultados fossem consistentes e não fossem influenciados pela precisão da malha não estruturada.

#### **4.3 Propriedades do fluido e condições de contorno**

O fluido considerado no escoamento foi o ar, operando em regime permanente, com propriedades assumidas constantes ao longo do tempo. A escolha do modelo de turbulência é fundamental para a simulação, foi adotado o modelo  $k-\epsilon$  por sua compatibilidade com a plataforma ANSYS e por ser amplamente utilizado em simulações de escoamentos internos com transferência de calor.

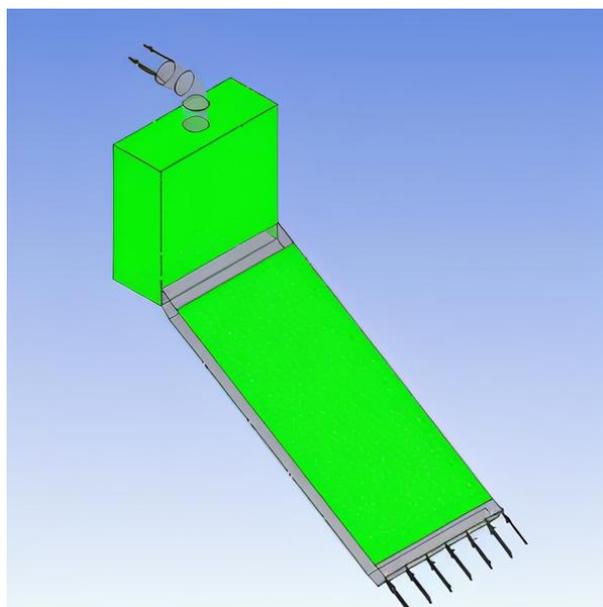
As condições de contorno (Tabela 4) foram estabelecidas com base em estudos experimentais. O fluxo de calor da placa absorvente e da estufa foi estimado pela média dos dados de radiação solar obtidos por Silva (2019), em Campina Grande – PB. A velocidade de entrada do ar foi adotada conforme Khanlari et al. (2020a), cujos resultados também apresentaram valores semelhantes de radiação solar.

**Tabela 4** - Condições de contorno utilizadas.

Região	Condições de contorno	Valor
Entrada de ar	Velocidade	0,7 m/s
Placa absorvente e estufa	Fluxo de Calor máximo	1000 W/m <sup>2</sup>
Saída de ar	Pressão	1 ATM
Área externa	Temperatura	298,15 K

Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

A Figura 9 apresenta a direção do fluxo, representado por setas, localizando a entrada e a saída de ar, respectivamente, assim como a placa absorvente e as paredes da estufa, diferenciadas por tonalidades distintas. A transparência das paredes da estufa permite a passagem da radiação solar, característica que, juntamente com o coletor solar, define o modelo misto.

**Figura 9** - Condições de contorno do secador solar misto.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Foram realizadas simulações sob diferentes níveis de radiação solar, incluindo diferentes condições para avaliar se a temperatura da câmara de secagem atende aos critérios da Resolução nº 498/2020 do CONAMA, que regulamenta a classificação do lodo como tipo A.

Considerando o menor valor de radiação registrado por Silva (2019), em torno de 150 W/m<sup>2</sup>, o modelo também foi submetido a simulações com fluxos de calor de 150, 250, 350 e 450 W/m<sup>2</sup>, com o objetivo de identificar o limite mínimo necessário para garantir o atendimento às exigências normativas.

#### 4.4 Simulação e modelagem matemática

As simulações foram realizadas utilizando o pacote *ANSYS-CFX Solver Manager* que utiliza o método dos volumes finitos para a solução numérica das equações de transporte. Para se obter os campos de velocidade e temperatura foram resolvidas as equações de conservação de massa, momento e energia, também conhecidas como equações de Navier-Stokes e expressas em termos gerais na forma em que são apresentadas nas Equações 1, 2 e 3, respectivamente. Essas equações foram adotadas conforme apresentado por Afshari et al. (2021).

$$\nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{v}) = -\nabla p + \nabla(\mu(\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T)) + SM \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho Cp)}{\partial t} - \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (-k(\nabla T) + \rho UCp) - SE = 0 \quad (3)$$

Onde:

- $\vec{v}$  = vetor velocidade do fluido (m/s);
- $\rho$  = massa específica (kg/m<sup>3</sup>);
- $t$  = tempo (s);
- $\mu$  = viscosidade dinâmica do ar (Pa.s);
- $\nabla p$  = gradiente de pressão (Pa/m);
- $SM$  = termo fonte do momento linear;
- $Cp$  = entalpia específica total (J);
- $k$  = condutividade térmica (W/m.s);
- $T$  = temperatura (K);
- $SE$  = termo fonte da equação da energia.

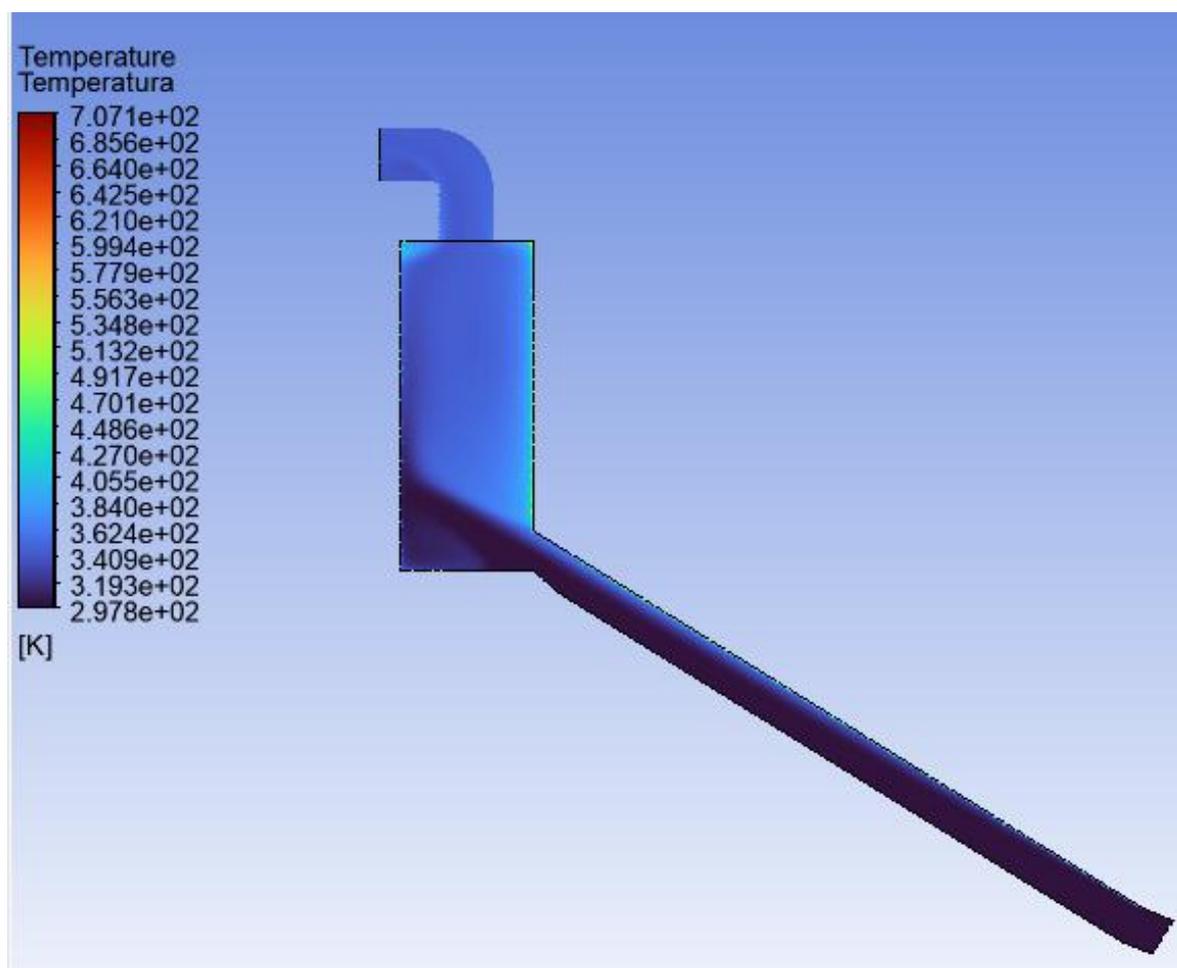
As equações foram apresentadas no formato adotado pelo programa utilizado nas simulações numéricas. A solução envolveu a integração das equações diferenciais parciais nos volumes de controle do domínio computacional, resultando em um sistema de equações algébricas resolvido por método iterativo.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A validação do modelo computacional desenvolvido foi uma etapa fundamental para garantir sua precisão e confiabilidade. Para isso, os resultados de temperatura e velocidade obtidos na câmara e na saída do secador foram comparados com a literatura, com destaque para os estudos de Tiwari e Tiwari (2017), Quinones et al. (2023), Rani e Tripathy (2023), Sharma, Atheaya e Kumar (2024), Silva (2019) e Ali et al. (2016).

A Figura 10 ilustra a distribuição da temperatura em um plano vertical que percorre o tubo de saída de ar. Observou-se que a temperatura do ar dentro do secador solar é superior à temperatura ambiente (Tabela 5). Isso se deve ao fato de que as ondas infravermelhas atravessam a placa absorvente, que apresentam baixa resistência térmica, sendo posteriormente absorvidas pelo secador, o que resulta no aquecimento do ar circulante.

**Figura 10** - Distribuição de temperatura no secador solar sob fluxo de calor de  $1000 \text{ W/m}^2$ .



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2025.

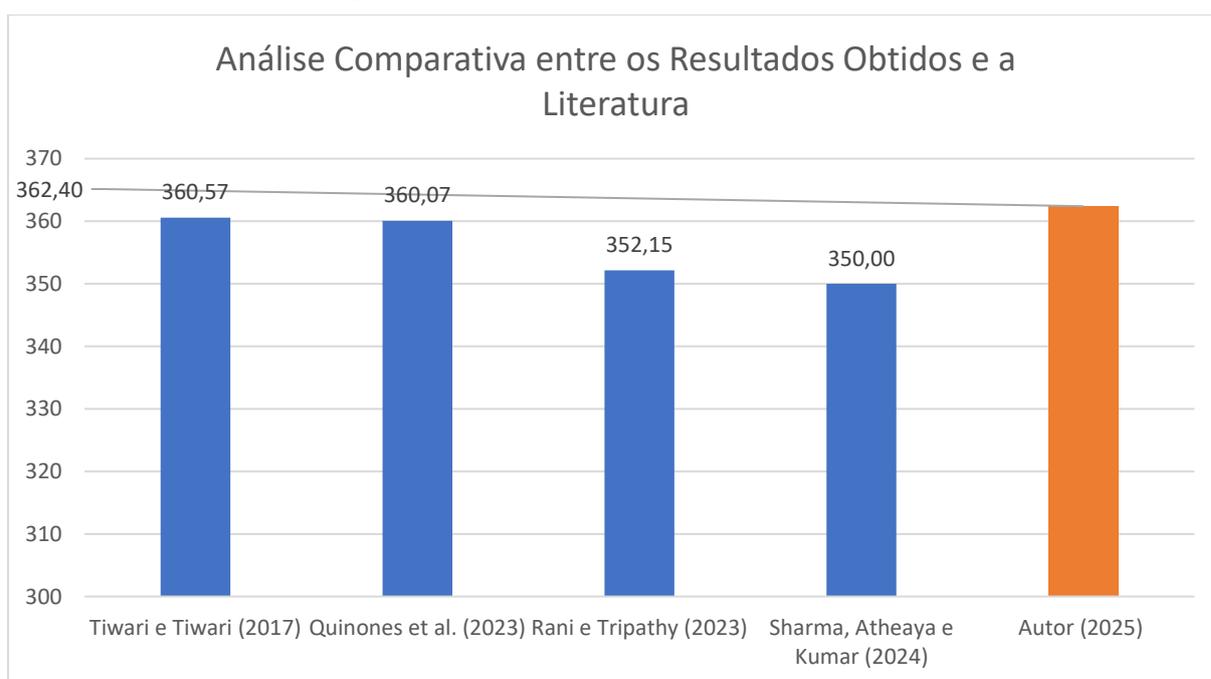
**Tabela 5** - Resultados de temperatura obtidos para o fluxo de calor de 1000 W/m<sup>2</sup>

Local	Unidade (Kelvin)
Câmara de secagem	319,3 – 384,0
Temperatura máxima	405,0
Zona útil	362,4

**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2025.

Na câmara de secagem, a temperatura variou entre 319,3 K e 384 K, com picos localizados de até 405 K nas proximidades da superfície. No entanto, essas temperaturas mais elevadas ocorreram em uma região muito restrita, não sendo representativas do desempenho global do sistema.

Na zona útil, onde os produtos estarão efetivamente expostos, a temperatura média foi de aproximadamente 362,4 K, representando um aumento de 64,25 K com relação a temperatura ambiente, atendendo à exigência da Resolução CONAMA nº 498/2020, que estabelece que o lodo deve ser submetido a temperatura maior ou igual a 323,15 K para garantir a inativação de patógenos e permitir sua classificação como tipo A. Necessitando permanecer por 30 minutos. Os resultados obtidos foram comparados com dados disponíveis na literatura (Gráfico 1).

**Gráfico 1** - Comparação Gráfica entre os Resultados Obtidos e os Dados da Literatura

**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2025.

O desempenho obtido é compatível ao relatado por Tiwari e Tiwari (2017), que, utilizando um secador solar misto, obtiveram temperatura de saída do ar de 395,93 K e temperatura interna na estufa de 360,57 K, com um aumento de 62,42 K em relação à temperatura ambiente, sob condições de radiação solar semelhantes.

Resultados semelhantes foram observados por Quinones et al. (2023), que, ao utilizarem um secador solar misto convencional, alcançaram temperatura máxima de 360,07 K. Em uma versão aprimorada do sistema, equipada com armazenamento de energia térmica utilizando calcário, foi possível elevar a temperatura ambiente em até 67,35 K.

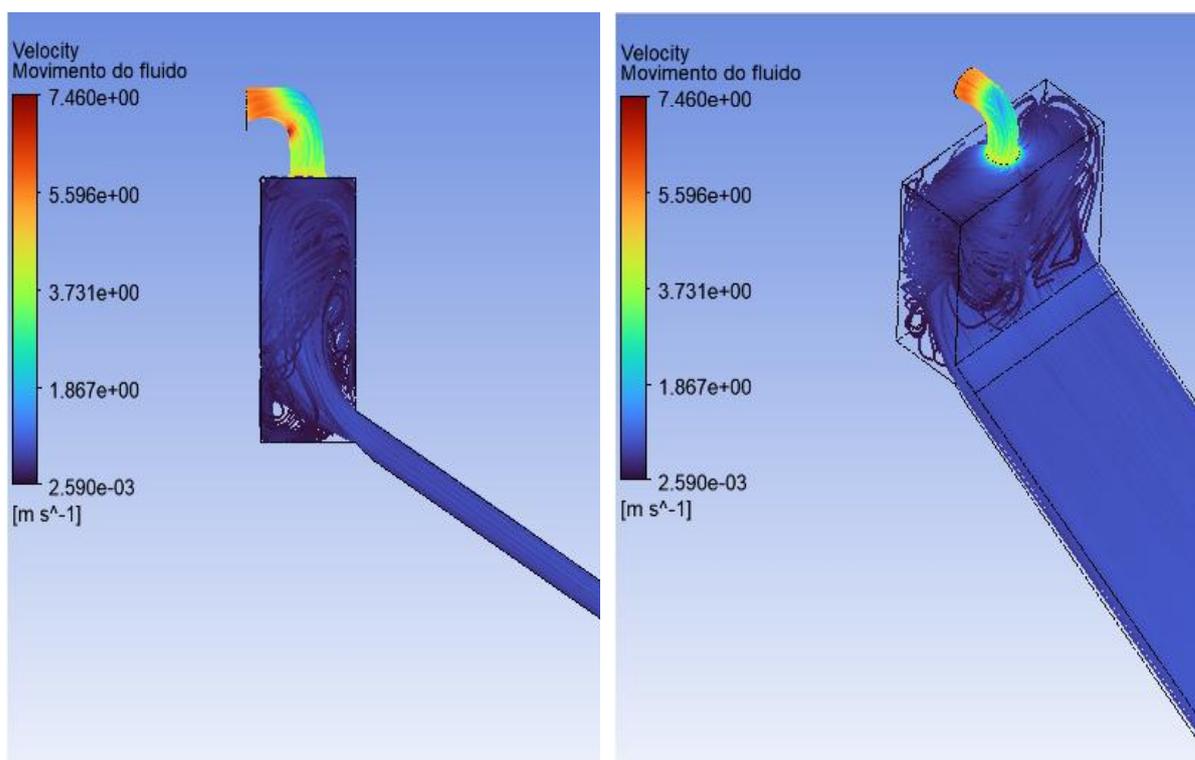
Rani e Tripathy (2023) obtiveram uma temperatura máxima de 352,15 K em um secador solar. No entanto, observaram que grande parte da estufa apresentou uma distribuição térmica não uniforme, com variações que incluíram regiões com temperaturas próximas a 341,15 K. Sharma, Atheaya e Kumar (2024) registaram temperaturas médias em torno de 350 K, com indícios de variações espaciais ao longo da estufa.

Já Silva (2019) e Ali et al. (2016) utilizando secadores solares indiretos, obtiveram temperaturas de 351,15 K e 348,15 K na estufa, respectivamente. Essa diferença é considerada esperada, uma vez que os sistemas mistos tendem a atingir temperaturas mais elevadas devido à combinação dos modos de aquecimento direto e indireto.

A Figura 11 apresenta o campo de velocidade do fluido no interior do secador. Na câmara de secagem, a velocidade do ar atingiu aproximadamente 0,45 m/s, enquanto a maior velocidade foi observada no tubo de saída, alcançando 7,2 m/s. A aceleração do fluxo na saída ocorre devido ao efeito chaminé, impulsionado pela diferença de temperatura entre o ar quente interno e o ar externo mais frio, o que gera um fluxo ascendente natural. A geometria estreita da chaminé intensifica esse efeito, resultando em uma maior velocidade na saída do secador.

Esse aumento de velocidade é benéfico, uma vez que fluxos de ar mais rápidos favorecem a remoção da umidade dos produtos de forma mais eficiente (Mehdipour; Ghaffari, 2020). No mesmo estudo, o autor observou velocidades variando entre 0,47 e 1,63 m/s no interior da câmara de secagem, valores compatíveis com os encontrados no presente trabalho.

**Figura 11** - Velocidade do fluido no secador.



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2025.

Foram realizadas simulações com diferentes fluxos de calor para avaliar o desempenho térmico do secador, cujos resultados de temperatura estão apresentados na Tabela 6. Como a velocidade de entrada do fluido foi igual em todos os casos (0,7 m/s), não ocorreram variações significativas nos campos de velocidade, mesmo com as diferenças de temperatura. Por essa razão, os dados de escoamento não foram apresentados.

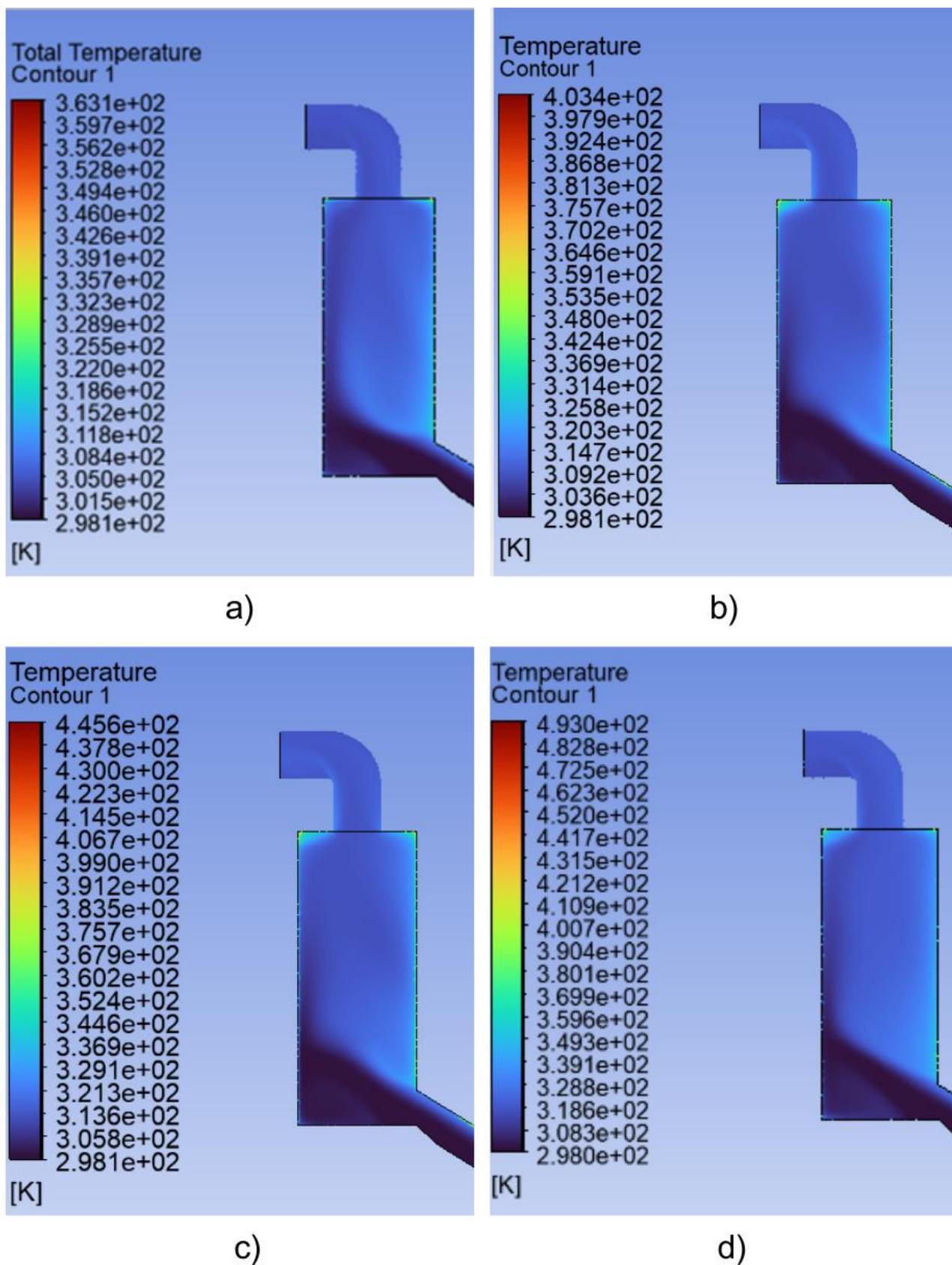
**Tabela 6** - Valores de temperatura para diferentes fluxos de calor.

Fluxo de calor (W/m <sup>2</sup> )	Temperatura na estufa (K)
150	304,8 – 311,4
250	314,7 – 320,3
350	321,3 – 329,1
450	328,8 – 339,1

**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2025.

Os contornos de temperatura na câmara de secagem, sob diferentes intensidades de radiação solar, estão representados nas Figuras 12.

Figura 12 - Distribuição de temperatura no secador solar para diferentes fluxos de calor.



a) 150 W/m<sup>2</sup>, b) 250 W/m<sup>2</sup>, c) 350 W/m<sup>2</sup> e d) 450 W/m<sup>2</sup>.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

O menor valor de temperatura obtido (305,0 K) é compatível com os dados da literatura apresentados na tabela 6.

**Tabela 7** - Valores Encontrados na Literatura para Diferentes Condições de Fluxo de Calor

<b>Autores</b>	<b>Descrição</b>
Nabnean et al. (2016)	Temperatura alcançada: 303,15 K Radiação solar: 38 W/m <sup>2</sup> Tipo de sistema: secador solar misto
Mehdipour e Graffari (2020)	Temperatura alcançada: 315 K Radiação utilizada: 500 W/m <sup>2</sup> Tipo de sistema: secador solar indireto
Khanlari et al. (2020b)	Temperaturas variaram entre 333 K e 311 K Tipo de sistema: secador misto apenas com tampa superior transparente

**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2025.

Nabnean et al. (2016), mesmo com uma radiação solar relativamente baixa (38 W/m<sup>2</sup>), alcançaram uma temperatura de 303,15 K. *O valor de temperatura obtido para uma radiação de 250 W/m<sup>2</sup> é semelhante ao reportado por Mehdipour e Graffari (2020), que atingiram 315 K com o dobro da radiação (500 W/m<sup>2</sup>) em um secador indireto. Essa diferença é coerente, já que o modelo indireto geralmente alcança temperaturas mais baixas que o modelo misto, exigindo maior intensidade de radiação para resultados equivalentes. Khanlari et al. (2020b), por sua vez, registraram temperaturas entre 333 K e 311 K em uma estufa com apenas a tampa superior transparente.*

Observa-se que os menores fluxos de calor, de 150 e 250 W/m<sup>2</sup>, não atingiram a temperatura mínima de 323 K exigida pela legislação para que o lodo seja classificado como classe A. No entanto, nessas condições, o material ainda pode ser enquadrado na categoria de classe B, que pode ser usado no cultivo de alimentos que não sejam consumidos crus e em produtos não alimentícios,

## 6 CONCLUSÃO

A secagem solar do lodo doméstico apresenta-se como uma alternativa promissora para a redução do consumo energético associado ao tratamento dos subprodutos das águas residuárias. Quando devidamente seco, esse resíduo sólido pode ser reaproveitado como fertilizante orgânico. Neste estudo, foi realizada uma simulação computacional de um secador solar operando em modo misto.

O modelo de secador solar proposto mostrou-se capaz de atender aos critérios necessários para a classificação do lodo como classe A, desde que exposto a radiações solares superiores a  $300 \text{ W/m}^2$ , e possivelmente como classe B em condições de radiação inferiores. Essa tecnologia se revela especialmente viável em regiões tropicais, onde a incidência solar permanece elevada durante grande parte do dia. Para melhorar seu desempenho em condições menos favoráveis, sugerem-se estratégias complementares, tais como o reforço do isolamento térmico da estufa, ajustes no sistema de ventilação e a incorporação de fontes auxiliares de aquecimento, incluindo o uso de armazenamento de energia térmica.

Dessa forma, a realização da simulação se mostra fundamental, uma vez que antecipa o comportamento do sistema e orienta decisões quanto à viabilidade técnica e ambiental do aproveitamento do bio sólido.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se a construção do modelo físico do sistema, a verificação experimental dos dados simulados e a posterior aplicação do bio sólido na agricultura. Além disso, recomenda-se que, em estudos que utilizem simulação numérica, os dados de entrada e as condições de contorno sejam claramente definidos na metodologia, a fim de facilitar a reprodutibilidade e contribuir com o avanço de pesquisas na área. Nesse contexto, este estudo contribui ao apresentar de forma clara as condições de contorno e os cenários analisados, consolidando uma base sólida para futuras investigações.

## REFERÊNCIAS

AFSHARI, F.; KHANLARI, A.; TUNCER, A. D.; SOZEN, A.; SAHINKESEN, I.; NICOLA, G. D. Dehumidification of sewage sludge using quonset solar tunnel dryer: An experimental and numerical approach. **Renewable Energy**, v. 171, p. 784-798, jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.158>.

ALI, I.; ABDELKADER, L.; EL HOUSSAYNE, B.; MOHAMED, K.; KHADIR, L. Solar convective drying in thin layers and modeling of municipal waste at three temperatures. **Applied Thermal Engineering**, v. 108, p. 41-47, set. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.098>.

BARBOSA, R. A. **Simulação numérica via CFD de um secador solar de exposição indireta para secagem de alimentos**. Monografia (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual da Paraíba, 2023.

BEHERA, D. D.; MOHANTY, A. M.; MOHANTY, R.C. Recent advances in solar drying technologies: **A Comprehensive review**. **Journal of Energy Systems**, v. 6, 503-519, dez. 2022. <https://doi.org/10.30521/jes.1050814>.

BENHAMZA, A.; BAUBEKRI, A.; ATIA, A.; HADIBI, T.; ARICI, M. Drying uniformity analysis of an indirect solar dryer based on computational fluid dynamics and image processing. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 47, out. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101466>.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 498, de 19 de agosto de 2020**. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 161, p. 265–269, 21 ago. 2020.

CHAGAS, J. K. M.; FIGUEIREDO, C. C.; FERREIRO, J. P. Sewage sludge biochars effects on corn response and nutrition and on soil properties in a 5-yr field experiment. **Geoderma**, v. 401, nov. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115323>.

ELGARAHY, A. M.; ELOFFY, M. G.; PRIYA, A. K.; YOGESHWARAN, V.; YANG, Z.; ELWAKEEL, K. Z. E.; MALDONADO, E. A. L. Biosolids management and utilizations: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 451, abr. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141974>.

EMMANOUIL, C.; GIANNAKIS, I.; KYZAS, G. Z. Terrestrial bioassays for assessing the biochemical and toxicological impact of biosolids application derived from wastewater treatment plants. **Science of the Total Environment**, v. 931, abr. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172718>.

ENNISSIOUI, J.; BENGHOULAM, E. M.; RHAFIKI, T. E.; FERTAHI, S.D. Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics Modeling Using the RANS Approach of Indirect-Type Solar Dryers Based on Smooth and Corrugated Absorber Plates.

**Jornal of Thermal Science Engineering Applications**, v. 15, dez. 2023. <https://doi.org/10.1115/1.4063295>.

EZZARIAIA, A.; AN-NORI, A.; EL FELS, L.; RIBOUL, D.; MERLINAD, G.; BARRET, M.; LACROIX, Z.; EL MEJAHED, K.; EL GHAROUS, M.; MELOU, A. B.; KOUISNI, L.; PATUREAU, D.; PINELLI, E.; HAFIDI, M. Combining sequential extraction and 3D fluorescence to investigate the behavior of antibiotic and polycyclic aromatic hydrocarbons during solar drying of sewage sludge. **Chemosphere**, v. 298, mar. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134293>.

FERNANDES, R. P.; FERNANDES, F.V.; SANTOS, I.B.; FIGUEIREDO, J.D.S.; OLIVEIRA, R. J. A.O.; BARBOSA, R. A.; SANTOS, A. R. C.; LUIZ, M. R. Modelagem 3D de secadores solares indiretos com entrada de ar única e múltipla utilizando a Dinâmica dos Fluidos Computacionais (CFD). **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, v. 17, n. 13, dez. 2024. <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.13-394>.

GALLIOU, F.; MARKAKIS, N.; FOUNTOULAKIS, M. S.; NIKOLAIDIS, N.; MANIOS, T. Production of organic fertilizer from olive mill wastewater by combining solar greenhouse drying and composting. **Waste Management**, v. 75, p. 305-311, mai. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.020>.

GIWA, A. S.; MAURICE, N. J.; LUOYAN, A.; LIU, X.; YUNLONG, Y.; HONG, Z. Advances in sewage sludge application and treatment: Process integration of plasma pyrolysis and anaerobic digestion with the resource recovery. **Heliyon**, v. 9, set. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19765>.

GOMES, L. A. C. N.; GONÇALVES, R. F.; MARTINS, M. F.; SOGARI, C. N. Assessing the suitability of solar dryers applied to wastewater plants: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 326, jan. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116640>.

GOMES, L. A. C. N. **Influência da temperatura e da fluidodinâmica no desaguamento e secagem térmica de lodo de estação de tratamento de esgoto do tipo UASB utilizando energia solar e GLP**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2023.

GUO, Y.; GUO, Y.; GONG, H.; FANG, N.; TAN, Y.; ZHOU, W.; HUANG, J.; DAI, L.; DAI, X. Variations of heavy metals, nutrients, POPs and particle size distribution during “sludge anaerobic digestion-solar drying-land utilization process”: Case study in China. **Science of the Total Environment**, v. 801, ago. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149609>.

HOOGE, A.; NIELSEN, H. H.; HEINZE, W. M.; LYNGSIE, G.; RAMOS, T. M.; SANDGAARD, M. H.; VOLLERTSEN, J.; SYBERG, K. Fate of microplastics in sewage sludge and in agricultural soils. **Trends in Analytical Chemistry**, v. 166, jul. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117184>.

KHANLARI, A.; SOZEN, A.; AFSHARI, F.; SIRIN, C.; TUNCER, A. D.; GUNGOR, A. Drying municipal sewage sludge with v-groove triple-pass and quadruple-pass solar

air heaters along with testing of a solar absorber drying chamber. **Science of the Total Environment**, v. 709, mar. 2020(b). <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.039>.

KHANLARI, A.; TUNCER, A. D.; SOZEN, A.; SIRIN, C.; GUNGOR, A. Energetic, environmental and economic analysis of drying municipal sewage sludge with a modified sustainable solar drying system. **Solar Energy**, v. 208, p. 787-799, set, 2020(a). <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.039>.

KRAWCZYK, P. Numerical modeling of simultaneous heat and moisture transfer during sewage sludge drying in solar dryer. **Procedia Engineering**, v. 157, p. 230-237, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.361>.

LE, Q.; PRICE, G. W. A review of the influence of heat drying, alkaline treatment, and composting on biosolids characteristics and their impacts on nitrogen dynamics in biosolids-amended soils. **Waste Management**, v. 176, jan. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.01.019>.

LI, Y.; YANG, G.; ZHANG, W.; HE, D.; YAN, Y.; JIANG, J. Understanding the low-temperature drying process of sludge with machine learning in a sewage-source heat pump drying system. **Journal of Environmental Management**, v. 375, jan. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124284>.

LING, W.; XING, Y.; HONG, C.; ZHANG, B.; HU, J.; ZHAO, C.; WANG, Y.; FENG, L. Methods, mechanisms, models and tail gas emissions of convective drying in sludge: A review. **Science of the Total Environment**, v. 845, jul. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157376>.

MEHDIPOUR, R; GRAFFARI, A. Solar dryer performance simulation: Experimental and numerical study. **Journal of Food Process Engineering**, v. 44, 2021. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13875>.

NABNEAN, S.; JANJAI, S.; THEPA, S.; SUDAPRASET, K.; SONGPRAKORP, R.; BALA, B. K. Experimental performance of a new design of solar dryer for drying osmotically dehydrated cherry tomatoes. **Renewable Energy**, v. 94, p. 147-156, aug. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.013>.

NIKUNA, S. G.; OLWAL, T. O.; CHOWDHIRY, S. D.; NDAMBUKI, J. M. N. A review of wastewater sludge-to-energy generation focused on thermochemical technologies: An improved technological, economical and socio-environmental aspect. **Cleaner Waste Systems**, v. 7, jan. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2024.100130>.

OTHMAN, F. B.; EDDHIBI, F.; ALI, A. B. H.; FADHEL, A.; BAYER, O.; TARI, I.; GUIZANI, A.; BALGHOUTH, M. Investigation of olive mill sludge treatment using a parabolic trough solar collector. **Solar Energy**, v. 232, p. 344-361, jan. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.01.008>.

PATIL, P.; SHARARA, M. Simulation model for swine lagoon sludge drying in solar-assisted greenhouse systems. **Environmental Technology & Innovation**, v. 37, jan. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104057>.

PRENAFETA-BOLDÚ, F. X.; BURGOS, L.; NOGUEROL, J.; MERCADER, M.; SOLER, J.; FERNÁNDEZ, B. Solar drying in the vineyard: a sustainable technology for the recovery of nutrients from winery organic waste. **Water Science & Technology**, v. 82, p. 27-3, jul. 2020. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.320>.

QUINONES, A. J. C.; BONFIL, G. S.; ESQUIVEL, R. A. M.; BASSAM, A. Techno-economic analysis of an indirect solar dryer with thermal energy storage: An approach with machine learning algorithms for decision making. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 45, out. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102131>.

RACLAVSK, H.; RUZICKIVÁ, J.; SAFÁR, M.; KUVBEL, M.; SLAMOVÁ, K.; SVÉDOVÁ, B.; JUCHELHOVÁ, D.; KANTOR, P. Municipal sludges as sources of energy or nutrients – What is the best?. **Energy**, v. 275, abr. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127469>.

RANI, P.; TRIPATHY, P.P. CFD coupled heat and mass transfer simulation of pineapple drying process using mixed-mode solar dryers integrated with flat plate and finned collector. **Renewable Energy**, v. 217, nov. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119210>.

ROJAS, F.J.; HUARCAYA, D. Design of a solar mango dryer for rural sectors located in Piura-Peru. **Renewable Energies & Power Quality Journal**, v. 21, jan. 2024. <https://doi.org/10.24084/repqj21.427>.

SHARMA, M.; ATHEAYA, D.; KUMAR, A. Optimizing hybrid household indirect solar dryer with sinusoidal corrugated Collector: CFD simulations and thermal performance analysis. **Solar Energy**, v. 279, set. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112817>.

SILESHI, S. T.; HASSEN, A. A.; ADEM, K. D. Simulation of mixed-mode solar dryer with vertical air distribution channel. **Heliyon**, v. 8, nov. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11898>.

SILVA, S. M. C. P.; FERNANDES, F. SOCCOL, V. T.; MORITA, D. M. Main contaminants in sludge. *In*: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Sludge Treatment And Disposal**. v. 6. New York: IWA, p. 4-28, 2007.

SILVA, T. F. **Análise da eficiência de um secador solar indireto ativo**. Monografia (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual da Paraíba, 2019.

TIWARI, S.; TIWARI, G. N. Energy and exergy analysis of a mixed-mode greenhouse-type solar dryer, integrated with partially covered N-PVT air collector. **Energy**, v. 128, p. 183-195, jun. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.022>.

VILLAGRAN, E. ROJAS, J. C. H.; FRNACO, G. Thermo-Environmental Performance of Four Different Shapes of Solar Greenhouse Dryer with Free Convection Operating Principle and No Load on Product. **Fluids**, v. 6, mai. 2021. <https://doi.org/10.3390/fluids6050183>.

VON SPERLING, M. **Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2 ed. Belo Horizonte, MG: SEGRAC, 1996.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. Sludge characteristics and production. *In*: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Sludge Treatment And Disposal**. v. 6. New York: IWA, p. 4-28, 2007.

WANG, X.; JIN, X.; WANG, H.; HU, Z.; SHEN, B. Synergetic utilization of sewage sludge and microalgae: **A review and proposal**. **Bioresource Technology Reports**, v. 19, jul. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101146>.

XUE, K.; LI, J.; CHEN, H.; XU, G.; LIU, T. Development of a novel power generation system based on the co-combustion of agriculture biomass and sludge integrated with solar-aided sludge drying. **Energy Conversion and Management**, v. 253, jan. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115185>.