



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁSESCOLA DE
FORMAÇÃO DE PROFESSORES E HUMANIDADES
CURSO DE QUÍMICA - LICENCIATURA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE TÉCNICAS SUSTENTAVEIS PARA A
RECICLAGEM DE EPS: ENERGIA SOLAR E SOLVENTE ORGÂNICO**

GUSTAVO ALVINO DE SOUSA

GOIÂNIA
2025

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA DE FORMAÇÃO DE PROFESSORES E HUMANIDADES
CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE TÉCNICAS SUSTENTÁVEIS PARA A
RECICLAGEM DE EPS: ENERGIA SOLAR E SOLVENTE ORGÂNICO**

Autor: Gustavo Alvino de Sousa
Orientador (a): Profa. Dra. Sandra Regina Longhin

Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado ao Curso
de Licenciatura em Química,
como parte dos requisitos
exigidos para a conclusão do
curso.

GOIÂNIA
2025

**ANÁLISE COMPARATIVA DE TÉCNICAS SUSTENTÁVEIS PARA A
RECICLAGEM DE EPS: ENERGIA SOLAR E SOLVENTE ORGÂNICO**

Gustavo Alvino de Sousa

Orientador (a): Profa. Dra. Sandra Regina Longhin

Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado ao Curso
de Licenciatura em Química,
como parte dos requisitos
exigidos para a conclusão do
curso.

GOIÂNIA
2025



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA DE FORMAÇÃO DE PROFESSORES E HUMANIDADES
CURSO DE LICENCIATURA em QUÍMICA

Ata de Defesa Pública do Trabalho de Conclusão de Curso

Aos três dias do mês de dezembro de 2025, às 20:30 horas, em sessão pública na sala 406 do Bloco A da Área 6 da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, na presença da Banca Examinadora presidida pela Professora Dra Sandra Regina Longhin, e composta pelos examinadores:

1. Membro: Me. Flávio Carvalho Marques
2. Membro: Esp. Thales Mateus Barbosa de Melo.

O estudante GUSTAVO ALVINO de SOUZA apresentou o Trabalho de Conclusão de Curso II intitulado:

ANÁLISE COMPARATIVA DE TÉCNICAS SUSTENTÁVEIS PARA A RECICLAGEM DE EPS: ENERGIA SOLAR E SOLVENTE ORGÂNICO.

como requisito curricular indispensável para a integralização do Curso de Licenciatura em Química. Após reunião em sessão reservada, a Banca Examinadora deliberou e decidiu pela Aprovação do referido trabalho, divulgando o resultado formalmente ao estudante e demais presentes.

Na qualidade de Presidente da Banca, lavrei a presente ata que segue assinada por mim, pelos demais examinadores e pelo estudante. Fica formalmente definido que a nota final será registrada somente após a correção e entrega da versão final do trabalho, dentro das normas exigidas pelo Curso e pela PUC Goiás.



Presidente da Banca Examinadora:
Orientadora: Profª Dra Sandra Regina Longhin



Membro
Prof. Me. Flávio Carvalho Marques



Membro
Prof. Thales Mateus Barbosa de Melo



Acadêmico
Gustavo Alvino de Souza

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus pais, Ramon Alvino da Silva e Marielly Ferreira de Sousa, por jamais terem desistido de mim. Se pude estar estudando hoje, é fruto do seu mais árduo trabalho e dedicação.

Agradeço imensamente aos meus amigos, que sempre foram um alicerce constante, oferecendo motivação e apoio durante todo o curso.

À minha orientadora, Dra. Sandra Regina Longhin, que, com sua paciência e conhecimento, não só me auxiliou em diversas situações técnicas, mas também me ajudou a enxergar o mundo de forma mais curiosa e crítica, destravando minha mente para a dura realidade do pensar.

Aos meus colegas de curso, por tornarem cada dia de aula um ambiente melhor e de aprendizado não só das matérias mas também sobre a vida.

E, por fim, agradeço a mim mesmo, por jamais ter desistido desta jornada que foi minha graduação e por realizar um sonho de infância.

RESUMO

O Poliestireno Expandido (EPS), amplamente utilizado na indústria, apresenta um grave desafio ambiental e logístico devido à sua baixa densidade, que dificulta o transporte e a reciclagem em larga escala. Este trabalho teve como objetivo avaliar o rendimento da redução de volume do EPS utilizando duas abordagens comparativas: o reprocessamento térmico com um aquecedor parabólico por meio da energia solar e a dissolução química com solventes orgânicos, d-limoneno, acetona e acetato de etila. Nos testes térmicos, o sistema solar demonstrou ser ineficaz na promoção da redução de volume, pois não alcançou de forma consistente a temperatura de transição vítrea do poliestireno, de aproximadamente 95-100 °C. Em contraste, os ensaios químicos confirmaram a alta eficiência da acetona e do acetato de etila na solubilização do EPS. Entretanto, o d-limoneno não obteve sucesso nas condições aplicadas, destacando a sensibilidade do processo à pureza do reagente e aos aditivos do polímero. Concluiu-se que a dissolução química é a rota mais viável para o processo. O estudo, contudo, reforça o potencial do aquecimento solar como tecnologia sustentável e complementar para a fase de recuperação dos solventes por destilação, oferecendo um caminho para o desenvolvimento de métodos e tecnologias de reciclagem de baixo custo.

Palavras-chave: Poliestireno Expandido; Reciclagem Química; Energia Solar; Reciclagem de EPS; Solventes Verdes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Distribuição dos resultados por palavra-chave/ano de publicação.....	3
Figura 2: Fórmula representacional do Poliestireno.....	4
Figura 3: Representações das configurações absolutas R e S do limoneno.....	6
Figura 4: Fórmula representacional da Acetona.....	7
Figura 5: Fórmula representacional do Acetato de etila.....	9
Figura 6: Esfera de Solubilidade de Hansen.....	10
Figura 7: Sistema em funcionamento do aquecedor parabólico.....	11
Figura 8 Esquema do sistema do aquecedor parabólico com o reator.....	12
Figura 9: Resíduo final utilizando o limoneno como solvente no béquer.....	19
Figura 10: Densidade do resíduo de EPS em Acetona.....	21
Figura 11: Densidade do resíduo de EPS em Acetato de etila.....	21
..	
Figura 12: Emissão de fuligem do resíduo de EPS em Acetona.....	22
Figura 13: Emissão de fuligem do resíduo de EPS em Acetato de etila.....	22
Figura 14: Resíduo do EPS com Acetato de etila.....	23
Figura 15: Resíduo do EPS com Acetona.....	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades do poliestireno.....	5
Tabela 2: Propriedades do d-limoneno.....	7
Tabela 3: Propriedades da acetona.....	8
Tabela 4: Propriedades do acetato de etila.....	9
Tabela 5: Primeiro experimento: Dados do reator com o ar atmosférico.....	14
Tabela 6: Segundo experimento: Dados do reator com 2 L de água.....	15
Tabela 7: Terceiro experimento: Dados do reator com 4 L de água.....	16
Tabela 8: Quarto experimento: Dados do reator com 200 mL de água.....	16
Tabela 9: Quinto experimento: Dados do reator com 4 L de água, em espaço aberto.....	17
Tabela 10: Sexto experimento: Dados do reator com 4 L de água, em espaço aberto.....	18

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAPEX – Associação Brasileira do Poliestireno Expandido

EPS – Poliestireno Expandido

FDS – Ficha de Dados de Segurança

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

PE – Ponto de Ebulição

PS – Poliestireno

T_g – Temperatura de Transição Vítrea

WCSO – *Waste Cooking Oil* (Óleo de Cozinha Residual)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO.....	2
3. ESTADO DA ARTE.....	2
4. REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
4.1 Poliestireno.....	3
4.2 d-Limoneno.....	5
4.3 Acetona.....	7
4.4 Acetato de etila.....	8
4.5 Dissolução de Polímeros.....	9
4.6 Energia Solar.....	10
5. METODOLOGIA.....	12
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	14
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	25
REFERÊNCIAS	27

1. INTRODUÇÃO

O Poliestireno Expandido (EPS), conhecido popularmente no Brasil pelo nome comercial Isopor®, é um material versátil desenvolvido a partir de pequenas pérolas de poliestireno que se expandem pela ação de vapor e pentano, atingindo até 50 vezes o seu volume inicial (Martins, 2016). Sua composição final é de cerca de 98% de ar e apenas 2% de poliestireno em massa. Essa estrutura lhe confere propriedades de baixa densidade, leveza, e alta capacidade de isolamento térmico, o que justifica seu amplo emprego em setores como a construção civil e na fabricação de embalagens descartáveis (Cella, 2017; Grote e Silveira, 2010).

Entretanto, a característica que confere versatilidade ao EPS é, paradoxalmente, a que dificulta sua gestão pós-consumo. Embora o material seja tecnicamente reciclável, a relação massa/volume do material resulta em elevados custos logísticos para o transporte e a coleta em larga escala, limitando a viabilidade econômica da reciclagem (Cella *et al.*; 2018). A inadequada disposição final do EPS representa um desafio ambiental crítico, pois seu tempo de decomposição pode chegar a 500 anos (Silva *et al.*, 2023), contribuindo para o aumento de custos com aterros sanitários (Maharana; Negi; Mohanty, 2007). Além disso, o descarte incorreto leva à fragmentação do material em microplásticos, que persistem no meio ambiente e causam contaminação da biota marinha (Gregory, 2009; Gomes; Alves; Bouzon, 2016).

No Brasil, o cenário da gestão de resíduos sólidos urbanos é um problema. Dados recentes indicam que 31,9% dos municípios brasileiros ainda destinam resíduos sólidos a lixões. (IBGE, 2024), e a taxa média nacional de reciclagem de resíduos sólidos urbanos é de apenas 8,3% (Abrema, 2024). Frente a essa realidade e alinhada à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305 de 2010 (Brasil, 2010), a busca por métodos mais eficientes de valorização do EPS se torna crucial, visando tanto a sustentabilidade ambiental quanto a economia de matéria-prima.

Atualmente, a reciclagem química, que utiliza solventes orgânicos para dissolver o polímero, surge como uma estratégia para reduzir o volume e facilitar o reaproveitamento (Kampouris; Papaspyrides; Lekakou, 1987). Contudo, a eficácia desse processo tem como impacto ambiental na escolha de solventes, visto que muitos dos compostos tradicionalmente utilizados, como o tolueno, xileno e o clorofórmio, apresentam considerável toxicidade e volatilidade, apresentando a necessidade de uma busca por solventes alternativos. (Silva, 2021).

Diante dos desafios logísticos e ambientais da cadeia do EPS e da necessidade de soluções mais limpas, este trabalho busca explorar e comparar a eficiência de métodos alternativos de reaproveitamento, com foco na sustentabilidade. A pesquisa investiga duas técnicas: o reprocessamento térmico, que utiliza a energia solar por meio de um aquecedor parabólico solar como fonte de calor, e a dissolução química, empregando solventes orgânicos de menor impacto ambiental, como a acetona e o acetato de etila, e o solvente natural d-limoneno.

2. OBJETIVO

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o rendimento da redução de volume de EPS para encaminhamento para posterior reciclagem, adotando como fonte de energia um aquecedor parabólico solar e, por dissolução com solventes orgânicos, sendo estes o d-limoneno, acetona e acetato de etila.

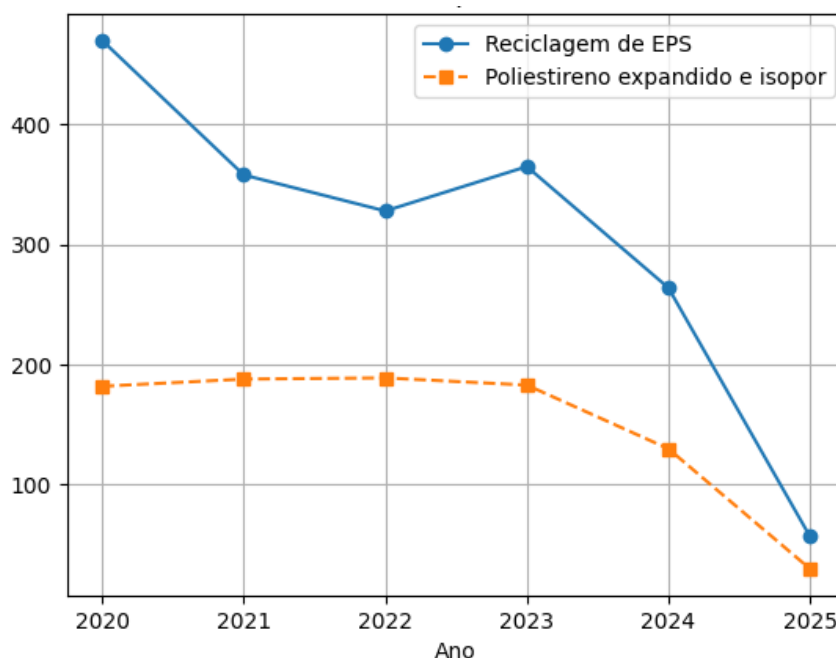
3. ESTADO DA ARTE

A pesquisa de produção científica utilizando a ferramenta BUSCA^{Ad} v. 2.9.3, buscador acadêmico construído sobre o as técnicas do Microsoft Excel que se interligar com 10 base de dados, sendo estes bancos de dados de teses e dissertações, revistas e o Google Acadêmico. Este buscador permite utilizar sequências de palavras-chave e descritores, geradas a escolha do operador para a obtenção dos resultados a partir da combinação.

Para esta pesquisa utilizou-se as palavras chaves “reciclagem de eps” “poliestireno expandido” e “isopor” para pesquisa no Buscad. Inicialmente os dados do buscador apresentaram 17 resultados para “reciclagem de eps”, 3 para “reciclagem de eps e isopor” e 12 para “reciclagem de eps e poliestireno expandido”. A união de uma sequência com as 3 como palavras chaves resultou em 13 trabalhos, onde destes 4 são do período de 2020 a 2024, três dissertações de mestrado e um artigo científico. Dentre estas, a dissertação de mestrado de Silva, Estudo de técnicas de reciclagem do Poliestireno Expandido: Uma revisão sistemática e uma proposta de reaproveitamento, de 2021, foi escolhida como a literatura principal do trabalho.

A distribuição dos dados obtidos por meio da plataforma Google Acadêmico, quantidade em função do ano de publicação, estão apresentados na Figura 1.

Figura 1: Distribuição dos resultados por palavra-chave/ano de publicação.



Fonte: Autoria própria, 2025.

O levantamento realizado apresentou os seguintes resultados: 470 resultados para reciclagem de eps e 182 resultados para poliestireno expandido e isopor em 2020, 358 resultados para reciclagem de eps e 188 resultados para poliestireno expandido e isopor em 2021, 328 resultados em reciclagem de eps e 189 resultados para poliestireno expandido e isopor em 2022, 365 resultados para reciclagem de eps e 183 resultados em poliestireno expandido e isopor em 2023, 264 resultados para reciclagem de eps e 130 resultados para poliestireno expandido e isopor em 2024, e até o presente momento em 2025, 57 resultados para reciclagem de eps e 30 resultados para poliestireno expandido e isopor.

4. REFERÊNCIAL TEÓRICO

4.1 POLIESTIRENO

O poliestireno (PS) é um polímero termoplástico obtido a partir da polimerização do monômero estireno (C_8H_8), pertencente à classe dos hidrocarbonetos vinílicos aromáticos. Trata-se de um dos plásticos mais produzidos e utilizados em escala mundial, devido ao baixo custo de produção, à versatilidade de aplicação e às boas propriedades

físico-químicas (Oliveira, 2006; Ulrich, 1982).

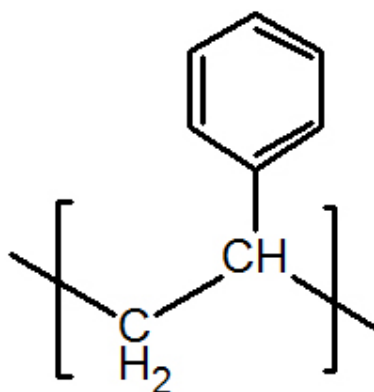
Do ponto de vista estrutural, o poliestireno é um homopolímero linear formado pela repetição da unidade monomérica de estireno, que contém um grupo fenila ($-C_6H_5$) ligado à cadeia principal do polímero. Essa estrutura confere ao PS propriedades particulares, como rigidez, transparência e facilidade de coloração, tornando-o adequado para diversas aplicações industriais e domésticas (Oliveira, 2006; Garcia *et al.*, 2009).

Entre suas principais características físico-químicas, destacam-se a baixa densidade, a reduzida absorção de umidade, a facilidade de processamento e moldagem, e a boa estabilidade dimensional. No entanto, o PS apresenta baixa resistência térmica e química, sendo suscetível à ação de solventes orgânicos e a elevadas temperaturas (Oliveira, 2006; Ulrich, 1982).

O poliestireno é utilizado na fabricação de utensílios domésticos, componentes eletrônicos, materiais de isolamento térmico e acústico, embalagens alimentícias, artigos de laboratório e elementos de construção civil, além de ser empregado como material de proteção contra impacto em embalagens de equipamentos (Oliveira, 2006; García *et al.*, 2009; Ulrich, 1982).

A estrutura química do poliestireno, composta por unidades repetitivas de estireno, é usualmente representada em forma linear, conforme ilustrado na Figura 2, enquanto a Tabela 1 apresenta algumas propriedades físico-químicas típicas descritas na literatura, como densidade, ponto de fusão, resistência térmica e módulo de elasticidade. Essas propriedades, aliadas à facilidade de processamento e à ampla disponibilidade do monômero de estireno, justificam a posição de destaque do poliestireno entre os polímeros sintéticos utilizados em escala global (Cella, 2017).

Figura 2: Fórmula representacional do Poliestireno



Fonte: FISPQ – Poliestireno (Innova, 2018).

Tabela 1: Propriedades do poliestireno.

Propriedade	Valor	Unidade
Massa específica	1,040~1,065	kg/m ³
Temperatura de transição vítrea	95-100	°C
Temperatura de fusão	240	°C
Temperatura de auto-ignição	490	°C
Calor Específico (C _p)		
0 °C	1,185~1,139	kJ/kg K
50 °C	1,256~1,394	kJ/kg K
100 °C	1,838~1,821	kJ/kg K
Calor de combustão	-4,33x10 ³	kJ/mol
Calor de fusão	8,37±0,08	kJ/mol
Condutividade térmica		
0 °C	0,105	W/m K
50 °C	0,116	W/m K
100 °C	0,128	W/m K

Fonte: Adaptado de Cella, 2017 p. 37.

4.2 d-limoneno

O d-limoneno¹ é uma alternativa natural e não tóxica para solventes convencionais, como o tolueno e a acetona, usados no processo de dissolução do poliestireno expandido (EPS). Ele é classificado como um composto orgânico da classe dos monoterpenos, que são hidrocarbonetos formados por duas unidades de isopreno (C₅H₈), totalizando dez átomos de carbono (C₁₀H₁₆), cujas características das substâncias são serem voláteis e aromáticas (American Chemical Society, 2023).

O limoneno é um monoterpeno cíclico quiral que existe em duas formas enantioméricas distintas, sendo o R-(+)-limoneno e S-(–)-limoneno (Figura 3), que são imagens especulares não sobreponíveis entre si, resultado da presença de um centro quiral assimétrico na molécula. A forma R-(+)-limoneno, também conhecida como D-limoneno, está presente majoritariamente nos óleos essenciais de frutas cítricas, como a laranja e o

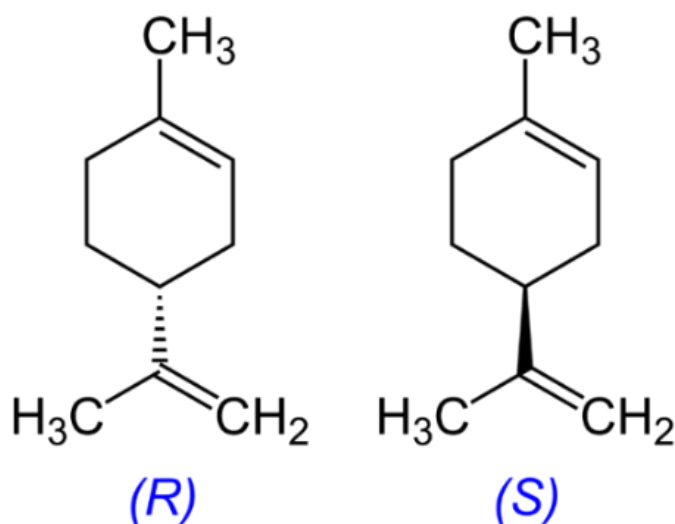
¹ d-limoneno: Fórmula Molecular C₁₀H₁₆, [Nome IUPAC](#) 1-metil-4-prop-1-en-2-il-ciclohexeno, [Massa molar](#) 136.24 g/mol, [Densidade](#) 0.8411 g/cm³, Rotação óptica = 87° - 102°, [Ponto de fusão](#), -74,35 °C, [Ponto de ebulição](#) 176 °C.

limão, conferindo-lhes o aroma característico.

Por outro lado, o S-(–)-limoneno (ou L-limoneno) pode ser encontrado em coníferas, como os pinheiros, e possui um odor resinoso, semelhante ao da terebintina (Solomons; Fryhle, 2018). Embora possuam a mesma fórmula molecular ($C_{10}H_{16}$), os dois enantiômeros interagem de forma diferente com o sistema olfativo humano, o que explica as diferenças perceptíveis de aroma, em um mecanismo semelhante ao encaixe de uma chave em uma fechadura quiral,

Em processos industriais, o limoneno é geralmente obtido na forma R por extração dos óleos cítricos, enquanto o racemato (mistura 1:1 dos dois enantiômeros), chamado dipenteno, pode ser formado a temperaturas elevadas, como por volta de $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Solomons; Fryhle, 2018).

Figura 3: Representações das configurações absolutas R e S do limoneno.



Fonte: Ficha de Dados de Segurança – R-Limoneno e S-Limoneno (Merck, 2025a).

Devido à sua origem natural, baixa toxicidade e boa capacidade de solvência, o d-limoneno é considerado um solvente “verde”², sendo utilizado como alternativa sustentável a solventes orgânicos derivados do petróleo, devido ao impacto ambiental, propiciando assim uma alternativa sustentável para a reciclagem do EPS, com menores riscos à saúde humana e ao meio ambiente (Silva, 2021).

² Na Química, o termo “verde” refere-se ao desenvolvimento de processos e produtos que reduzem ou eliminam substâncias tóxicas, priorizando prevenção da poluição, eficiência de materiais e segurança em todas as etapas da síntese (LENARDÃO *et al.*, 2003; SERRÃO; SILVA, 2010).

Tabela 2: Propriedades do d-limoneno.

Massa específica	0.845	g/cm ³
Temperatura de fusão	-74	°C
Temperatura de ebulição	176	°C
Temperatura de auto-ignição	237	°C
Calor latente de vaporização	39,5	kJ/mol

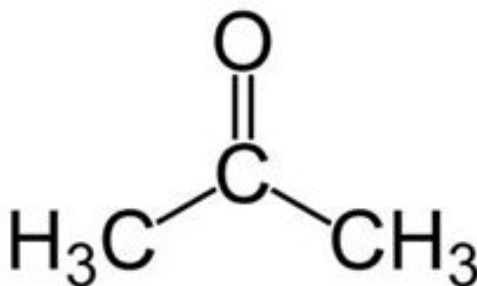
Fonte: Adaptado de Cella, 2017 p 48.

4.3 Acetona

A acetona, propan-2-ona, (Figura 4) é um composto orgânico pertencente à classe das cetonas, de fórmula molecular C₃H₆O, e é considerada o solvente orgânico simples mais amplamente utilizado na indústria química. Apresenta-se como um líquido incolor, volátil e altamente inflamável, miscível em água e em diversos solventes orgânicos (Solomons; Fryhle, 2018). Sua estrutura é formada por um grupo carbonila (C=O) ligado a dois grupos metila, conferindo-lhe polaridade moderada e alta capacidade de dissolver substâncias tanto polares quanto apolares (Atkins; Jones, 2011).

Devido à sua elevada volatilidade e baixo ponto de ebulição (56 °C), a acetona é amplamente utilizada em processos de limpeza de superfícies, extração, síntese química e reciclagem de polímeros, incluindo o poliestireno expandido (EPS), no qual atua como solvente orgânico eficaz na despolimerização e dissolução do material (American Chemical Society, 2023). Contudo, seu uso industrial apresenta riscos toxicológicos e ambientais significativos, pois a acetona é um composto orgânico volátil (COV), contribuindo para a formação de ozônio troposférico e poluição fotoquímica quando liberada em grandes quantidades (Silva, 2021).

Figura 4: Fórmula representacional da Acetona.



Fonte: Ficha de Dados de Segurança – Acetona (Merck, 2025b).

Tabela 3: Propriedades da acetona.

Propriedade	Valor	Unidade
Massa específica (20°C)	0,791	kg/m ³
Temperatura de fusão	-95	°C
Temperatura de ebulição	56,0	°C
Temperatura de auto-ignição	540	°C
Calor latente de vaporização	501	kJ/mol

Fonte: Shell Chemicals, 2025.

Apesar de ser considerada relativamente menos tóxica que solventes aromáticos como o tolueno, a acetona ainda representa risco de irritação dérmica e ocular, além de inflamabilidade elevada (Lide, 2005). Assim, embora eficaz para dissolver o EPS, seu emprego demanda cuidados e ventilação adequada, sendo desejável sua substituição por solventes renováveis e de baixa toxicidade, como o d-limoneno, em processos de reciclagem sustentável.

4.4 Acetato de etila

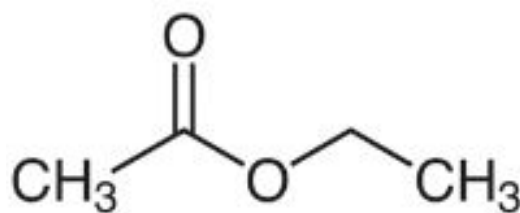
O acetato de etila, etanoato de etila, (Figura 5) é um éster orgânico de fórmula molecular $C_4H_8O_2$, formado pela reação entre o ácido acético (CH_3COOH) e o etanol (CH_3CH_2OH) em processo de esterificação de Fischer (Solomons; Fryhle, 2018). Trata-se de um líquido incolor, volátil e de odor adocicado característico, amplamente empregado como solvente polar aprótico na indústria de tintas, cosméticos, adesivos e na purificação de produtos farmacêuticos (Atkins; Jones, 2011).

Por ser miscível em diversos solventes orgânicos, o acetato de etila apresenta boa capacidade de solvência para polímeros como o poliestireno, sendo utilizado em processos de dissolução e reciclagem química do EPS, nos quais age rompendo as forças intermoleculares entre as cadeias do polímero (American Chemical Society, 2023). Além disso, é considerado um solvente de toxicidade moderada, com menor impacto ambiental em comparação a solventes aromáticos derivados do petróleo, embora sua volatilidade e inflamabilidade ainda exijam controle rigoroso em escala industrial (Silva, 2021).

Por sua origem parcialmente renovável quando obtido a partir de etanol de cana-de-açúcar e biodegradabilidade relativamente alta, o acetato de etila tem sido incluído em estudos de solventes verdes para substituição de compostos tóxicos, destacando-se como uma alternativa intermediária entre solventes tradicionais e biocompostos naturais como

o d-limoneno (Tang; Zhang; Zhou, 2020).

Figura 5: Fórmula representacional do Acetato de etila.



Fonte: Ficha de Dados de Segurança – Acetato de etila (Merck, 2025c).

O elevado custo do d-limoneno no mercado atual tem limitado sua aplicação em processos de reciclagem. Como alternativa, avaliou-se o uso do acetato de etila, que apresenta menor custo e temperatura de saturação mais baixa (77 °C), o que favorece a etapa de evaporação do solvente e amplia a viabilidade de outros métodos de reciclagem de soluções poliméricas. Ademais, na literatura, existem poucos estudos e registros de processos de reciclagem do poliestireno (PS) por dissolução utilizando acetato de etila (Cella, 2017).

Tabela 4: Propriedades do acetato de etila.

Propriedade	Valor	Unidade
Massa específica (25°C)	88,1	g/m ³
Temperatura de fusão	-83,1	°C
Temperatura de ebulição	77,1	°C
Temperatura de auto-ignição	420	°C
Calor latente de vaporização	35	kJ/mol

Fonte: Adaptado de Cella, 2017, p 49

4.5 Dissolução de polímeros

O estudo da solubilidade de polímeros é de grande relevância para a compreensão de processos de reciclagem, recuperação e modificação de materiais poliméricos. O primeiro modelo teórico-experimental destinado à previsão da solubilidade de polímeros foi proposto por Hildebrand e Scott (1949), com base no conceito de energia coesiva. Segundo esse modelo, a dissolução ocorre de maneira favorável quando as energias coesivas do polímero e do solvente são semelhantes, isto é, quando há compatibilidade entre suas interações intermoleculares. Embora eficiente para compostos não polares, o

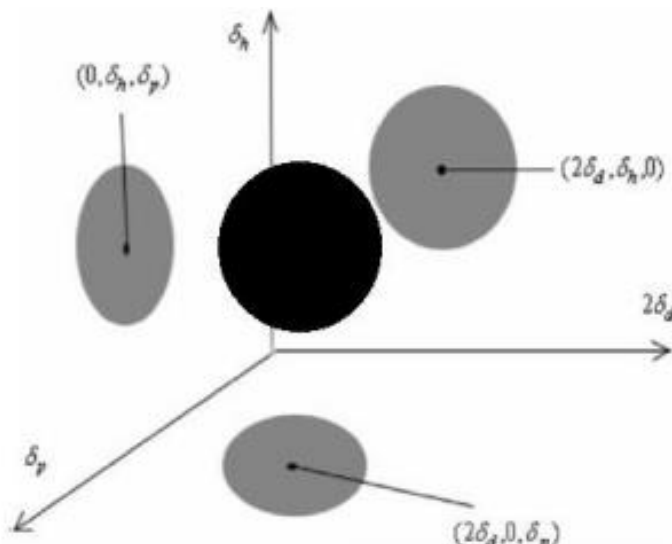
modelo de Hildebrand mostrou-se limitado para sistemas que envolvem forças polares e ligações de hidrogênio.

Buscando aprimorar esse conceito, Hansen (1967) introduziu um modelo mais abrangente, que considera o parâmetro de solubilidade total (δ) como sendo o resultado do somatório vetorial de três diferentes contribuições energéticas: as forças de dispersão (δ_D), as interações polares ou dipolo-dipolo (δ_P) e as forças de ligação por pontes de hidrogênio (δ_H). (Hansen, 1967; Canevarolo Júnior, 2006).

As propriedades de solubilidade de um polímero em determinado solvente podem ser visualizadas por meio do modelo tridimensional de Hansen, no qual as coordenadas correspondentes ao polímero formam o centro de uma esfera de solubilidade. O raio dessa esfera (Figura 6) representa a diferença máxima de afinidade permitida para que ocorra uma dissolução completa.

Assim, solventes cujos parâmetros de solubilidade se localizam dentro da esfera são considerados bons solventes, enquanto aqueles situados fora dela são classificados como solventes ruins. Essa representação pode também ser expressa em projeções tridimensionais, relacionando dois dos três parâmetros de Hansen, como ilustrado na Figura 6 (Hansen, 1967; Hansen, 2007; Miller-chou, 2003; Canevarolo Júnior, 2006).

Figura 6: Esfera de Solubilidade de Hansen.



Fonte: adaptado de Cella, 2017, p. 51

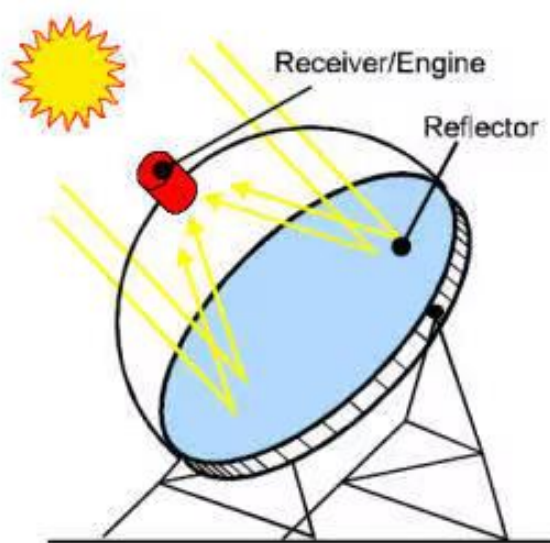
4.6 Energia solar

A energia solar é uma das fontes renováveis mais promissoras para substituição parcial dos combustíveis fósseis, sendo caracterizada pela radiação eletromagnética

emitida pelo Sol, que atinge a superfície terrestre com potência média de aproximadamente 1.000 W/m^2 em condições ideais (Cresesb, 2022). Essa energia pode ser aproveitada de diferentes formas, como na geração elétrica fotovoltaica, no aquecimento solar de fluidos e, mais recentemente, em aplicações de aquecimento direto de materiais e reatores térmicos experimentais. O aproveitamento térmico ocorre pela conversão da radiação solar em calor por meio da absorção de energia em superfícies metálicas ou revestidas, sendo essa energia transferida ao meio reacional por condução e convecção (Duffie; Beckman, 2013).

Os sistemas de concentração solar parabólica utilizam superfícies espelhadas curvas que refletem e concentram a radiação incidente em um ponto ou linha focal, onde é posicionado o elemento a ser aquecido, como demonstrado de forma representacional pela Figura 7, para o processo do funcionamento.

Figura 7 – Sistema em funcionamento do aquecedor parabólico.



Fonte: SolarPACES (2025). Disponível em: <https://www.solarweb.net/img/paginas/disco-parabolico.jpg>.

Esse princípio é explorado em coletoras solares de foco parabólico, empregadas na geração de vapor e em experimentos de fusão de metais e polímeros. O grau de concentração e a eficiência do sistema dependem de fatores como ângulo de incidência, geometria do refletor, área de captação, refletividade do material e condições atmosféricas locais (Lovegrove; Stein, 2012).

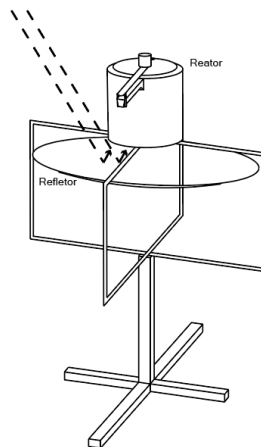
5. METODOLOGIA

A metodologia adotada para a condução deste estudo se baseou, inicialmente, em uma pesquisa bibliográfica. O objetivo desta etapa foi estabelecer o quantitativo da literatura sobre a temática central: a reciclagem de poliestireno expandido (EPS) como é descrito na sessão sobre o estado da arte.

Para a técnica por energia solar, após os estudos na literatura sobre o tema, foi elaborado um experimento com o objetivo de avaliar a viabilidade da recuperação térmica do poliestireno expandido, utilizando energia solar concentrada como fonte de aquecimento. Esse procedimento teve como finalidade investigar se a radiação solar, quando concentrada por meio de um sistema parabólico refletor, seria capaz de promover a deformação ou fusão térmica do material, atingindo sua temperatura vítrea, de modo a possibilitar a obtenção de um poliestireno compactado sem a utilização de solventes químicos e sobre pressão atmosférica.

Para a realização do ensaio, foram utilizadas amostras de EPS provenientes de embalagens alimentícias pós-consumo, previamente limpas, secas e raspadas manualmente até a obtenção de pequenas partículas irregulares. As amostras foram acondicionadas em um reator, posicionado sob um sistema parabólico refletor, com o foco do espelho direcionado à superfície metálica do reator, permitindo a concentração dos raios solares incidentes. O conjunto foi instalado em uma primeira etapa, sobre uma laje a 3,0 m do solo. A seleção do local permitiu que o conjunto fosse exposto diretamente ao sol, especialmente no período de maior irradiância, entre 11:00 h e 15:00 h. A Figura 8 demonstra um esquema do aquecedor parabólico utilizado para os experimentos.

Figura 8: Esquema do sistema do aquecedor parabólico com o reator.



O reator utilizado é feito de alumínio, com capacidade máxima de quatro litros e meio (4,5L), e possuía válvula de escape de pressão para garantir a segurança durante sob aquecimento. O sistema foi posicionado em um local onde a radiação solar concentrada incidia de forma direta, priorizando ficar sem interferência de ventos. Essa ausência de circulação de ar no entorno favorece o isolamento térmico natural, reduzindo as perdas de calor por convecção. Assim, o conjunto ficou exposto a temperaturas elevadas, uma vez que as paredes da laje atuavam como barreiras físicas à dissipação de energia, permitindo que o reator recebesse e retivesse de maneira mais eficiente a radiação refletida pelo disco parabólico solar.

A metodologia experimental com solvente orgânico d-limoneno foi baseada no trabalho de Silva (2021), que investigou a dissolução do poliestireno expandido (EPS) em solventes orgânicos alternativos. No procedimento descrito originalmente pela autora, a matéria-prima é inicialmente triturada em pequenos pellets, com tamanho médio de 4 mm, a fim de promover maior homogeneidade e aumentar a superfície de contato com o solvente. Em seguida, o solvente d-limoneno (99 % de pureza) é adicionado ao EPS em um béquer na proporção de 15 g de EPS para 50 mL de solvente, sendo a mistura submetida à agitação por aproximadamente 15 minutos, até a completa dissolução do polímero. Após a dissolução, o sistema é transferido para um funil de separação, permanecendo em repouso por um período de 12 horas para decantação. A camada inferior (solvente) é então drenada, enquanto a camada superior (polímero dissolvido) é misturada a óleo de cozinha residual (WCSO), previamente filtrado, em proporção volumétrica 1:1, promovendo a precipitação do poliestireno. O material sólido obtido é prensado entre folhas de papel absorvente para remoção do excesso de óleo e deixado secar à temperatura ambiente.

Na experimentação se teve adaptações no volume do solvente e no tempo de agitação. O solvente d-limoneno (97 % de pureza) foi adquirido da empresa QUIMISUL e utilizado sem purificação adicional. O EPS foi obtido a partir de embalagens comerciais, triturado manualmente e pesado em 15 g por ensaio. Foram realizados testes adicionais variando-se o volume de solvente (de 50 mL até 500 mL) e o tempo de contato (até 24-48 horas), mantendo-se as demais condições experimentais originais.

Foi conduzido também ensaios com o objetivo de avaliar o comportamento de solubilidade do poliestireno expandido (EPS) em solventes orgânicos convencionais de maior polaridade. Para essa etapa, foram selecionados o acetato de etila e a acetona,

ambos reportados na literatura como solventes eficazes na dissolução de poliestireno, conforme descrito por Cella (2017), Mumbach (2022) e Cezário (2019) e pela disponibilidade dos solventes no laboratório. A metodologia para estes solventes foi baseada na literatura das dissertações dos autores acima. O propósito desses testes foi comparar a eficiência dos diferentes solventes na despolimerização física do EPS e observar o comportamento da mistura na presença de diferentes solventes.

A escolha da acetona e do acetato de etila foi fundamentada não apenas pela eficácia na dissolução do poliestireno descrita na literatura, mas também pelo seu perfil de toxicidade e volatilidade controlada, sendo o acetato de etila, em especial, considerado um solvente parcialmente renovável e de baixo impacto ambiental (Cella, 2017; Mumbach, 2022).

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O experimento realizado com o sistema de aquecimento parabólico solar, iniciou com seu primeiro ensaio apenas com o EPS no reator com o ar atmosférico, em um dia que teve temperatura máxima de 35,5 °C, observou-se que a temperatura máxima atingida no reator de aço inoxidável foi de 42,3 °C, conforme apresentado na Tabela 5

Tabela 5: Primeiro experimento: Dados do reator com o ar atmosférico.

Horário do Dia (h)	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura do Reator (°C)
13:30	32	42,3
14:30	32	42,8
15:30	32	39,6
16:30	32	40,6
17:30	32	33,9

Fonte: Autoria própria, 2025

O resultado estava distante da temperatura de transição vítrea do EPS, demonstrado pelos valores que foram alcançados na tabela 5, indicando que a energia térmica fornecida pelo sistema solar apenas com o ar não foi suficiente para promover a transição vítrea nem iniciar processos de fusão ou degradação. Foi-se estudado e decidido após esse teste em utilizar água como condutor térmico para os próximos ensaios.

No segundo ensaio, o tempo de observação foi estendido e o reator foi preenchido

com aproximadamente 2 L e meio de água, mantendo-se o sistema de aquecimento parabólico solar. A sensação térmica local era de 35,6 °C, sendo a temperatura máxima observada de 74,2 °C às 13:30 h, como apresentado na Tabela 6.

O acréscimo de água favoreceu a transferência de calor por convecção dentro do reator, promovendo uma melhor distribuição térmica e reduzindo perdas por condução para as paredes metálicas, atuando com resultados maiores que o EPS fechado no reator apenas com o ar atmosférico do primeiro ensaio.

Tabela 6: Segundo experimento: Dados do reator com 2L de água.

Horário do Dia (h)	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura do Reator (°C)
06:30	26	22,9
09:30	26	36,0
10:30	26	43,2
11:30	26	53,0
12:30	33	67,3
13:30	33	74,2
14:30	33	63,5
15:30	33	57,7
16:30	33	41,8

Fonte: Autoria própria, 2025

Em comparação ao ensaio anterior, no qual o EPS estava apenas com o ar atmosférico, nota-se uma variação da temperatura máxima atingida no reator. Demonstrando que a água serve como um condutor térmico mais eficiente para os ensaios do experimento. Mas ainda precisava verificar qual era a melhor relação da quantidade de água para o experimento que seria mais eficaz, então para os próximos ensaios se teve uma diferença em relação a quantidade de água em busca da que apresentasse os melhores resultados para alcançar a temperatura vítrea do EPS.

No terceiro ensaio, o reator foi preenchido com o dobro da quantidade de água, mantendo-se o arranjo experimental e tempo de exposição ao sol. Esse ensaio apresentou uma temperatura próxima a temperatura vítrea do poliestireno, atingindo 94,2 °C às 14:30 h, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7: Terceiro experimento: Dados do reator com 4L de água.

Horário do Dia (h)	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura do Reator (°C)
06:30	24	25,2
09:30	24	59,4
10:30	24	71,8
11:30	24	61,2
12:30	34	68,2
13:30	34	94,2
14:30	34	73,5
15:30	34	68,2

Fonte: Autoria própria. 2025

Esse resultado, pode estar associado a melhores condições de irradiação solar no dia do experimento. Outro fator que pode ter contribuído é a maior estabilidade térmica conferida pelo volume total de água, reduzindo as perdas de calor e mantendo o sistema aquecido por mais tempo.

Ainda assim, a temperatura obtida permaneceu abaixo da temperatura vítrea do poliestireno, impossibilitando a fusão ou deformação significativa do EPS. Em síntese, mesmo com o volume total de água. Para o quarto ensaio, foi usado 200ml de água, como visto na Tabela 8.

Tabela 8: Quarto experimento: Dados do reator com 200 mL de água.

Horário do Dia (h)	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura do Reator (°C)
06:30	26	25,4
09:30	26	70,2
10:30	26	75,3
11:30	26	71,5
12:30	30	69,5
13:30	30	73,5
14:30	30	79,3
15:30	30	70,5

Fonte: Autoria própria, 2025

Essa modificação não resultou em um aumento significativo da temperatura interna, atingindo um máximo de 79,3 °C às 14:30 h, conforme demonstrado na Tabela 5. Esse valor representa uma caída considerável em relação ao terceiro experimento, no qual a temperatura máxima havia sido de 94,2 °C, assim os seguintes experimentos utilizaram os 4 L de água visto que foi a proporção com os maiores resultados.

No quinto ensaio o sistema precisou ser reposicionado no chão do estacionamento, em substituição à laje onde os testes anteriores foram realizados. As condições climáticas do dia apresentaram temperaturas ambiente mais baixas (26–30 °C) e céu parcialmente nublado, o que reduziu significativamente a incidência direta da radiação solar sobre o refletor parabólico, como visto nos resultados da tabela 9.

Tabela 9: Quinto experimento: Dados do reator com 4L de água, em espaço aberto.

Horário do Dia (h)	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura do Reator (°C)
06:30	25	24,7
09:30	25	28,8
10:30	25	31,7
11:30	25	33,8
12:30	29	35,3
13:30	29	57,4
14:30	29	70,2
15:30	29	66,8

Fonte: Autoria própria, 2025

Como consequência, a temperatura máxima do reator foi de 70,2 °C às 14:30 h, inferior à observada no teste anterior, mesmo com volume idêntico de água. Esse resultado evidencia a forte dependência do aquecimento solar em relação à irradiância e ao alinhamento do sistema com o Sol, fatores que influenciam diretamente a eficiência da concentração térmica.

No último dia de medições, o sexto ensaio teve o experimento repetido, entretanto pelas condições do dia como chuva impedindo os dados pela parte da manhã, baixa irradiância solar, com céu predominantemente nublado e temperaturas ambiente variando entre 22 °C e 28 °C. Nessas circunstâncias, observou-se uma queda acentuada na eficiência térmica do sistema, com a temperatura máxima do reator atingindo apenas 39,2 °C às 13:30 h, conforme a Tabela 10.

Tabela 10: Sexto experimento: Dados do reator com 4L de água, em espaço aberto.

Horário do Dia (h)	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura do Reator (°C)
11:30	22	33,8
12:30	28	41,8
13:30	28	39,2
14:30	28	37,8
15:30	28	35,9

Fonte: Autoria própria, 2025

O desempenho inferior pode ser atribuído à redução da intensidade dos raios solares incidentes, que compromete a capacidade de concentração do refletor parabólico. Além disso, a ausência de incidência solar direta e contínua impediu o acúmulo gradual de calor no interior do reator, resultando em oscilações térmicas e perda rápida de temperatura após o pico máximo. Esse resultado reforça que o sistema de aquecimento solar utilizado depende fortemente de condições meteorológicas favoráveis, apresentando baixa eficiência em dias nublados.

Os dados experimentais mostram que o sistema contendo água apresentou desempenho térmico significativamente superior ao sistema sem água, o que evidencia a diferença de capacidade calorífica entre ambos os meios. O ar, por possuir baixa densidade e calor específico reduzido, aquece e esfria rapidamente, enquanto a água retém energia térmica por mais tempo, promovendo um aquecimento mais estável e prolongado. Segundo Atkins e Paula (2018), a quantidade de calor necessária para variar a temperatura de uma substância depende diretamente de sua capacidade calorífica; assim, substâncias com altos valores de calor específico, como a água, atuam como eficientes reguladores térmicos. No reator, a água funcionou como um reservatório de calor, absorvendo e liberando energia de forma mais lenta, o que explica as temperaturas mais elevadas e consistentes observadas nos ensaios.

A capacidade da água de alcançar e manter temperaturas elevadas sob irradiação solar está associada ao seu alto calor específico ($4,18 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Conforme discutido por Quagliano e Vallarino (1979), as fortes interações intermoleculares, especialmente ligações de hidrogênio, dificultam a variação de temperatura, exigindo maior energia para romper parcialmente essas interações antes que o aquecimento efetivo ocorra. Isso justifica o comportamento observado nos experimentos: a água aqueceu de forma gradual e manteve o calor mesmo diante de flutuações de insolação. De acordo com Atkins e

Paula (2018), essa propriedade é crucial em diversos contextos naturais e tecnológicos, permitindo grande absorção de energia sem variações bruscas de temperatura, o que é coerente com os resultados obtidos.

A análise comparativa entre os ensaios indica que o volume de água e as condições de insolação foram os fatores mais determinantes para o aquecimento do reator. Volumes menores (200 mL) responderam mais rapidamente às variações de radiação, enquanto volumes maiores (2 a 4 L) apresentaram maior estabilidade térmica, porém aquecimento mais lento. Dias com maior irradiação solar coincidiram com temperaturas mais altas, enquanto condições nubladas ou mudanças de posicionamento do sistema reduziram significativamente o desempenho.

De modo geral, o sistema parabólico solar mostrou-se funcional, alcançando temperaturas superiores a 70 °C sob condições ideais, embora incapaz de atingir acima da temperatura de transição vítrea do poliestireno. Os resultados indicam a necessidade de aprimoramentos no projeto, como aumento da área refletora e otimização do foco parabólico, além de testes em períodos de maior radiação solar.

Em vista a técnica com solvente orgânico, foi-se pesado 15 g de EPS em um béquer de 1,000 mL e adicionando 50 mL em 50 mL do solvente d-limoneno até 500 mL na busca da redução de volume, adaptando a literatura baseada. Observou-se que não houve dissolução completa do EPS no solvente d-limoneno (Figura 9) mesmo após variação da proporção solvente/polímero e do tempo de agitação. A amostra apresentou formação de um precipitado sólido e fase turva, indicando baixa solvência do d-limoneno utilizado. Tentativas posteriores de reação do material com óleo de cozinha residual (WCSO) e com etanol absoluto, indicados também como um solvente para precipitar o EPS na literatura também não resultaram na formação de um produto sólido.

Figura 9 – Resíduo final utilizando o limoneno como solvente.



Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Esse resultado pode estar relacionado a diferenças na composição química do EPS utilizado, visto que produtos comerciais podem conter aditivos, pigmentos e retardantes de chama que alteram sua estrutura e reduzem a afinidade com o solvente. Além disso, o tamanho das partículas de EPS ($\approx 4 \text{ mm}$) podem ter limitado a taxa de difusão do solvente nas células do material, dificultando o processo de dissolução. Assim, embora a metodologia tenha sido adaptada e baseada no trabalho de Silva (2021) nos experimentos realizados em laboratório não houve a reprodução de seus resultados.

Em continuidade às etapas experimentais, foram realizados testes complementares utilizando diferentes solventes orgânicos além do d-limoneno, com o objetivo de avaliar a influência da polaridade na solubilização do EPS. Os solventes empregados foram a acetona ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) e o acetato de etila ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$), conforme as proporções baseadas pela literatura (Cella, 2017; Mumbach, 2022; Cezário, 2019). Para os ensaios, foram pesados 30 g de EPS, adicionando-se 60 mL de acetona e, em outro sistema, 240 mL de acetato de etila, sendo este posteriormente precipitado com 150 mL de etanol absoluto que funciona como um solvente no qual o polímero apresenta baixa solubilidade e então precipitando.

O comportamento de dissolução, tempo de reação e eficiência na recuperação do polímero em diferentes sistemas foram os parâmetros avaliados. Todos os experimentos foram realizados à temperatura ambiente, com agitação manual e observação visual do processo de solubilização.

Nos testes realizados com acetona e acetato de etila, observou-se que a acetona apresentou dissolução mais rápida e completa do EPS, formando uma solução homogênea em poucos minutos. Já o acetato de etila demandou maior volume do solvente e tempo de contato como soluto, e a dissolução foi parcial, havendo necessidade de adição de etanol absoluto para a precipitação do polímero. Esses resultados corroboram as observações de Cella (2017), que relatou melhor desempenho de solventes cetônicos em comparação aos ésteres no processo de solubilização do poliestireno.

Além disso, verificou-se que a evaporação da acetona ocorreu rapidamente, considerando seu ponto de ebulição e a temperatura ambiente em Goiânia, neste período com média em torno de 35°C , o que pode dificultar sua recuperação em escala industrial. O acetato de etila por outro lado, mostrou potencial de uso em processos sustentáveis por apresentar menor toxicidade e odor mais suave, embora sua eficiência de dissolução seja inferior.

Com o intuito de confirmar a natureza polimérica do material utilizado nos

experimentos, foram realizados testes físicos qualitativos de identificação de poliestireno (PS). Esses ensaios exploram propriedades características do PS, como densidade, combustão, solubilidade e comportamento mecânico.

O primeiro teste consistiu na avaliação da densidade, em que pequenas amostras foram imersas em água à temperatura ambiente em uma proveta de 50ml (Figura 10 e 11). O material apresentou flutuação parcial, condizente com as faixas de densidade esperadas para o poliestireno expandido e extrudado ($0,015$ a $0,040 \text{ g/cm}^3$), confirmando sua natureza leve e celular.

Figura 10 – Densidade do resíduo de EPS em Acetona



Fonte: Arquivo pessoal. 2025

Figura 11 – Densidade do resíduo de EPS em Acetato de etila.



Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Em seguida, foi realizado o teste de combustão, aproximando a amostra de uma

chama em ambiente ventilado. Observou-se ignição rápida, chama amarelada, emissão de fumaça escura com fuligem abundante e odor adocicado característico, compatível com o comportamento descrito para o poliestireno, que libera vapores de estireno durante a queima (Figura 12 e 13).

Figura 12 – Emissão de fuligem do resíduo de EPS em Acetona



Fonte: Arquivo pessoal, 2025

Figura 13 – Emissão de fuligem do resíduo de EPS em Acetato de etila.



Fonte: Arquivo pessoal, 2025

Por fim, foi realizado o teste de ruído e quebra, no qual pequenas amostras rígidas foram deixadas cair sobre uma superfície de vidro e submetidas a flexão manual. Os materiais produziram som metálico e oco ao impacto, típico do PS, e apresentou ruptura

frágil e superfície de fratura lisa e brilhante (Figura 14 e 15), reforçando o diagnóstico. Notou-se ainda que, nas amostras dissolvidas em acetato de etila e posteriormente secas, o material apresentou textura ligeiramente emborrachada, característica da fusão parcial das cadeias poliméricas.

Figura 14 – Resíduo do EPS com Acetato de etila



Fonte: Arquivo pessoal, 2025

Figura 15 – Resíduo do EPS com Acetona



Fonte: Arquivo pessoal, 2025

Os resultados obtidos nos testes de densidade, combustão, solubilidade e comportamento mecânico confirmam que o material empregado nos experimentos é de fato poliestireno, validando sua utilização nas etapas de dissolução e reciclagem propostas neste trabalho. Dessa forma, a combinação de abordagens químicas, uso de solventes e térmicas, energia solar concentrada, permitiu ampliar a compreensão das rotas possíveis para a reciclagem sustentável do EPS, avaliando tanto a eficiência técnica quanto a viabilidade prática e ambiental dos métodos.

Um ponto relevante observado durante a pesquisa refere-se ao potencial de reaproveitamento dos solventes utilizados na dissolução do EPS. Tanto a acetona quanto o acetato de etila apresentam baixa viscosidade, alta volatilidade e pontos de ebulição relativamente baixos (56 °C e 77 °C, respectivamente), o que possibilita sua recuperação por evaporação controlada ou destilação simples. A reutilização desses solventes reduz significativamente o custo global do processo e minimiza o impacto ambiental, alinhando-se aos princípios da economia circular.

No contexto econômico, observa-se que a acetona P.A. apresenta atualmente valores que variam aproximadamente entre R\$ 40,00 e R\$ 80,00 por litro, a depender da pureza, fornecedor e volume adquirido, com preços menores sendo encontrados principalmente em embalagens maiores. Já o acetato de etila P.A. ou ACS apresenta faixa de preço geralmente entre R\$ 45,00 e R\$ 80,00 por litro, podendo variar conforme especificações de pureza e condições de fornecimento, já que são ambos controlados pela Polícia Federal.

Dessa forma, a escolha entre os solventes deve considerar não apenas sua capacidade de dissolução do EPS, mas também o custo operacional e a viabilidade de recuperação por destilação ou evaporação controlada, de modo a reduzir despesas e impactos ambientais. O acetato de etila, por sua menor toxicidade, odor menos agressivo e origem parcialmente renovável (derivado de processos fermentativos), configura-se como alternativa mais sustentável em processos de maior escala, enquanto a acetona se destaca em aplicações laboratoriais pela alta eficiência e baixo custo.

Fazendo a análise comparativa, as duas técnicas trabalhadas apresentam abordagens e limitações bastante distintas para a reciclagem do EPS. A técnica térmica, baseada no aquecimento por concentração de energia solar em um sistema parabólico, mostrou-se dependente de variáveis externas como irradiância, condições climáticas e alinhamento do refletor. Embora o uso de água como meio de transferência térmica tenha melhorado significativamente a estabilidade e os valores de temperatura alcançados em comparação ao sistema contendo apenas ar, o método não foi capaz de atingir de forma consistente a temperatura de transição vítrea do poliestireno, o que inviabilizou a fusão efetiva do material. Ainda assim, trata-se de uma alternativa energeticamente limpa, de baixo custo operacional e alinhada aos princípios da sustentabilidade, apresentando potencial de otimização com melhorias no projeto do concentrador e maior controle das condições de exposição solar.

Em contraste, a técnica química por dissolução em solventes orgânicos mostrou

maior eficiência na redução de volume e na recuperação do poliestireno, especialmente com o uso da acetona, que promoveu dissolução rápida e completa do EPS à temperatura ambiente. O acetato de etila, apesar de apresentar menor eficiência de solubilização, destacou-se como uma opção mais sustentável devido à menor toxicidade e possibilidade de origem renovável, exigindo apenas etapas adicionais de precipitação. Diferentemente da técnica térmica, o método químico independe de condições climáticas e permite maior controle do processo, porém envolve custos associados à aquisição e recuperação de solventes, além de cuidados ambientais e legais. Assim, enquanto o aquecimento solar se mostra uma alternativa válida do ponto de vista ambiental, mas limitado tecnicamente, a dissolução em solventes apresenta maior eficácia prática, configurando-se como uma rota mais viável no contexto experimental.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em um primeiro momento, esperava-se que o experimento apresentaria resultados conforme a literatura, porém, os testes realizados apresentaram limitações quanto à dissolução do material e à obtenção do produto desejado. Os resultados obtidos podem estar relacionados a fatores, como o material do reator (aço), as condições ambientais de ensaio e o posicionamento do sistema sob a radiação solar.

O experimento demonstrou o potencial na pesquisa do uso da energia solar como recurso viável e de baixo custo para processos de recuperação térmica. A concentração da radiação por meio de um sistema parabólico mostrou-se válido, indicando que com pesquisas futuras com melhorias no reator e ajuste de ângulos de incidência solar, podem alcançar resultados mais expressivos. A proposta, portanto, continua sendo em foco ambiental, pois busca o aproveitamento de uma fonte de energia limpa e renovável na reciclagem de resíduos plásticos, especialmente o EPS, cuja decomposição natural é extremamente lenta e prejudicial ao meio ambiente.

Quanto ao uso de solventes, observou-se que a acetona e o acetato de etila apresentaram bom desempenho na solubilização do poliestireno, confirmando os dados relatados na literatura. Contudo, a aplicação prática desses reagentes enfrenta barreiras relacionadas à sua toxicidade, volatilidade e restrições legais, já que alguns solventes orgânicos possuem controle de uso pela Polícia Federal e pelo Exército, além disso, o processo com acetato de etila requer etapas adicionais, como a precipitação com etanol absoluto, o que aumenta a complexidade experimental. Os custos e a possibilidade de

reaproveitamento dos solventes são fatores determinantes para a viabilidade do processo, uma vez que a recuperação por destilação poderia reduzir o impacto econômico e ambiental da técnica.

Vale ressaltar que os resultados e a metodologia deste trabalho oferecem a possibilidade para produzir um material para ser incorporado como estudo de caso em cursos de Ensino Técnico em Química, atuando como um ponto de partida concreto para atividades de discussão em sala de aula focadas na conscientização ambiental e na segurança industrial. O trabalho permitiu analisar os solventes empregados no processo de dissolução do EPS, o que estimula os alunos a debaterem os riscos à saúde ocupacional, a gestão de resíduos químicos e a busca por alternativas de solventes verdes menos prejudiciais. Adicionalmente, o estudo aborda o problema do descarte inadequado de resíduos de EPS em ambientes abertos, destacando sua atuação como vetor significativo para a proliferação de microplásticos e reforçando a importância da reciclagem como barreira de contaminação. Dessa forma, a proposta de reciclagem explorada no trabalho transforma um problema ambiental em um recurso, incentivando os futuros técnicos a aplicarem os princípios da Química Verde em suas práticas, cultivando uma visão crítica e uma ética profissional voltada para a sustentabilidade.

Por fim, destaca-se que, embora o limoneno não tenha apresentado os resultados esperados nas condições deste estudo, a literatura científica indica sua eficiência como solvente verde para o EPS, sendo uma alternativa derivada de fontes naturais e com baixa toxicidade. Diante desses aspectos, conclui-se que a continuidade das pesquisas envolvendo o uso de energia solar e ensaios de dissolução com solventes alternativos pode representar uma contribuição para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para a posterior reciclagem do poliestireno expandido no Brasil.

REFERÊNCIAS

- ABREMA – Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos.** Reciclagem de resíduos chega a 8% no país com trabalho informal, aponta estudo. Publicado em 12/12/2024. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/2024/12/12/reciclagem-de-residuos-chega-a-8-no-pais>. Acesso em: 08 maio 2025.
- AGÊNCIA IBGE.** Municípios brasileiros: destinação de resíduos e coleta seletiva 2023. Brasília: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/>. Acesso em: 17 out. 2025.
- AMERICAN CHEMICAL SOCIETY.** *Chemistry of solvents: Acetone and ethyl acetate profiles*. Washington, D.C.: ACS Publications, 2023.
- AMERICAN CHEMICAL SOCIETY.** *Molecule of the Week: Limonene*. 2023. Disponível em: <https://www.acs.org/molecule-of-the-week/archive/l/limonene.html>. Acesso em: 15 maio 2025.
- ATKINS, P.; JONES, L.** Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.
- ATKINS, P.; PAULA, J. De.** Físico-Química. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- BRASIL.** Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 15 maio 2025.
- CANEVAROLO JÚNIOR, S.V.** Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2ª edição. Editora Artliber. São Paulo, 2006.
- CELLA, R. F.** Avaliação da viabilidade técnica de processos de reciclagem de espuma semirrígida de poliestireno por meio da dissolução. 2017. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.
- CELLA, R. F.; MUMBACH, G. D.; ANDRADE, K. L.; OLIVEIRA, P.; MARANGONI, C.; BOLZAN, A.; BERNARD, S.; MACHADO, R. A. F.** *Polystyrene recycling processes by dissolution in ethyl acetate*. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 135, n. 18, p. 46208, 10 maio 2018.
- CELLA, R. F.** Reciclagem de espumas semi-rígidas de poliestireno pela dissolução em terpenos e secagem em secador de tambor. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.
- CEZÁRIO, A. C.** Caracterização de compósito formado por EPS reciclado em solução de acetato de etila e argila branca modificada. 2019. 76 f. Trabalho de Formatura (Engenharia de Materiais) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito.** Energia solar: fundamentos e aplicações. Rio de Janeiro: CEPEL, 2022.

Disponível em: <https://www.cresesb.cepel.br/>. Acesso em: 22 out. 2025.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.

GARCÍA, M. T.; DUQUE, G.; GRACIA, I.; LUCAS, A. de; RODRÍGUEZ, J. F. *Recycling extruded polystyrene by dissolution with suitable solvents. Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 11, n. 1, p. 2–5, 12 jan. 2009.

GREGORY, M. R. *Environmental implications of plastic debris in marine settings: entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 364, n. 1526, p. 2013–2025, 2009.

GROTE, Z. V.; SILVEIRA, J. L. Análise energética e exergética de um processo de reciclagem de poliestireno expandido (isopor). *Revista Mackenzie de Engenharia e Computação*, São Paulo, v. 3, n. 3, p. 9–27, 2010. Disponível em: https://www.mackenzie.br/fileadmin/Mantenedora/CPAD/Revistas/engenharia_computacao/v3n3/artigo01.pdf. Acesso em: 8 maio 2025.

HANSEN, C.M. *Hansen solubility parameters: a user's handbook*. 2nd ed. Taylor & Francis Group, 2007.

HANSEN, C.M. *The three dimensional solubility parameter and solvent diffusion coefficient*. Danish Technical Press. Copenhagen, 1967.

HILDEBRAND, J.; SCOTT, R. *The solubility of non-electrolytes*. 3. ed. New York: Reinhold Publishing Corporation, 1949.

IBGE. MUNIC 2023: 31,9% dos municípios brasileiros ainda despejam resíduos sólidos em lixões. 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/41994-munic-2023-31-9-dos-municipios-brasileiros-ainda-despejam-residuos-solidos-em-lixoes>. Acesso em: 13 dez. 2025.

INNOVA S.A. Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico – Poliestireno. Data de emissão: 04 jul. 2018. Disponível em: <https://innova.com.br/>. Acesso em: 09 nov. 2025.

KAMPOURIS, E. M.; PAPASPYRIDES, C. D.; LEKAKOU, C. N. *A model recovery process for scrap polystyrene foam by means of solvent systems. Conservation & Recycling*, v.10, n.4, p.315-319, 1987.

LENARDAO, E. J.; FREITAG, R. A.; MIGUEL, D.; BATISTA, A. C. F.; SILVEIRA, C. da C. “Green Chemistry” – Os 12 princípios da Química Verde e sua inserção nas atividades de ensino e pesquisa. *Química Nova*, v. 26, n. 1, p. 123-129, 2003.

LIDE, D. R. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 86th ed. Boca Raton: CRC Press, 2005.

LOVEGROVE, K. STEIN, W. *Concentrating Solar Power Technology: Principles, Developments and Applications*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012.

MAHARANA, T.; NEGI, Y. S.; MOHANTY, B. Review Article: Recycling of Polystyrene. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, v. 46, n. 7, p. 729–736, 2007.

- MARTINS, A. P. G.** Avaliação de custos na produção de Poliestireno Expandido (EPS) reciclado e virgem. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Polímeros) – Faculdade de Tecnologia de Mauá (FATEC Mauá), Centro Paula Souza, São Paulo, 2016. Disponível em: https://ric.cps.sp.gov.br/bitstream/123456789/172/1/20161S_MARTINSAnnaPaulaGrando_CD2681.pdf. Acesso em: 20 out. 2025.
- MERCK S/A.** Ficha com Dados de Segurança – DL-Limonene. Código 814546. Data de revisão: (informada no próprio documento). Disponível em: <https://www.merckmillipore.com/>. Acesso em: 09 nov. 2025a.
- MERCK S/A.** Ficha com dados de segurança: Acetato de etila para análise EMSURE® ACS, ISO, Reag. Ph Eur. Versão 8.9. Data de revisão: 07 out. 2025. Data de impressão: 09 out. 2025. Disponível em: <https://www.merckgroup.com>. Acesso em: 07 nov. 2025b.
- MERCK S/A.** Ficha com dados de segurança: Acetona para análise EMSURE® ACS, ISO, Reag. Ph Eur. Versão 8.13. Data de revisão: 07 out. 2025. Data de impressão: 09 out. 2025. Disponível em: <https://www.merckgroup.com>. Acesso em: 07 nov. 2025c.
- MILLER-CHOU, B. A.; KOENIG, J. L.** A review of polymer dissolution. *Progress in Polymer Science*. v. 28, p. 1223–1270. 2003.
- MUMBACH, G. D.** Avaliação da reciclagem de resíduos poliestirênicos pelo método de dissolução. 2022. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.
- OLIVEIRA, P.F.** Reciclagem de Embalagens de Alimentos Produzidas a partir de Poliestireno Extrusado Pós-Consumo. 2006. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- QUAGLIANO, J. V.; VALLARINO, P.** Química Geral. 3. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1979.
- SERRÃO, C. R. G.; SILVA, M. D. B.** A Química Verde presente nos artigos da Revista Química Nova: a divulgação científica dos últimos 10 anos. In: XV Encontro Nacional de Ensino de Química, Brasília, 2010. Anais Brasília: SBQ, 2010.
- SILVA, M. F. B.** Estudo de técnicas de reciclagem do Poliestireno Expandido: Uma revisão sistemática e uma proposta de reaproveitamento. 2021. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.
- SHELL CHEMICALS.** *Acetone: Technical Data Sheet*. [S.l.]: Shell Chemicals, 2017. Disponível em: https://www.shell.com/business-customers/chemicals/our-products/acetone/_jcr_content/root/main/containersection-0/simple/item/links/item0.stream/1646637408840/cf032ef91e4bf05a2e97c2b76c15b3ce94d44416/acetone-dec-year-seventeen.pdf. Acesso em 15 dez 2025
- SILVA, M. F. B.; CAMPOS, A. de; FERREIRA, D. C.; ROCHA, V. C.; LEMOS, D. A.; GONÇALVES, J. C. S. I.; POLETO, C.; LUZ, M. S.** Reciclagem de poliestireno expandido (EPS): um processo ambientalmente favorável para a recuperação do poliestireno (PS) usando óleo de soja residual. *HOLOS*, [S. l.], v. 39, n. 5, e16351, 2023. DOI: 10.15628/holos.2023.16351. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/16351>. Acesso em: 8 maio

2025.

SOLARPACES. Sistema de disco parabólico para concentração solar. 2025.

Disponível em: <https://www.solarweb.net/img/paginas/disco-parabolico.jpg> . Acesso em: 22 out. 2025.

SOLOMONS, T. W. G.; FRYHLE, C. B. Química Orgânica. 12. ed. Porto Alegre: Bookman, 2018.

TANG, X.; ZHANG, J.; ZHOU, Z. *Green solvents in polymer processing and recycling. Journal of Cleaner Production*, v. 245, p. 118762, 2020.

ULRICH, H. *Introduction to Industrial Polymers. Hanser Publishers.* Germany, 1982.

Na elaboração e formatação final deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), foram utilizadas ferramentas de Inteligência Artificial (IA) generativa, especificamente o modelo ChatGPT (OpenAI) e o modelo Gemini (Google). A utilização dessas ferramentas limitou-se estritamente às seguintes atividades: Correção Ortográfica e Gramatical: Revisão da fluidez, coesão e correção de erros ortográficos e gramaticais em trechos já redigidos e Sugestão de Estrutura e Formatação: Auxílio na estruturação de seções específicas (como o Resumo, o Abstract e a Lista de Siglas) e adequação da notação científica.

É importante ressaltar que todo o conteúdo analítico, os resultados experimentais, as discussões, as conclusões e a interpretação dos dados são de autoria exclusiva do pesquisador, sob a orientação da Dra. Sandra Regina Longhin. A IA serviu unicamente como ferramenta de apoio à redação e formatação, garantindo a clareza e o rigor do texto acadêmico final.