

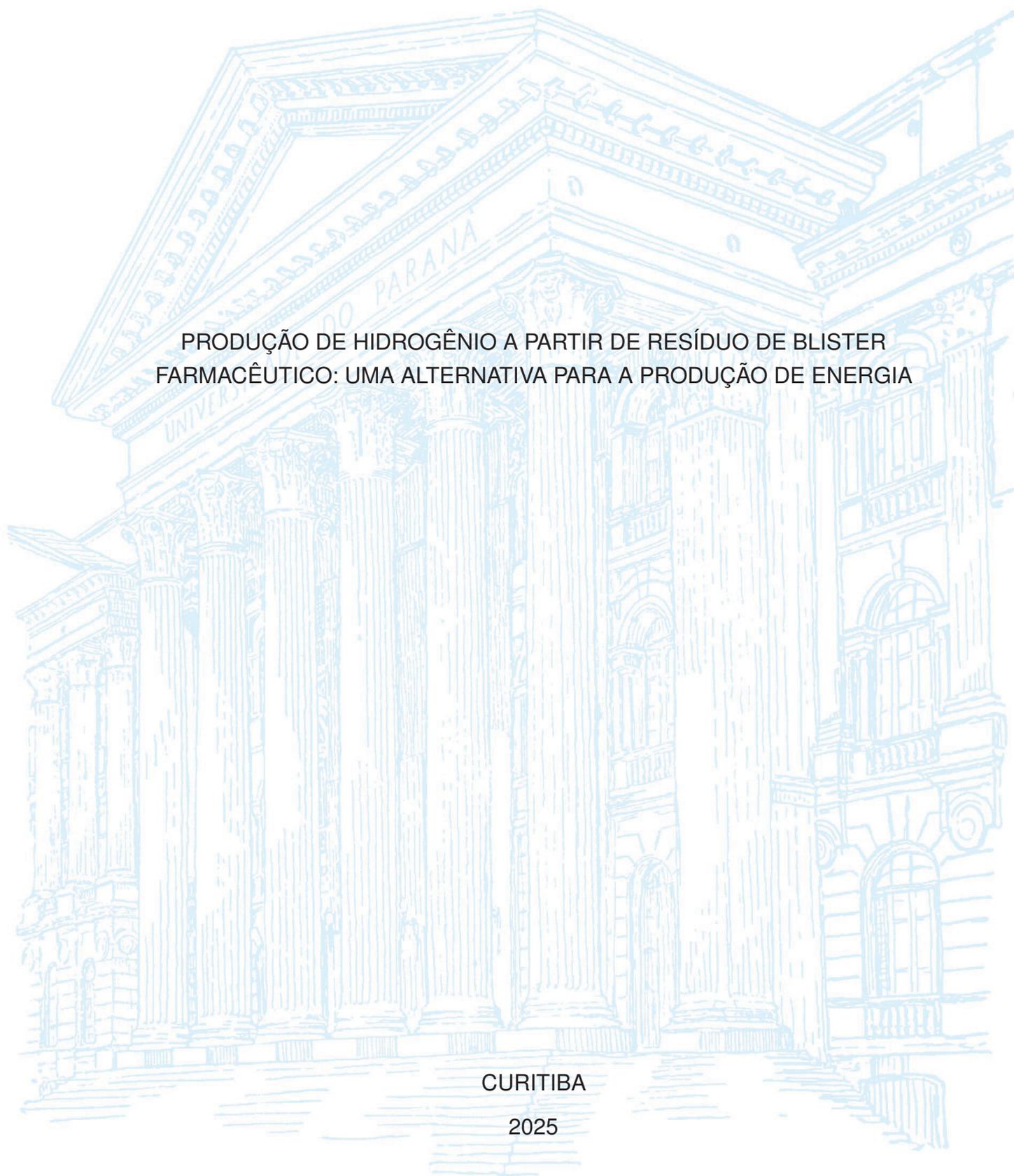
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

HENRIQUE DA ROSA GALESKI

PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DE RESÍDUO DE BLISTER
FARMACÊUTICO: UMA ALTERNATIVA PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA

CURITIBA

2025



HENRIQUE DA ROSA GALESKI

PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DE RESÍDUO DE BLISTER
FARMACÊUTICO: UMA ALTERNATIVA PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof^a Dr^a Maria José Jerônimo de Santana Ponte

Coorientador: Prof Dr Haroldo de Araújo Ponte

Coorientadora: Dr^a Renata Bachmann Guimarães Valt

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Galeski, Henrique da Rosa

Produção de hidrogênio a partir de resíduo de blister farmacêutico: uma alternativa para a produção de energia. / Henrique da Rosa Galeski. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof^a Dr^a Maria José Jerônimo de Santana Ponte

Coorientador: Prof Dr Haroldo de Araújo Ponte

Coorientadora: Dr^a Renata Bachmann Guimarães Valt

1. Alumínio. 2. Reciclagem. 3. Hidrogênio, produção de. 4. Economia circular. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Ponte, Maria José Jerônimo de Santana. IV. Ponte, Haroldo de Araújo. V. Valt, Renata Bachmann Guimarães. VI. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
MECÂNICA - 40001016040P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **HENRIQUE DA ROSA GALESKI**, intitulada: **PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DE RESÍDUO DE BLISTER FARMACÊUTICO: UMA ALTERNATIVA PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA**, sob orientação da Profa. Dra. MARIA JOSE JERONIMO DE SANTANA PONTE, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 30 de Maio de 2025.

Assinatura Eletrônica

05/06/2025 09:19:22.0

MARIA JOSE JERONIMO DE SANTANA PONTE

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

09/06/2025 17:55:44.0

FELLIPE SARTORI DA SILVA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

04/06/2025 17:11:09.0

MARCELO KAMINSKI LENZI

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

04/06/2025 18:24:36.0

CASSIA MARIA LIE UGAYA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

Centro Politécnico - CURITIBA - Paraná - Brasil

CEP 81531980 - Tel: 41 3361-3701 - E-mail: pgmec@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 457342

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://siga.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 457342

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso minha profunda gratidão a Deus, que me concedeu saúde, força e perseverança para superar todos os desafios e obstáculos que encontrei durante a realização deste trabalho.

Agradeço à Universidade Federal do Paraná, que me proporcionou inúmeras oportunidades ao longo do curso de Engenharia Química e agora na pós-graduação em Engenharia Mecânica (junto ao PGMEC), contribuindo significativamente para minha formação profissional.

Sou grato pelo apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP nº 50/2015 e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), em particular o PRH 12.1 da Universidade Federal do Paraná.

Agradeço também ao Complexo do Hospital de Clínicas da UFPR pela parceria no projeto de coleta de blisters dentro do hospital. Um agradecimento especial à Lidia Lima, presidente da Comissão de Gerenciamento de Resíduos do CHC-UFPR, que foi extremamente atenciosa e empenhada em ajudar a implementar a coleta, juntamente com a encarregada de higienização Gisele Juzvim que fez a coleta acontecer. Graças a essa colaboração foi possível constatar a produção de cerca de 2 kg de resíduo blister gerado a cada mês no hospital.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão aos meus orientadores: Maria José Jerônimo de Santana Ponte, Haroldo de Araújo Ponte e Renata Bachmann Guimarães Valt. Eles me proporcionaram a oportunidade de explorar o fascinante mundo da pesquisa científica, ofereceram uma valiosa contribuição intelectual e dedicação ao longo de toda a orientação.

Agradeço profundamente à minha família, que sempre esteve ao meu lado ao longo da minha jornada acadêmica e pessoal. Seu incentivo e apoio incondicional foram fundamentais para que eu pudesse perseguir e alcançar todos os meus sonhos.

Aos meus amigos e colegas que fizeram contribuições no decorrer da elaboração deste trabalho, em especial aos alunos de iniciação científica João Henrique Bachmann Guimarães Valt e Bruno Bianchi Deboni que contribuíram para a realização deste projeto de pesquisa.

Agradeço pelas análises realizadas em outros laboratórios, sendo eles o La-

boratório de Minerais e Rocha (LAMIR) e Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da Universidade Federal do Paraná. E ao Lucas Aparecido Bittencourt que realizou as análises de Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).

RESUMO

As embalagens farmacêuticas do tipo blister, compostas por multicamadas, principalmente de alumínio e policloreto de vinila (PVC), são amplamente empregadas para o acondicionamento e a proteção de medicamentos. No entanto, sua estrutura multicamada representa um significativo desafio ambiental, especialmente devido à complexidade de reciclagem. No Brasil, estima-se que cerca de 5,7 bilhões dessas embalagens foram comercializadas em 2022, com elevado percentual destinado ao descarte inadequado. Nesse contexto, o presente trabalho propõe uma abordagem sustentável voltada à separação dos materiais constituintes e ao aproveitamento do alumínio na produção de hidrogênio, alinhando-se aos princípios de valorização de resíduos e economia circular. A metodologia adotada consistiu na separação das camadas de alumínio e PVC por meio de tratamento químico com ácido fórmico, variando-se tempo e temperatura de reação. Posteriormente, avaliou-se a produção de hidrogênio a partir do alumínio recuperado, tanto em meio ácido (H_2SO_4) quanto alcalino (NaOH), sendo esta última condição utilizada também para a análise cinética da reação. Adicionalmente, foram implementados sensores baseados em plataformas Arduino e ESP-32, acoplados ao sensor MQ-8, para o monitoramento em tempo real da geração de H_2 . Os resultados demonstraram que o tratamento com ácido fórmico a $60\text{ }^\circ\text{C}$ foi eficaz na remoção de revestimentos superficiais (primer e tinta), deixando o alumínio exposto facilitando a etapa de obtenção de H_2 . A produção de hidrogênio foi significativamente mais elevada em meio alcalino, alcançando uma taxa de $33,16 \pm 0,71\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, valor aproximadamente cinco vezes superior ao obtido em meio ácido. A energia de ativação da reação obtida foi de $50,55\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. A instrumentação desenvolvida com sensores demonstrou boa resposta para a detecção da geração de H_2 , contribuindo para o controle do processo. Estimativas indicam que 1 kg de blister pode gerar até 1,25 L de H_2 (equivalente a 11,24 g de H_2), caracterizando a produção como hidrogênio verde. Conclui-se, portanto, que é tecnicamente viável a reciclagem de embalagens blister com a recuperação do PVC e a conversão do alumínio em energia, representando uma estratégia promissora para o tratamento de resíduos sólidos complexos, com ênfase na sustentabilidade, eficiência energética e inovação tecnológica.

Palavras-chaves: Blister; Reciclagem; Alumínio; Economia Circular; Produção de Hidrogênio.

ABSTRACT

Pharmaceutical blister packaging, composed of multilayers (primarily aluminum and polyvinyl chloride (PVC)) is widely used for the storage and protection of medications. However, its multilayer structure poses a significant environmental challenge, particularly due to the complexity of recycling. In Brazil, it is estimated that approximately 5.7 billion units of this type of packaging were sold in 2022, with a large portion being improperly discarded. In this context, the present study proposes a sustainable approach aimed at the separation of constituent materials and the utilization of aluminum for hydrogen production in alignment with the principles of waste valorization and circular economy. The adopted methodology consisted of separating the aluminum and PVC layers through chemical treatment with formic acid, under varying time and temperature conditions. Subsequently, hydrogen production from the recovered aluminum was evaluated in both acidic (H_2SO_4) and alkaline (NaOH) media, the latter also being used for kinetic analysis of the reaction. Additionally, sensors based on Arduino and ESP-32 platforms, coupled with the MQ-8 sensor, were implemented for real-time monitoring of H_2 generation. The results showed that treatment with formic acid at 60 °C was effective in removing surface coatings (primer and ink), exposing the aluminum and facilitating the hydrogen production step. Hydrogen generation was significantly higher in alkaline medium, reaching a rate of $33.16 \pm 0.71 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, approximately five times greater than that obtained in acidic medium. The activation energy of the reaction was determined to be $50.55 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. The instrumentation developed with sensors showed good sensitivity for the detection of H_2 generation, contributing to process control. It is estimated that 1 kg of blister packaging can produce up to 1.25 L of H_2 (equivalent to 11.24 g of H_2), characterizing the process as green hydrogen production. It is therefore concluded that the recycling of blister packaging, with the recovery of PVC and conversion of aluminum into energy, is technically feasible and represents a promising strategy for the treatment of complex solid waste, emphasizing sustainability, energy efficiency, and technological innovation.

Key-words: Blister; Recycling; Aluminum; Circular economy; Hydrogen Production.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – ESQUEMA APRESENTANDO A DESTINAÇÃO COMUM DO BLISTER E A REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO.	18
FIGURA 2 – CONSUMO E MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL.	21
FIGURA 3 – CONSUMO E MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.	22
FIGURA 4 – TIPOS MAIS COMUNS DE BLISTER.	25
FIGURA 5 – CAMADAS QUE COMPÕEM O BLISTER.	26
FIGURA 6 – PROCESSOS PARA OBTENÇÃO DE ALUMÍNIO METÁLICO. . .	28
FIGURA 7 – PROCESSO QUE OCORRE NO REATOR.	29
FIGURA 8 – CICLO DE VIDA DA GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DA REAÇÃO ALUMÍNIO ADVINDO DA BAUXITA.	30
FIGURA 9 – DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO POTENCIAL-PH PARA O SISTEMA ALUMÍNIO-ÁGUA, A 25 °C.	33
FIGURA 10 – BLISTER TRANSPARENTE UTILIZADO AO LONGO DESTA TRABALHO.	36
FIGURA 11 – FRAGMENTADORA UTILIZADA PARA REDUZIR O TAMANHO DE PARTÍCULA DAS EMBALAGENS BLISTER.	37
FIGURA 12 – HIDRAPULPER UTILIZADO PARA RETIRAR O PRIMER E ADESIVO EMPREGADOS NO ALUMÍNIO DAS EMBALAGENS BLISTER.	38
FIGURA 13 – MICRO POWER MONITOR (CAI-HW17).	39
FIGURA 14 – DIAGRAMA DE BLOCOS REPRESENTANDO OS PROCESSOS CONTIDOS NAS ETAPAS REALIZADAS NESTE ESTUDO. . . .	40
FIGURA 15 – DIAGRAMA DE BLOCOS APÓS ESCOLHA DA ROTA ALCALINA.	40
FIGURA 16 – ESPECTRÔMETRO CARY 630 FTIR.	41
FIGURA 17 – FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X PANALYTICAL, MODELO AXIOS MAX: TUBO RÓDIO 4 KV.	42
FIGURA 18 – MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA TESCAN VEGA3 LMU.	43
FIGURA 19 – DESENHO ESQUEMÁTICO DO SISTEMA UTILIZADO PARA A EXPOSIÇÃO DO ALUMÍNIO.	44
FIGURA 20 – ESQUEMA DO APARATO EXPERIMENTAL UTILIZADO NA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO COM AVALIAÇÃO DO VOLUME PRODUZIDO.	46
FIGURA 21 – SENSOR ARDUINO MQ-8.	52

FIGURA 22 – PLACA DE DESENVOLVIMENTO ARDUINO UNO.	52
FIGURA 23 – MÓDULO SD.	53
FIGURA 24 – SISTEMA COM SENSOR DE MEDIÇÃO DE HIDROGÊNIO E ARMAZENAMENTO DOS DADOS UTILIZANDO ARDUINO UNO E SD CARD.	53
FIGURA 25 – PLACA DE DESENVOLVIMENTO ESP32.	54
FIGURA 26 – SISTEMA COM SENSOR DE MEDIÇÃO DE HIDROGÊNIO E ESP32.	55
FIGURA 27 – RESULTADO FTIR ADESIVO.	57
FIGURA 28 – RESULTADO FTIR PARTE POLIMÉRICA.	57
FIGURA 29 – IMAGEM DO PERFIL DO BLISTER UTILIZADO NESTE ESTUDO, OBTIDO POR MEIO DO MEV.	58
FIGURA 30 – IMAGEM DO PERFIL DO BLISTER UTILIZADO NESTE ESTUDO COM AMPLIAÇÃO DE 800X APRESENTANDO O TAMANHO DAS CAMADAS OBSERVADAS.	59
FIGURA 31 – MAPAS DE VARREDURA POR EDS-MEV DO PERFIL DO BLIS- TER UTILIZADO NESTE ESTUDO.	60
FIGURA 32 – RESULTADOS VISUAIS DE TRATAMENTO FÓRMICO COM ME- NOR TEMPO DE TRATAMENTO.	62
FIGURA 33 – EMBALAGENS BLISTER ANTES E APÓS TRATAMENTO DE 30 <i>MIN</i> COM ÁCIDO FÓRMICO.	62
FIGURA 34 – TINTA E PRIMER RETIRADO DO BLISTER APÓS 0,5 H DE TRATAMENTO.	63
FIGURA 35 – MEV DO BLISTER COM TRATAMENTO DE ÁCIDO FÓRMICO E DA FOLHA DE ALUMÍNIO.	64
FIGURA 36 – GRÁFICO DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO PELO TEMPO DE EXPERIMENTO.	66
FIGURA 37 – GRÁFICO COM LINHAS DE TENDÊNCIA PARA OS ENSAIOS 1 E 2 REALIZADO COM ÁCIDO SÚLFÚRICO.	67
FIGURA 38 – GRÁFICO COM LINHAS DE TENDÊNCIA PARA OS ENSAIOS 3 E 4 REALIZADOS COM HIDRÓXIDO DE SÓDIO.	68
FIGURA 39 – POLÍMERO APÓS A ETAPA DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO COM ÁCIDO SULFÚRICO E HIDRÓXIDO DE SÓDIO.	68
FIGURA 40 – GRÁFICO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO (MEIO ALCALINO) EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA DIFERENTES TEMPOS DE TRATAMENTO COM ÁCIDO FÓRMICO EM 25 °C.	70
FIGURA 41 – GRÁFICO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO (MEIO ALCALINO) EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA DIFERENTES TEMPOS DE TRATAMENTO COM ÁCIDO FÓRMICO EM 50 °C.	72

FIGURA 42 – COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES RESULTADOS DE TEMPERATURA PARA CADA TEMPO DE TRATAMENTO COM ÁCIDO FÓRMICO	73
FIGURA 43 – GRÁFICO DA SUPERFICIE RESPOSTA DA TAXA DE REAÇÃO.	75
FIGURA 44 – CURVA DE NÍVEL DA TAXA DE REAÇÃO.	76
FIGURA 45 – SUPERFICIE RESPOSTA DA TAXA DE REAÇÃO PARA A EQUAÇÃO REDUZIDA.	77
FIGURA 46 – CURVA DE NÍVEL TAXA DE REAÇÃO PARA A EQUAÇÃO REDUZIDA.	77
FIGURA 47 – GRÁFICO DO AJUSTE DE ARRHENIUS.	81
FIGURA 48 – RESULTADOS DE LEITURA DO ARDUINO CONFORME O TEMPO.	83
FIGURA 49 – RESULTADOS DE LEITURA DO ARDUINO CONFORME O TEMPO.	84

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – FATORES UTILIZADOS NO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.	47
TABELA 2 – MATRIZ DO PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL (CCD) 2 ² .	48
TABELA 3 – RESULTADOS FRX BLISTER SEM TRATAMENTO	56
TABELA 4 – RESULTADO DOS TESTES DE SEPARAÇÃO DAS CAMADAS QUE COMPÕEM O BLISTER	61
TABELA 5 – RESULTADOS FRX APÓS TRATAMENTO	63
TABELA 6 – RESULTADOS EDS.	65
TABELA 7 – RESULTADOS DA QUANTIDADE DE ALUMÍNIO NO BLISTER .	65
TABELA 8 – COMPARAÇÃO ENTRE PVC NOVO E PVC RECICLADO QUANTO À ENERGIA E EMISSÕES DE CO ₂ EQUIVALENTE.	69
TABELA 9 – RESULTADOS DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO À 25 °C PARA DIFERENTES TEMPOS DE TRATAMENTO COM ÁCIDO FÓRMICO.	70
TABELA 10 – RESULTADOS DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO À 50 °C PARA DIFERENTES TEMPOS DE TRATAMENTO COM ÁCIDO FÓRMICO.	71
TABELA 11 – COEFICIENTES DA REGRESSÃO OLS.	74
TABELA 12 – RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DO MODELO.	78
TABELA 13 – CONSUMO ENERGÉTICO TOTAL CONSIDERANDO OS AQUE- CIMENTOS DE FORMA EXPERIMENTAL.	79
TABELA 14 – CONSUMO ENERGÉTICO TOTAL CONSIDERANDO OS AQUE- CIMENTOS DE FORMA TEÓRICA.	79
TABELA 15 – CONSUMO ENERGÉTICO TOTAL CONSIDERANDO OS AQUE- CIMENTOS DE FORMA TEÓRICA.	80

LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ADC	Conversor analógico-digital
CCD	Central Composite Design
EDS	Espectroscopia de Dispersão de Energia
EHF	Fragmentação eletro-hidráulica
FRX	Fluorescência de Raios X
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier
LCA	Análise do Ciclo de Vida
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OLS	Método de Regressão por Mínimos Quadrados Ordinários
PCTFE	Clorotrifluoroetileno
PET	Polietileno tereftalato
PMMA	Poli-n-butil metacrilato
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Cloroeto de polivinila
PVdC	Policloroeto de vinilideno
REN21	Rede de Políticas de Energia Renovável para o Século 21
WPB	Waste Pharmaceutical Blister

LISTA DE SÍMBOLOS

c	Calor específico
U	Coefficiente global de transferência de calor
R	Constante universal dos gases
k	Constantes de velocidade da reação
E_a	Energia de ativação
A	Fator pré-exponencial
m	Massa da solução
Q	Quantidade de energia
T	Temperatura
ΔT	Varição de temperatura
A	Área superficial exposta do recipiente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA	19
1.2	OBJETIVOS	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	PRODUÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA	21
2.2	HIDROGÊNIO: PROPRIEDADES, UTILIZAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL E FORMAS DE OBTENÇÃO	23
2.3	EMBALAGENS BLISTER	24
2.3.1	Polímero	26
2.3.2	Agente selante	27
2.3.3	Alumínio	28
2.4	RESÍDUO BLISTER FARMACÊUTICO	30
2.5	TRATAMENTOS PARA O BLISTER	31
2.6	TRATAMENTO ÁCIDO E ALCALINO DE ALUMÍNIO PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	MATERIAIS	36
3.2	MÉTODOS	39
3.2.1	Metodologia analítica	40
3.2.2	Etapa 1 - Separação das camadas	44
3.2.3	Estudo preliminar da produção de hidrogênio via rota ácida e alcalina	45
3.2.3.1	Avaliação da influência do tempo de tratamento com ácido fórmico (Etapa 1) na produção de hidrogênio (Etapa 2)	47
3.2.4	Etapa 2 - Produção de hidrogênio	47
3.2.5	Análise energética do tratamento de reciclagem dos blisters	49
3.2.6	Determinação da cinética da reação	50
3.2.7	Utilização de Arduino e sensor de hidrogênio	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1	CARACTERIZAÇÃO INICIAL DOS BLISTERES	56
4.2	ETAPA 1 - SEPARAÇÃO DAS CAMADAS	60
4.3	CARACTERIZAÇÃO APÓS TRATAMENTO COM ÁCIDO FÓRMICO DOS BLISTERES	63
4.4	ESTUDO PRELIMINAR DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VIA ROTA ÁCIDICA E ALCALINA	65
4.4.1	Resultado da avaliação da influência do tempo de tratamento com ácido fórmico (Etapa 1) na produção de hidrogênio (Etapa 2)	69
4.5	ETAPA 2 - PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO	74
4.6	RESULTADOS DA ANÁLISE ENERGÉTICA DO TRATAMENTO DE RECICLAGEM DOS BLISTERES	78
4.7	RESULTADOS OBTIDOS DA CINÉTICA DA REAÇÃO	81

4.8	RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO ARDUINO E DO SENSOR DE HIDROGÊNIO	82
5	CONCLUSÕES	85
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	87
	REFERÊNCIAS	89
	APÊNDICE 1 – RESULTADOS FTIR	96
1.1	RESULTADO ADESIVO	97
1.2	RESULTADO ADESIVO	98
1.3	RESULTADO PARTE POLIMÉRICA	99
1.4	RESULTADO PARTE POLIMÉRICA	100
	APÊNDICE 2 – CÓDIGO PYTHON UTILIZADO PARA ANÁLISE DE DADOS DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	101
	APÊNDICE 3 – CÓDIGO PYTHON UTILIZADO PARA DETERMI- NAÇÃO DA CINÉTICA DA REAÇÃO	104
	APÊNDICE 4 – CÓDIGO IMPLEMENTADO NA PLACA ESP-32 . .	106
	APÊNDICE 5 – CÓDIGO PYTHON UTILIZADO PARA OBTENÇÃO DOS DADOS DO SENSOR DE HIDROGÊNIO . . .	108

1 INTRODUÇÃO

As embalagens blister são amplamente utilizadas na indústria farmacêutica devido à sua capacidade de proteger os medicamentos contra fatores externos, como luz, umidade e oxigênio. Essas embalagens são compostas basicamente por camada polimérica e metálica, geralmente alumínio, que oferecem uma barreira protetora contra a deterioração do medicamento. No entanto, o uso do polímero e alumínio nas embalagens blister tem gerado preocupações ambientais e econômicas em relação ao seu descarte inadequado e à necessidade de recuperação desses materiais, denominados em inglês Waste Pharmaceutical Blister (WPB), para reduzir o impacto ambiental. Nesse contexto, é importante discutir as possibilidades de recuperação desses materiais e as implicações ambientais e econômicas de seu descarte inadequado (Pilchik, 2000; Çapkın; Gökelma, 2023b).

Segundo o Plano Nacional de Energia de 2050 (EPE, 2020), o gás hidrogênio é uma importante matéria-prima na síntese de diversos produtos e em processos industriais. Além disso, pesquisas na obtenção de H₂ podem ajudar a superar desafios, como a descarbonização de setores de difícil redução de emissões e a geração e armazenamento de fontes renováveis de energia (IEA, 2023). Existem diversas formas de produzir hidrogênio, como por exemplo a eletrólise da água e a reforma a vapor, que são as mais utilizadas atualmente. O Brasil tem investido em pesquisas e projetos demonstrativos de tecnologias de hidrogênio e células a combustível, além de possuir normalização técnica e associações de apoio (Oliveira, 2022). No entanto, a cadeia de produção do hidrogênio apresenta desafios, como o custo do desenvolvimento da tecnologia e da infraestrutura necessária para transporte e armazenamento (EPE, 2020).

O alumínio presente nas embalagens blister pode ser usado para produzir hidrogênio através de um processo de corrosão (Nieminen *et al.*, 2020; Alviani *et al.*, 2019). Esse hidrogênio pode ser usado como uma fonte de energia de baixa emissão de carbono, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa. A reciclagem do alumínio dos blisters apresenta uma alternativa de reutilização deste elemento, especialmente considerando o alto consumo energético necessário para obtenção primária deste metal. Além disso, devido a sua espessura muito fina, o alumínio reciclado dos blisters é de difícil fundição para reuso como metal, o que torna sua conversão em energia uma opção mais viável e ecológica, evitando o descarte do material. Pois com a adição de temperatura metal tende a se tornar alumina por conta da sua oxidação. O restante do blister, composto por polímeros, também pode ser reaproveitado, alinhando-se às políticas de descarbonização e contribuindo para

uma economia circular.

O alumínio presente nas embalagens blister pode ser usado para produzir hidrogênio através de um processo de corrosão (Nieminen *et al.*, 2020; Alviani *et al.*, 2019). O hidrogênio gerado pode ser empregado como vetor energético, contribuindo diretamente para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, a reciclagem do alumínio proveniente dos blisters surge como uma estratégia de valorização desse resíduo, especialmente quando se considera o elevado consumo energético associado à produção primária de alumínio. Além disso, devido à espessura extremamente reduzida do alumínio presente nessas embalagens, sua reciclagem convencional via fundição torna-se tecnicamente desafiadora, uma vez que, sob condições de alta temperatura o metal sofre rápida oxidação formando alumina (Al_2O_3), o que inviabiliza seu reaproveitamento como metal sólido. Dessa forma, a conversão do alumínio em hidrogênio se apresenta como uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente melhor. O restante do blister, composto por polímeros, também pode ser reaproveitado, alinhando-se às políticas de descarbonização e contribuindo para economia circular.

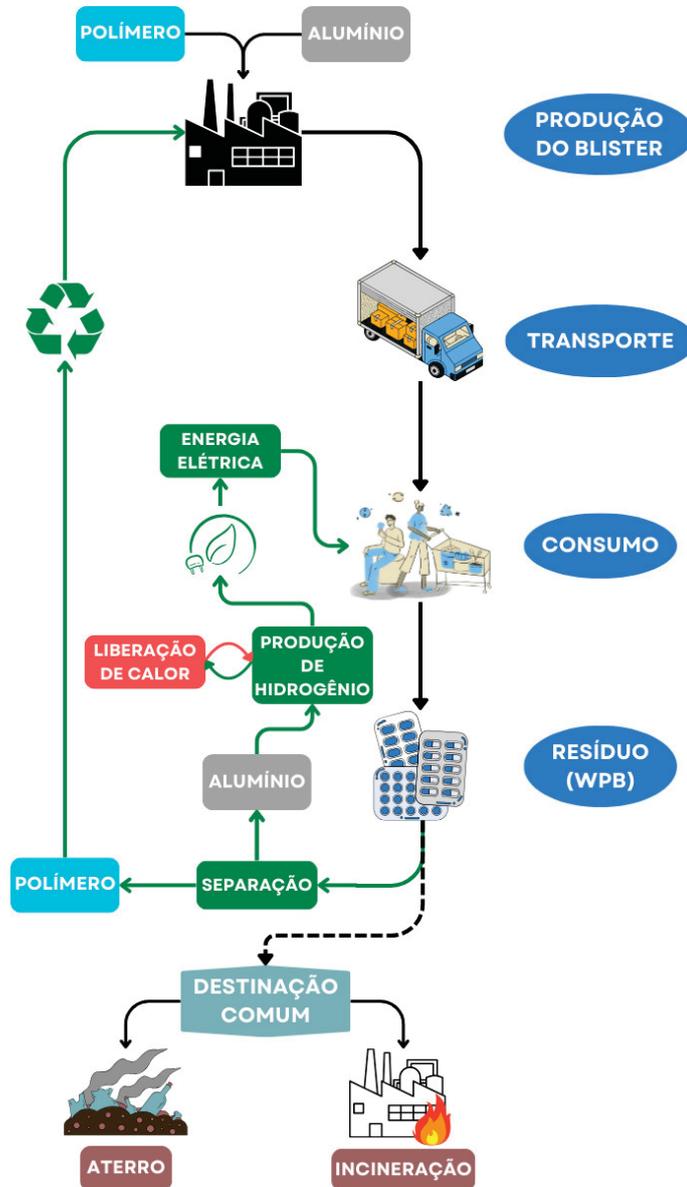
Este trabalho propõe a aplicação de técnicas para a separação das camadas das embalagens blister e a subsequente utilização do alumínio recuperado para a produção de hidrogênio, configurando-se como uma abordagem promissora tanto na recuperação desse resíduo quanto na geração de um vetor energético.

A metodologia adotada contempla diferentes etapas. Inicialmente, será realizada a caracterização do material, com a análise composicional das embalagens blister, a fim de quantificar as frações de alumínio, polímeros e outros constituintes. Na sequência, serão investigados os processos de separação das camadas que compõem as embalagens, buscando métodos eficientes, seguros e escaláveis. Por fim, será conduzido o estudo da produção de hidrogênio a partir do alumínio recuperado, incluindo a avaliação da cinética reacional, com o objetivo de otimizar as condições operacionais.

Espera-se que os resultados deste estudo contribuam para a promoção da economia circular, ao viabilizar um processo eficiente de conversão de resíduos em hidrogênio, conforme representado na Figura 1. Será realizada a avaliação da cinética da reação que permitirá compreender os mecanismos envolvidos e maximizar a eficiência do processo.

Em resumo, este estudo possui o potencial de oferecer uma solução para a gestão dos resíduos de blister farmacêutico (WPB). A investigação sobre a utilização dessas embalagens na produção de hidrogênio contribui diretamente para a mitigação do volume de resíduos gerados, promovendo a aplicação dos princípios da economia circular, especialmente os conceitos de redução, reutilização e reciclagem. Ao transformar um resíduo de difícil manejo em uma fonte alternativa de energia, o projeto

FIGURA 1 – ESQUEMA APRESENTANDO A DESTINAÇÃO COMUM DO BLISTER E A REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO.



FONTE: O autor (2025).

não apenas reduz os impactos ambientais associados ao descarte inadequado, mas também favorece a transição para uma economia de baixo carbono. Dessa forma, a proposta está alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e com as metas globais de descarbonização e sustentabilidade.

1.1 JUSTIFICATIVA

A crescente demanda por fontes de energia e a necessidade urgente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa têm incentivado a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de baixa emissão de carbono. O gás hidrogênio é um dos principais candidatos a substituir os combustíveis fósseis devido à sua alta densidade energética, sendo 1 kg de hidrogênio equivalente a 2,4 kg de metano ou 2,8 kg de gasolina em relação a sua capacidade de liberar energia. Contudo, a produção de hidrogênio ainda enfrenta desafios significativos, especialmente em termos de custo e eficiência dos processos de produção (Oliveira, 2022).

Uma das estratégias promissoras para a produção de hidrogênio é o uso de resíduos industriais e urbanos como fontes de matéria-prima. Nesse contexto, as embalagens blister, amplamente utilizadas na indústria farmacêutica e de bens de consumo, representam um resíduo volumoso e de difícil reciclagem devido à combinação de materiais (plástico e alumínio), uma vez que a reciclagem inadequada dessas embalagens contribui para a poluição ambiental (Çapkın; Gökelma, 2023b).

Blisters são compostos por cerca de 15% de alumínio (Shukla *et al.*, 2022). O setor farmacêutico, que comumente usa embalagens blister, comercializou 5,7 bilhões de unidades de embalagens em 2022 (ANVISA, 2023). De acordo com estudos recentes, o valor do mercado de embalagens blister farmacêuticas está previsto para atingir US\$ 149,3 bilhões até o ano de 2026, com uma taxa composta de crescimento anual (CAGR) de 6% entre 2019 e 2029 (Mordor Intelligence, 2024).

Esses dados evidenciam a importância da adoção de medidas sustentáveis no descarte e reciclagem das embalagens blister, tendo em vista o impacto ambiental e econômico associado a esse tipo de resíduo. Além de abrir novas oportunidades de negócios no mercado de reciclagem de materiais, reduzindo o consumo de fontes primárias de alumínio e plástico (Çapkın; Gökelma, 2023b).

Este estudo visa investigar a viabilidade da utilização de embalagens blister como matéria-prima para a produção de hidrogênio de forma eficiente e em pequena escala. A proposta visa, especialmente, a aplicação em ambientes como hospitais, unidades de saúde e localidades de difícil acesso à energia convencional, permitindo que o próprio resíduo gerado seja convertido em energia elétrica. A hipótese central é que, por meio de reações com soluções ácidas ou alcalinas, seja possível aproveitar o alumínio presente nas embalagens para a geração de hidrogênio de forma tecnicamente viável. Paralelamente, o trabalho busca otimizar as condições operacionais do processo, visando maximizar a eficiência da produção. Além disso, este estudo também pode contribuir para a diversificação das fontes primárias de energia, promovendo uma alternativa complementar no contexto de geração distribuída. Dessa forma, a tecnologia

proposta pode atuar como sistema de backup energético em situações emergenciais ou como suporte para alívio da demanda em redes isoladas, fortalecendo a resiliência energética e alinhando-se às estratégias de transição para uma matriz mais sustentável e descentralizada.

1.2 OBJETIVOS

Esta dissertação de mestrado tem por objetivo geral produzir hidrogênio a partir do alumínio presente nas embalagens blisteres.

A seguir estão apresentados os objetivos específicos deste trabalho:

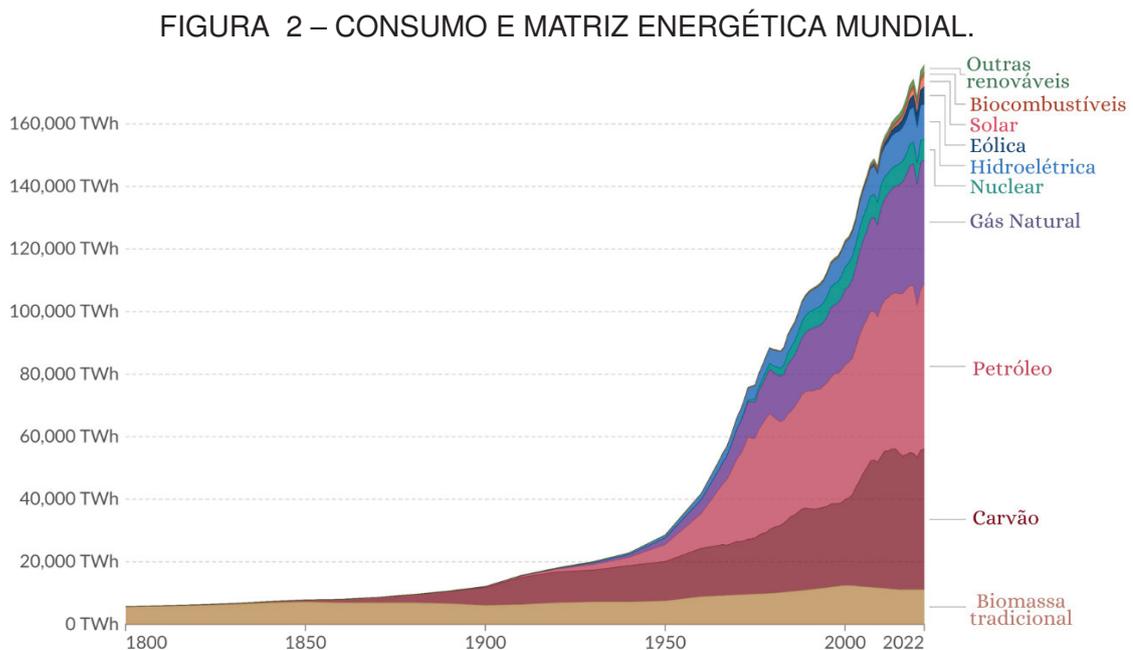
- Avaliar o tratamento com ácido fórmico para a separação das camadas dos blisteres;
- Avaliar a produção de hidrogênio a partir da camada de alumínio pela rota alcalina e ácida;
- Obter a cinética de produção de hidrogênio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica, conceitos e técnicas relacionadas ao tema de pesquisa do presente trabalho, além do estado da arte relacionado à reciclagem dos blisters.

2.1 PRODUÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA

O consumo global de energia primária cresceu 1% de 2022 para 2023, com os combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural) mantendo uma predominância de 82% do total, apesar do avanço recorde no uso de fontes eólica e solar (IEA, 2023; Energy Institute, 2024). A matriz energética mundial pode ser observada na Figura 2.



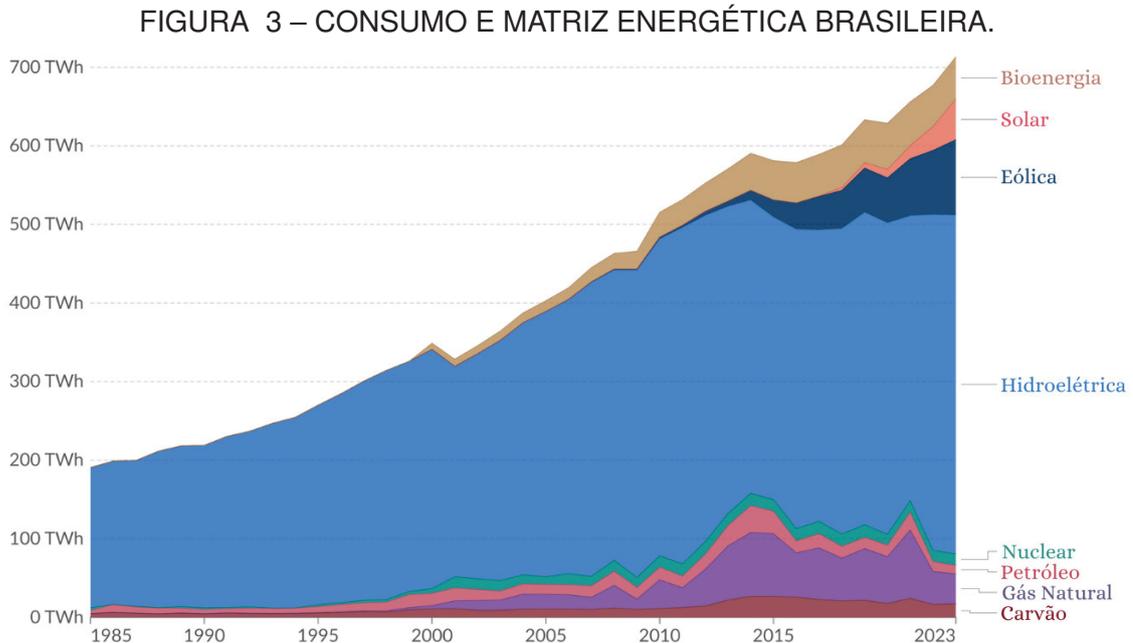
FONTE: Adaptado de Ritchie, Rosado e Roser (2020).

A produção e consumo de energia são temas centrais na agenda global, considerando os desafios ambientais, econômicos e sociais. No contexto mundial e nacional, a transição para fontes de energia renovável é crucial para a sustentabilidade e redução das emissões de gases de efeito estufa.

As energias renováveis, como solar, eólica e hidroelétrica, representam aproximadamente 14% da matriz energética mundial (IRENA, 2022). Onde vários países têm investido significativamente em tecnologias mais ambientalmente corretas e na diversificação da matriz energética, impulsionadas por metas ambiciosas, visando

reduzir as emissões de gases de efeito estufa em pelo menos 55% em comparação com os níveis de 1990 (Energy Institute, 2024).

O Brasil possui uma matriz energética muito dependente da fonte de hidroelétrica, entretanto é uma das mais limpas do mundo, conforme apresentado na Figura 3.



FONTE: Adaptado de Ritchie, Roser e Rosado (2022).

Em 2020, aproximadamente 46% da energia total produzida no Brasil veio de fontes renováveis, superior à média mundial de 14% segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023). A energia advinda de hidroelétricas corresponde a cerca de 60% da geração de eletricidade nacional. Além disso, o Brasil tem se destacado na produção de bioenergia, especialmente etanol e biodiesel (Energy Institute, 2024), possuindo grande potencial para expandir a geração de energia a partir de fontes renováveis como a energia solar e eólica que têm crescido rapidamente nos últimos anos.

O relatório de 2024 da Rede de Políticas de Energia Renovável para o Século 21 (REN21) destaca a necessidade urgente de acelerar a transição para fontes de energia renovável, enfatizando os desafios globais e as metas definidas na Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2023 (COP28). Embora os investimentos em energias renováveis tenham atingido um valor recorde de USD 622,5 bilhões em 2023, esse montante ainda é insuficiente para garantir o cumprimento das metas climáticas e dos ODS. Além disso, o relatório aponta que as taxas de juros elevadas em economias emergentes representam uma barreira significativa, uma vez que encarecem os financiamentos necessários para a aquisição de equipamentos e

infraestrutura, retardando o processo de desenvolvimento para a transição energética. Esse cenário compromete a viabilidade de novos projetos e limita o avanço efetivo rumo à sustentabilidade energética (REN21, 2024).

No contexto brasileiro, a produção de hidrogênio como vetor energético representa uma estratégia relevante para a diversificação da matriz energética, muito dependente de fontes hidrelétricas. Além disso, o país se posiciona como um potencial fornecedor de hidrogênio de baixo carbono para o mercado internacional, contribuindo para a transição energética global e para a descarbonização de setores industriais e de transporte (Ministério de Minas e Energia, 2021).

2.2 HIDROGÊNIO: PROPRIEDADES, UTILIZAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL E FORMAS DE OBTENÇÃO

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante no universo, representado pelo símbolo H e número atômico 1 (McMurry; Fay, 2010). Sua simplicidade atômica e ampla disponibilidade fazem dele um candidato promissor para diversas aplicações, especialmente como vetor energético. Trata-se de um gás incolor, inodoro e altamente inflamável, cujas propriedades físico-químicas são extremamente atrativas, destacando-se, principalmente, sua elevada energia específica — isto é, uma excelente relação energia-peso. Sua reatividade é notável, reagindo prontamente com outros elementos para formar compostos como água e hidrocarbonetos. Apresenta ponto de ebulição de $-252,87\text{ °C}$ e ponto de fusão de $-259,16\text{ °C}$ (NIST, 2023).

Apesar de seu enorme potencial energético, o hidrogênio impõe desafios significativos quanto ao armazenamento e transporte, devido à necessidade de condições extremas, como altas pressões e temperaturas criogênicas. Esses fatores exigem o desenvolvimento de materiais avançados, capazes de suportar tais condições de forma segura, eficiente e economicamente viável (IEA, 2021).

Devido a essas propriedades, o hidrogênio pode ser utilizado como combustível em diversas aplicações. Em células a combustível reage com oxigênio para gerar eletricidade, tendo como único subproduto a água. Essas células são podem ser utilizadas em veículos, geradores de energia e dispositivos portáteis. Outra possibilidade é sua utilização em motores de combustão interna adaptados para a queima de hidrogênio, o que contribui para a redução das emissões de poluentes (Kaur; Verma, 2024). Além disso, o hidrogênio pode ser armazenado e posteriormente utilizado para gerar eletricidade em momentos de alta demanda, funcionando como um buffer energético, que ainda são empregados em escala experimental, necessitando validações e estudos para maior aplicação (IEA, 2019).

Existem diversas formas de obtenção do hidrogênio, cada uma com suas

vantagens e desafios. O processo mais comum é a reforma a vapor de metano (SMR), no qual o metano reage com vapor para produzir hidrogênio e dióxido de carbono. Apesar de sua eficiência, esse método gera emissões de CO₂. Já a eletrólise da água consiste na separação do hidrogênio e oxigênio por meio de eletricidade; quando essa eletricidade provém de fontes renováveis, o hidrogênio obtido é considerado "verde". Outra alternativa é a gasificação de biomassa, que converte materiais orgânicos em hidrogênio e outros gases, embora ainda em desenvolvimento. Por fim, a pirólise de hidrocarbonetos permite a decomposição de hidrocarbonetos em hidrogênio e carbono sólido, representando uma tecnologia promissora, mas que ainda se encontra em fase experimental (Sánchez-Bastardo; Schlögl; Ruland, 2021).

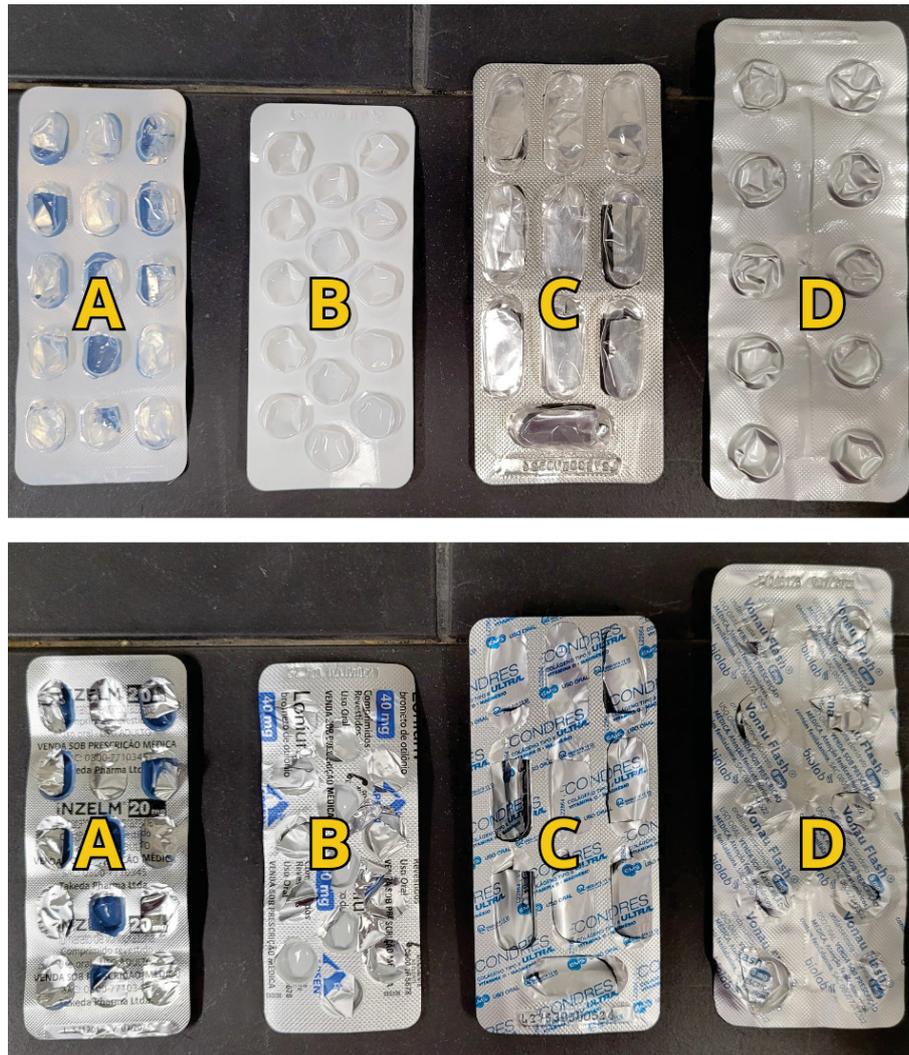
Diante desse panorama, o hidrogênio se destaca como um potencial combustível do futuro, devido às suas propriedades únicas e sua versatilidade. No entanto, a escolha do método de obtenção e a infraestrutura necessária para sua implementação em larga escala são desafios que precisam ser superados para que o hidrogênio se torne uma solução viável e sustentável (Hydrogen Council, 2021).

2.3 EMBALAGENS BLISTER

As embalagens blister são amplamente empregadas na indústria farmacêutica devido à sua eficácia em proteger os medicamentos contra influências externas, como luz, umidade e oxigênio. Compostas por uma camada polimérica e uma camada metálica, geralmente alumínio, essas embalagens oferecem uma barreira protetora contra a degradação dos medicamentos (Pilchik, 2000).

Conforme destacado por Nieminen *et al.* (2020), existem diversos tipos de embalagens blister farmacêuticas, ilustradas na Figura 4. Os filmes de formação, que constituem a estrutura dessas embalagens, geralmente são fabricados com polímeros como Cloreto de polivinila (PVC), Polipropileno (PP) e Polietileno tereftalato (PET). A escolha do tipo de polímero utilizado na fabricação das embalagens é baseada na sua resistência à umidade e na durabilidade do produto (Pilchik, 2000).

FIGURA 4 – TIPOS MAIS COMUNS DE BLISTER.



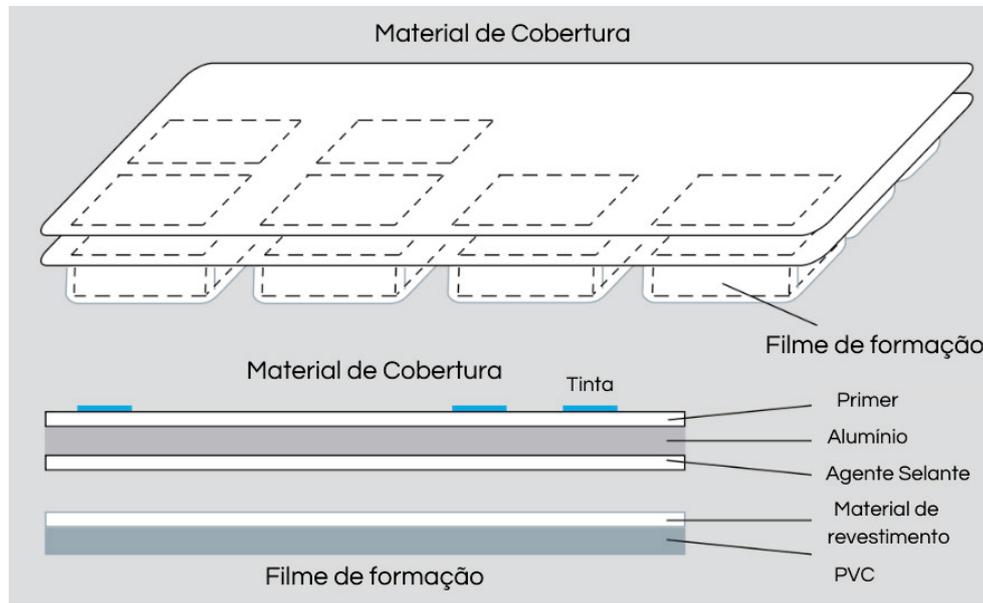
FONTE: O autor (2025).

LEGENDA: "A" - Embalagem termoformada com filme de formação plástico opaco e tampa de alumínio, "B" - Embalagem termoformada com filme de formação branco e tampa de alumínio, "C" - Embalagem termoformada com filme de formação transparente e tampa de alumínio, "D" - Pacote formado a frio com filme de formação e tampa de alumínio.

Os três primeiros tipos (denominados por "A", "B" e "C" na Figura 4) possuem camadas de filmes de poliméricos e uma camada metálica que corresponde de 10 a 15% em peso da embalagem (geralmente alumínio) (Klejnowska *et al.*, 2020). Já o blister "D" contém uma camada dupla de alumínio que protege ainda mais contra luz solar e umidade, impedindo assim a deterioração do medicamento (Klejnowska *et al.*, 2020). Embalagens blister de folha/folha são compostas pela laminação de um filme plástico (PVC ou PE), folha de alumínio, adesivo e um filme polimérico externo, que são responsáveis pela dificuldade de reciclabilidade deste material. O filme externo, que pode ser PET ou PVC, atua como uma camada de selagem térmica e suporta a fina camada de alumínio (Pilchik, 2000). Para melhor entendimento de como são

posicionadas as camadas do blister, na Figura 5 é apresentado um diagrama contendo essas divisões.

FIGURA 5 – CAMADAS QUE COMPÕEM O BLISTER.



FONTE: Adaptado de Pilchik (2000).

Observa-se que o blister está orientado com a camada polimérica voltada para baixo. Na parte superior, há a presença de um primer e a aplicação de tinta contendo as inscrições dos medicamentos sobre a camada de alumínio, seguido de um agente selante e material de revestimento, finalizando com a camada de PVC.

A seguir, serão detalhadas as principais características de cada camada que compõe o blister, divididas em polímero, adesivo e alumínio.

2.3.1 Polímero

No campo das embalagens farmacêuticas, a diversidade de filmes poliméricos disponíveis é extensa, abrangendo uma ampla variedade de materiais, espessuras, configurações multicamadas e cores. A seleção do filme adequado é fundamental e deve ser cuidadosamente ajustada à aplicação específica do medicamento (Pereira; Ferreira, 2016).

A permeação de gases, vapores ou líquidos através dos materiais de embalagem pode comprometer a eficácia dos fármacos, alterando a validade e a atividade do princípio ativo, resultando em uma diminuição do efeito terapêutico esperado do medicamento. Por isso também devem ser levadas em conta na hora da escolha do material empregado nos blisters, fazendo parte da pesquisa e desenvolvimento do medicamento, assegurando que a embalagem preserve a integridade do produto farmacêutico (Pereira; Ferreira, 2016).

O PVC é notável por sua alta transparência, excelente termoformabilidade, resistência à flexão, robustez química e baixa permeabilidade a óleos, gorduras e compostos aromáticos (Pilchik, 2000). A permeabilidade ao vapor de água do PVC varia inversamente com a espessura da cavidade, tornando-o um material de custo acessível e fácil de imprimir (Pilchik, 2000). A espessura do filme de PVC oscila entre 0,22 e 0,80 mm, influenciando diretamente a barreira à luz; maior espessura resulta em menor transmissão luminosa (Pereira; Ferreira, 2016; Alves, 2020). Embora seja o material mais empregado em embalagens blister, o PVC tem sido criticado devido à liberação de toxinas nocivas durante a reciclagem por incineração, levando alguns países a substituí-lo por alternativas como PP, PET e Poliestireno (PS) (Alves, 2020).

O Policloreto de vinilideno (PVdC) quando laminado ou revestido sobre o PVC, desempenha um papel crucial nas embalagens blister, reduzindo a permeabilidade do PVC ao oxigênio e à umidade em 5 a 10 vezes (Alves, 2020). Este polímero possui uma espessura padrão de 0,25 mm e uma gramatura que varia de 40 a 120 $g.m^{-2}$ (Alves, 2020).

Filmes que combinam PVC e Clorotrifluoroetileno (PCTFE) apresentam a menor permeabilidade ao vapor de água entre todas as opções disponíveis (Higgins, 2016). No entanto, é importante considerar as preocupações ambientais relacionadas ao PVC ao selecionar materiais para embalagens farmacêuticas (Pilchik, 2000). Encontrar um equilíbrio entre eficácia de barreira, custo e responsabilidade ambiental é fundamental no design dessas embalagens.

2.3.2 Agente selante

Os adesivos à base de cianoacrilato são uma das colas mais versáteis e amplamente utilizadas no mundo para diversas aplicações como por exemplo agente selante nas embalagens blister (Raja, 2016). Sua descoberta acidental em 1951 por cientistas da Eastman Kodak company, ocorreu durante testes do índice de refração em etil 2-cianoacrilato feitas para aplicação em canopi de aviões a jato resistentes ao calor, percebendo-se o potencial adesivo do material (Raja, 2016). Comercializado pela primeira vez como Eastman 910® em 1958, o cianoacrilato logo se destacou pela rápida ligação e alta resistência em união de diversos substratos como plásticos, metais, madeira e tecidos, sem a necessidade de calor ou catalisador (Raja, 2016). A contribuição significativa de Dr. Harry Coover rendeu-lhe a Medalha Nacional de Tecnologia e Inovação dos EUA em 2010 (Raja, 2016).

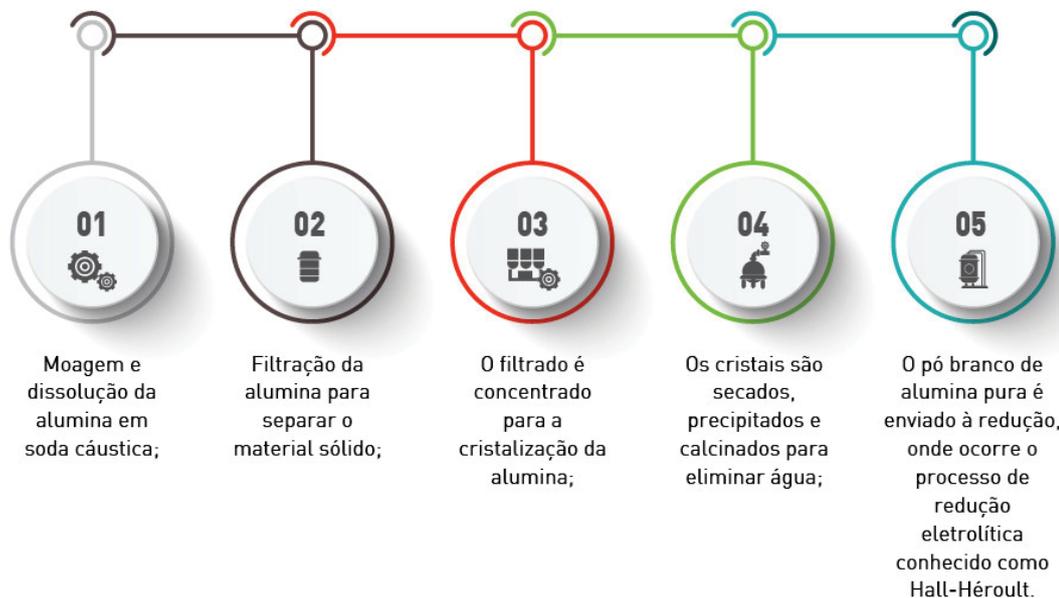
O Poli-n-butil metacrilato (PMMA) é notável por sua rápida polimerização na presença de bases fracas, o que o torna um adesivo de fixação rápida (Raja, 2016). Além disso, possui excelente aderência a uma variedade de materiais, como plásticos, borracha, metais, cerâmica, madeira, vidro, papel, tecido e tecidos vivos. No

campo médico, os cianoacrilatos são usados como adesivos tissulares devido à sua capacidade de formar ligações fortes e flexíveis em ambientes úmidos, sendo aprovados pela FDA (Food and Drug Administration) para uso externo em procedimentos clínicos (Raja, 2016). Pesquisas recentes focam na estruturação de adesivos de cianoacrilato em forma de nanofibras, expandindo suas aplicações para dispositivos biomédicos e superfícies autolimpantes (Raja, 2016).

2.3.3 Alumínio

De acordo com a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) a obtenção do alumínio é feita a partir do mineral bauxita, sendo realizada em 3 etapas: a mineração, seguida da refinaria e por fim a redução (ABAL, 2024). É possível observar na Figura 6 o processo de refino (processo Bayer), realizado onde o minério é inicialmente moído, passa por um filtro, esse filtrado é concentrado para a cristalização da alumina, posteriormente seca, precipitada e calcinada para eliminar água, resultando na alumina que é um pó branco que segue para o processo de redução eletrolítica. Na redução, a obtenção de alumínio ocorre através de eletrólise (ABAL, 2024).

FIGURA 6 – PROCESSOS PARA OBTENÇÃO DE ALUMÍNIO METÁLICO.



FONTE: ABAL (2024)

O processo no reator, conhecido como processo Hall-Héroult, ocorre da maneira apresentada na Figura 7 onde a alumina é dissolvida em criolita fundida, sendo aplicada corrente elétrica na célula eletrolítica promovendo a redução da alumina, formando dióxido de carbono e o alumínio metálico que precipita no fundo da cuba, podendo ser transferido para cadinhos menores, onde ocorre a refusão e produção de lingotes (ABAL, 2024).

FIGURA 7 – PROCESSO QUE OCORRE NO REATOR.



FONTE: ABAL (2024)

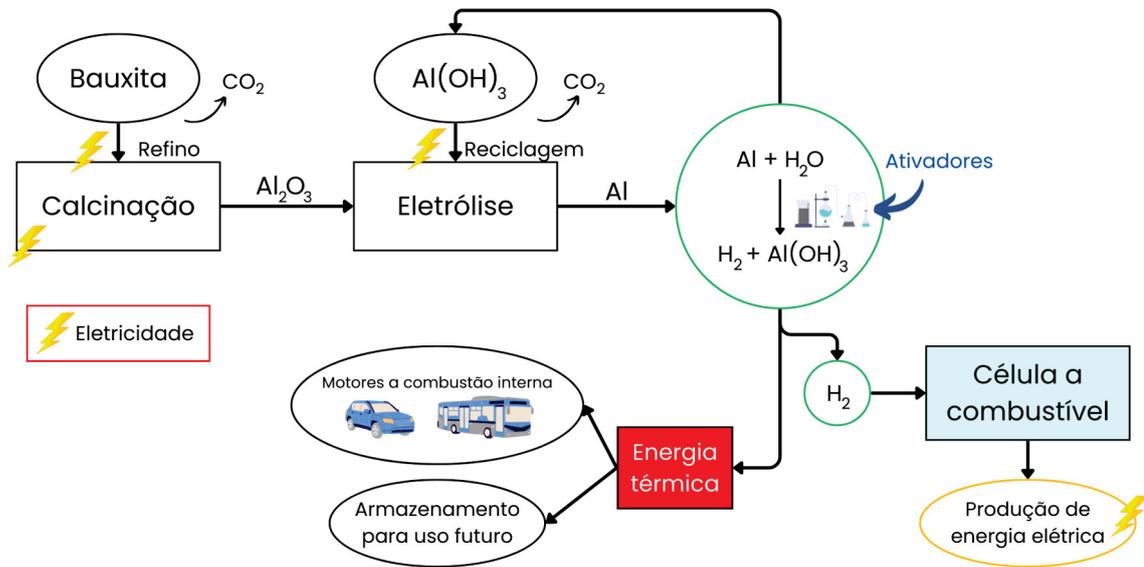
O Brasil é o décimo segundo produtor de alumínio primário no mundo. Em 2022, a produção brasileira de alumínio primário somou 810,9 mil toneladas, um crescimento de 5,1% na comparação com o ano anterior (ABAL, 2023).

A elevada demanda energética associada à produção de alumínio primário (aproximadamente $14,8 \text{ MWh} \cdot \text{t}^{-1}$, valor equivalente ao consumo mensal de eletricidade de $72 \text{ kWh} \cdot \text{hab}^{-1}$ (ABAL, 2001; EPE, 2024)) evidencia a necessidade de desenvolvimento de rotas tecnológicas capazes de otimizar o aproveitamento energético do metal. Nesse contexto, destaca-se a geração de hidrogênio a partir da reação do alumínio metálico, uma alternativa que não apenas converte a energia química do material em um vetor energético de baixas emissões de carbono, mas também viabiliza o reaproveitamento de sucatas e resíduos metálicos.

Para quantificar de forma abrangente os fluxos de energia e de matéria ao longo de todas as etapas, desde a extração da bauxita até o processamento, uso e disposição final dos subprodutos, emprega-se a Análise do Ciclo de Vida (LCA) (Kaur; Verma, 2024). O diagrama esquemático apresentado na Figura 8 representa esse ciclo, evidenciando o elevado dispêndio energético associado à conversão da bauxita em alumínio primário.

Ressalta-se que o hidrogênio obtido por meio da reação do alumínio com água na presença de ativadores pode ser utilizado como combustível em função de seu elevado poder calorífico ou convertido em energia elétrica por meio de células a combustível.

FIGURA 8 – CICLO DE VIDA DA GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DA REAÇÃO ALUMÍNIO ADVINDO DA BAUXITA.



FONTE: Adaptado de Kaur e Verma (2024).

2.4 RESÍDUO BLISTER FARMACÊUTICO

Após a utilização dos medicamentos, é fundamental definir o destino das embalagens, uma vez que esses resíduos representam uma preocupação ambiental significativa. Os resíduos gerados incluem principalmente blisters, frascos, caixas e os próprios fármacos. A gestão inadequada desses resíduos pode levar à contaminação do solo e da água, além de representar riscos à saúde pública devido à exposição indevida a substâncias químicas ativas.

As embalagens de medicamentos, especialmente os blisters, são constituídas por uma combinação de materiais, incluindo plásticos e alumínio, que tornam a reciclagem um desafio (Çapkın; Göknelma, 2023b; Shukla *et al.*, 2022). A decomposição lenta desses materiais em aterros sanitários contribui para a poluição ambiental, com, por exemplo, o fato do alumínio não ser degradado naturalmente e poder causar toxicidade a nível celular, enquanto o PVC pode levar de 200 a 600 anos para se decompor, liberando substâncias tóxicas como a dioxina e gás cloro durante a incineração (Klejnowska *et al.*, 2020). Além disso, a presença de resíduos farmacêuticos no meio ambiente tem sido associada à resistência antimicrobiana, um problema emergente de saúde pública global (Sulareviscz *et al.*, 2020). Substâncias ativas, mesmo em concentrações baixas, podem influenciar ecossistemas aquáticos e terrestres, afetando organismos não-alvo e alterando a dinâmica dos ecossistemas (Sulareviscz *et al.*, 2020).

Segundo Silva *et al.* (2023) e Sulareviscz *et al.* (2020), o descarte incorreto de medicamentos por profissionais e consumidores leva à contaminação de água, esgoto e sedimentos, agravada especialmente devido à falta de conhecimento sobre

os impactos ambientais que os medicamentos podem causar. Além disso, muitos dos medicamentos descartados incorretamente não são removidos eficientemente pelas estações de tratamento de águas residuais (ETARs), o que contribui para a contaminação persistente (Silva *et al.*, 2023; Sulareviscz *et al.*, 2020).

O estudo realizado por Sulareviscz *et al.* (2020) aponta que os blisters têm potencial reciclável, mas requerem descontaminação prévia dos resíduos de medicamentos. A legislação brasileira, através do CONAMA nº 358/2005 (Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), 2005), incentiva a separação de materiais e a coleta adequada de resíduos farmacêuticos pelas farmácias.

A problemática do descarte inadequado de resíduos farmacêuticos, especialmente de blisters, exige abordagens integradas que considerem tanto a reciclagem quanto a inovação tecnológica para a transformação desses resíduos em recursos valiosos, como o hidrogênio. A conscientização e educação dos profissionais de saúde e do público em geral sobre o descarte adequado de medicamentos são essenciais para mitigar os danos ambientais. A adoção de sistemas de logística reversa é uma medida eficaz para garantir que os medicamentos descartados sejam retornados à indústria para tratamento e disposição final adequados, além de possibilitar a reciclagem das embalagens (Silva *et al.*, 2023; Sulareviscz *et al.*, 2020).

2.5 TRATAMENTOS PARA O BLISTER

Na literatura, são mencionados três métodos de separação para embalagens blister farmacêuticas (WPB) (Çapkin; Gökelma, 2023a). O método hidrometalúrgico que visa solubilizar o alumínio em uma camada específica ou separar as camadas dissolvendo apenas a cola entre elas. Outro método é a degradação térmica ou pirólise, que consiste na utilização de altas temperaturas que decompõe a parte plástica e a separa do alumínio através da formação de materiais compostos. O último método é a fragmentação eletro-hidráulica, que separa o alumínio do plástico utilizando uma solução juntamente com aplicação de pulsos elétricos.

Nos métodos hidrometalúrgicos utilizados por Wang, Wang e Liu (2015), reagentes como ácido clorídrico ($2,5 \text{ mol.L}^{-1} \text{ HCl}$, $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 4 h, razão líquido/sólido 15:1) e hidróxido de sódio ($1,25 \text{ mol.L}^{-1} \text{ NaOH}$, $70 \text{ }^\circ\text{C}$, 20 min, razão 15:1) dissolvem 100% do alumínio, porém inviabilizam sua recuperação metálica. Alternativas que atacam preferencialmente o adesivo entre camadas, como ácido fórmico (4 mol.L^{-1}) e misturas benzeno-etanol-água (4 mol.L^{-1}), promovem a separação sem dissolver o alumínio. Outro solvente é o DES (mistura cloreto de colina:ácido láctico 1:9, $80\text{--}120 \text{ }^\circ\text{C}$), apresenta perda de alumínio inferior a 5%, embora exija purificação para reuso devido ao escurecimento e leve corrosão da superfície metálica. Misturas de acetona-isopropanol ($50\% \text{ v.v}^{-1}$, $30\text{--}50 \text{ }^\circ\text{C}$, 600 rpm) permitem separar 13, 10 e 15 peso% de alumínio

para os tipos 1, 2 e 3 de blister, com pureza metálica superior a 99,4%. Já o par DMCHA-etanol (1:3 g mL⁻¹, 40 °C) recupera 10–12 peso% de alumínio, configurando solução de toxicidade moderada (Çapkın; Gökelma, 2023a).

O ácido fórmico se destaca por proporcionar uma separação eficaz das camadas de metal e polímero sem dissolver significativamente o alumínio. Estudos indicam uma perda de massa mínima de alumínio, variando entre 0,02% e 0,08%, e a formação de formiato de alumínio como um sal facilitador da separação. Os experimentos foram conduzidos com soluções a 25 °C, 40 °C e 60 °C, utilizando uma concentração de 4 mol/L e agitação a 200 rpm, com amostras de WPB cortadas em pedaços de aproximadamente 2 x 2 cm (Çapkın; Gökelma, 2023b).

A pirólise realizada a 450 °C em atmosfera inerte, promove a decomposição térmica do material plástico, convertendo-o em frações gasosas e carbonáceas, enquanto o alumínio permanece concentrado no resíduo sólido (*char*). No caso de embalagens blister pós-consumo, o gás gerado (composto por frações carbonáceas e traços de compostos clorados) apresenta um poder calorífico de 21,96 MJ·m⁻³, evidenciando seu potencial como fonte de energia. A fração metálica presente no *char* varia entre 39,6% e 44,4% em massa, sendo que aproximadamente 86,4% a 88,5% do alumínio podem ser recuperados de forma eficiente, com possibilidade de posterior refusão e refino para novas aplicações industriais (Çapkın; Gökelma, 2023a).

A técnica de Fragmentação eletro-hidráulica (EHF) com solução de H₃PO₄ (4:1 v·v⁻¹), descarga de 130 kV a 3 Hz e 300 pulsos, demonstra recuperação de 10–12 em peso% de alumínio e 88–90 em peso% de polímero, reduzindo consideravelmente o consumo energético comparado a processos térmicos convencionais (Çapkın; Gökelma, 2023a).

Em resumo, embora existam processos promissores para a reciclagem de blister farmacêuticos, eles exigem avaliação integrada de viabilidade técnica, econômica e ambiental. É crucial aprimorar a reusabilidade dos solventes, desenvolver instalações dedicadas com sistemas de recuperação de reagentes e efluentes, e estimular políticas de coleta seletiva que separem blister na fonte, evitando seu encaminhamento indiscriminado como resíduo plástico (Çapkın; Gökelma, 2023a).

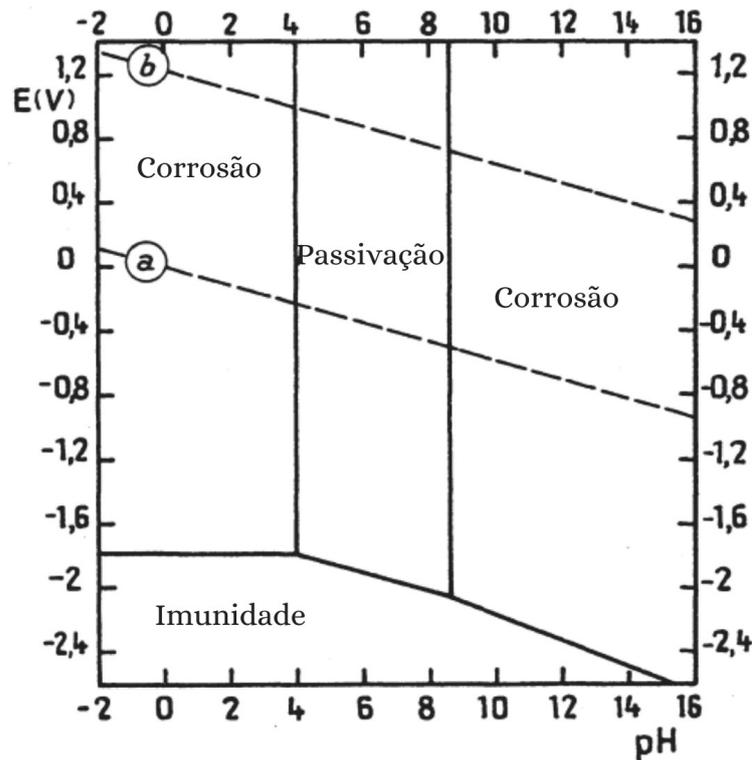
2.6 TRATAMENTO ÁCIDO E ALCALINO DE ALUMÍNIO PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

O alumínio tem se mostrado um excelente candidato na produção de hidrogênio, sendo o metal mais abundante na crosta terrestre, totalmente reciclável e leve. (Deebika; Saravanakumar, 2023)

O Diagrama de Pourbaix do alumínio está apresentado na Figura 9, que re-

apresenta graficamente as condições termodinâmicas de estabilidade, corrosão e passivação de um metal em solução aquosa, em função do potencial e do pH. Na zona denominada passivação há a formação de óxido que é estável que impede sua corrosão.

FIGURA 9 – DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO POTENCIAL-PH PARA O SISTEMA ALUMÍNIO-ÁGUA, A 25 °C.



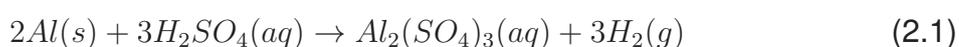
FONTE: Adaptado de Pourbaix (1974).

A passivação do alumínio ocorre entre os pHs de 4 a 9, resultando na formação de hidrargilita ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$). Além disso, segundo Pourbaix (1974) o alumínio é um metal altamente básico, uma vez que todo o seu domínio de estabilidade está abaixo do mesmo parâmetro para a água. Na presença de soluções suficientemente ácidas, o alumínio decompõe a água com a liberação de hidrogênio, dissolvendo-se como íons trivalentes (Al^{3+}). Na presença de soluções suficientemente alcalinas, o alumínio decompõe a água com a liberação de hidrogênio, dissolvendo-se como íons aluminato (AlO_2^-) e demonstrando assim o caráter anfótero do alumínio (Pourbaix, 1974).

Um desafio significativo associado aos processos em meio ácido ou alcalino é a camada densa e passiva de óxido que cobre sua superfície e obstrui o processo de geração de hidrogênio. É fundamental remover a cobertura passiva de óxido para ativar o alumínio para aplicações práticas. Existem dois métodos para remover o revestimento de óxido da superfície. O primeiro é a fragmentação do Al para destruir o revestimento de óxido na superfície e segundo é o emprego de ativadores, como metais de baixo ponto de fusão, soluções alcalinas ou sais inorgânicos. A passivação superficial do Al

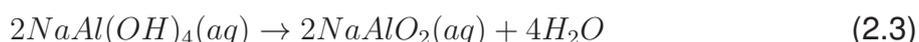
pode reduzir a atividade de em cerca de 30 %, resultando numa diminuição de 33 % na produção de hidrogênio (Kaur; Verma, 2024). Além disso, fatores como temperatura, formas e tamanho das partículas do alumínio são essenciais durante a geração de hidrogênio, onde 1 kg de Al pode produzir de 1,6 a 2,2 kWh de energia elétrica utilizando uma célula a combustível do tipo PEMFC (Kaur; Verma, 2024).

O ácido sulfúrico é um ácido forte amplamente utilizado na indústria química e que é capaz de fazer com que o pH seja menor do que 4 e cause instabilidade no alumínio. A reação resultante dessa interação pode ser representada pela seguinte equação química:



Nesta reação, o alumínio reage com o ácido sulfúrico para formar sulfato de alumínio e liberar gás hidrogênio. A reação é exotérmica, liberando uma quantidade significativa de calor. A liberação de gás hidrogênio é evidenciada pela formação de bolhas na solução. Esta reação pode ser utilizada em processos de produção de sulfato de alumínio, um coagulante importante no tratamento de água.

O hidróxido de sódio, também conhecido como soda cáustica, é uma base forte que tem o pH alcalino e por reagir com o alumínio de acordo com a seguinte equação:



Onde o alumínio reage com o hidróxido de sódio em presença de água para formar tetra-hidróxi-aluminato de sódio, também conhecido como aluminato de sódio, e gás hidrogênio. Essa reação também é exotérmica, sendo utilizada em aplicações como a fabricação de aluminatos e em processos de limpeza onde a remoção de óxidos de alumínio é desejada (Kaur; Verma, 2024).

Para geração rápida de hidrogênio é requerido pelo menos 1,5 g de NaOH por grama de Al. O mecanismo de corrosão ocorre com os íons OH^- gerados na reação química dissolvendo o filme passivo de óxido formado na superfície do Al, resultando na superfície ativa do alumínio (Kaur; Verma, 2024).

Diversos estudos reportam valores distintos para a energia de ativação (E_a) da reação do alumínio com ácido sulfúrico, que dependem das condições reacionais e das características dos materiais utilizados. Younes, El-Shamy e El-Shazly (2019) determinaram uma E_a de $57,2 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ao investigar a reação entre alumínio pulverizado e soluções diluídas de H_2SO_4 (0,1 a $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$), em temperaturas entre $25 \text{ }^\circ\text{C}$

e 55 °C, monitorando a liberação de hidrogênio como parâmetro cinético. Por outro lado, Lima, Silva e Nascimento (2013) relataram uma E_a significativamente maior, de 96,25 kJ·mol⁻¹, durante a lixiviação do alumínio presente no metacaulim (um material calcinado rico em Al₂O₃ e SiO₂) com ácido sulfúrico em concentrações de 1,5 a 3 mol·L⁻¹ e temperaturas entre 50 °C e 90 °C. As discrepâncias entre os valores de E_a se devem, principalmente, à diferença entre os substratos (alumínio metálico versus alumínio em matriz mineral), à forma física dos materiais (pó metálico versus material cerâmico), à concentração do ácido e à temperatura. Essas variáveis influenciam diretamente a velocidade da reação e os mecanismos envolvidos, resultando em diferentes comportamentos cinéticos observados experimentalmente.

Para a reação de alumínio com hidróxido de sódio, a energia de ativação encontrada por Alviani *et al.* (2019) foi de 60 kJ·mol⁻¹ e pelo Testa *et al.* (2024) foi de 52 kJ·(mol)⁻¹, valores compatíveis com processos que envolvem dissolução superficial do metal e formação de complexos aluminato.

Independentemente do método empregado para a obtenção de hidrogênio, seja por rotas alcalinas ou ácidas, podem ser classificados como hidrogênio verde, desde que não haja emissão direta de CO₂ durante o processo (IRENA, 2020). Conforme destacado por Mitsidi (2023), técnicas como a pirólise de biomassa e a reforma de biogás são exemplos de rotas alternativas à eletrólise que, quando alimentadas por fontes renováveis e adequadamente controladas, resultam em hidrogênio de baixo impacto ambiental. Além disso, as reações de corrosão metálica que envolvem a quebra das moléculas de água para a formação e liberação de hidrogênio podem ser consideradas formas de eletrólise espontânea, pois ocorrem sem a necessidade de uma fonte externa de energia elétrica, aproveitando a energia química intrínseca dos materiais envolvidos (Pourbaix, 1974).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e métodos empregados para a caracterização dos blisters, o aparato experimental utilizado, os testes preliminares e o planejamento experimental realizado para a produção do gás hidrogênio.

3.1 MATERIAIS

O objeto de estudo empregado foi a embalagem blister, composta por um polímero transparente e uma camada de alumínio, conforme ilustrado na Figura 10. Ressalta-se que as amostras utilizadas não continham medicamentos em seu interior, tratando-se exclusivamente de embalagens pós-consumo.

FIGURA 10 – BLISTER TRANSPARENTE UTILIZADO AO LONGO DESTA TRABALHO.



FONTE: O autor (2025).

Optou-se por trabalhar com este tipo específico de blister com o objetivo de minimizar as variáveis experimentais e, assim, possibilitar um estudo mais aprofundado do método de produção de hidrogênio. Essa decisão metodológica deve-se ao fato de que diferentes tipos de blister podem apresentar variações significativas na composição dos polímeros, na presença de pigmentos ou aditivos, o que demandaria etapas adicionais de caracterização dos resíduos.

Para reduzir o tamanho das partículas do blister, foi utilizada uma fragmentadora (Aurora AS1510CD) apresentada na Figura 11.

FIGURA 11 – FRAGMENTADORA UTILIZADA PARA REDUZIR O TAMANHO DE PARTÍCULA DAS EMBALAGENS BLISTER.



FONTE: O autor (2025).

As soluções preparadas para a realização das etapas de separação das camadas e reação de produção de hidrogênio foram: ácido fórmico $4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (Neon 85% P.A., CAS 64-18-6), ácido sulfúrico $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (Alphatec P.A., CAS 7664-93-9) e hidróxido de sódio $0,5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (Dinâmica P.A., CAS 1310-73-2). Sendo obtidas com base nos trabalhos de Wang, Wang e Liu (2015) e também observando o Diagrama de Pourbaix do alumínio apresentado na Figura 9, garantindo que o pHs utilizados estejam fora da zona de passivação do alumínio (Pourbaix, 1974).

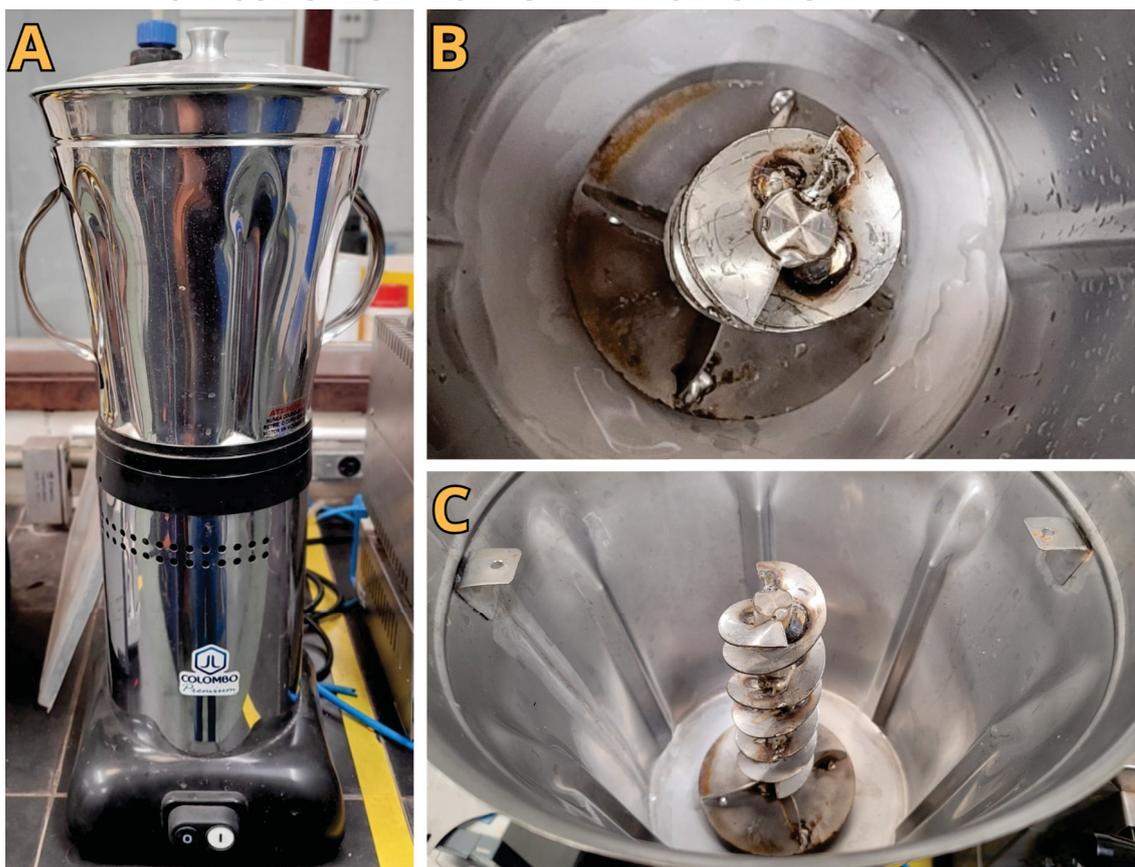
O banho-maria (TE-056, Tecnal) foi utilizado para aquecer a solução de ácido fórmico, enquanto uma placa de aquecimento (IKA C-MAG HS7) foi utilizada para aquecer as soluções de ácido sulfúrico e hidróxido de sódio. A temperatura foi monitorada com um termômetro digital de vareta (Minipa - MV-363A, que possui precisão de $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ (AF1305, Incoterm).

Para mensurar a massa dos reagentes e também do blister, foi utilizada uma Balança Analítica (FA2104N, Bioprecisa). A secagem dos materiais foi realizada em uma estufa (Nova Ética).

A separação mecânica das camadas dos blisters, após o tratamento químico

com ácido fórmico, foi facilitada pelo uso de um hidrapulper, equipamento amplamente utilizado na indústria de papel e celulose para desagregação de fibras (Bajpai, 2018). Neste estudo, o hidrapulper desempenhou um papel fundamental na remoção das camadas adesivas e do primer, expondo a camada de alumínio após o tratamento com ácido fórmico. O equipamento utilizado, conforme ilustrado na Figura 12, consiste em um liquidificador adaptado com um rotor modificado.

FIGURA 12 – HIDRAPULPER UTILIZADO PARA RETIRAR O PRIMER E ADESIVO EMPREGADOS NO ALUMÍNIO DAS EMBALAGENS BLISTER.



FONTE: O autor (2025).

LEGENDA: Legenda: "A- Hidrapulper montado, "B- Vista superior do rotor utilizado, "C- Vista lateral do rotor utilizado.

Para a montagem do sistema experimental destinado à produção de hidrogênio, foi utilizado um conjunto de vidrarias que incluiu um kitassato de 250 mL (recipiente reacional), um béquer de 1L e um de 5 L, uma proveta de 500 mL utilizada para mensurar o volume de hidrogênio produzido, além de mangueiras de silicone para condução do gás gerado.

O consumo energético apresentado neste trabalho foi obtido por meio do micro power monitor (CAI-HW17), capaz de fornecer valores de tensão, corrente, frequência e consumo em kWh. O equipamento é apresentado na Figura 13.

FIGURA 13 – MICRO POWER MONITOR (CAI-HW17).



FONTE: O autor (2025).

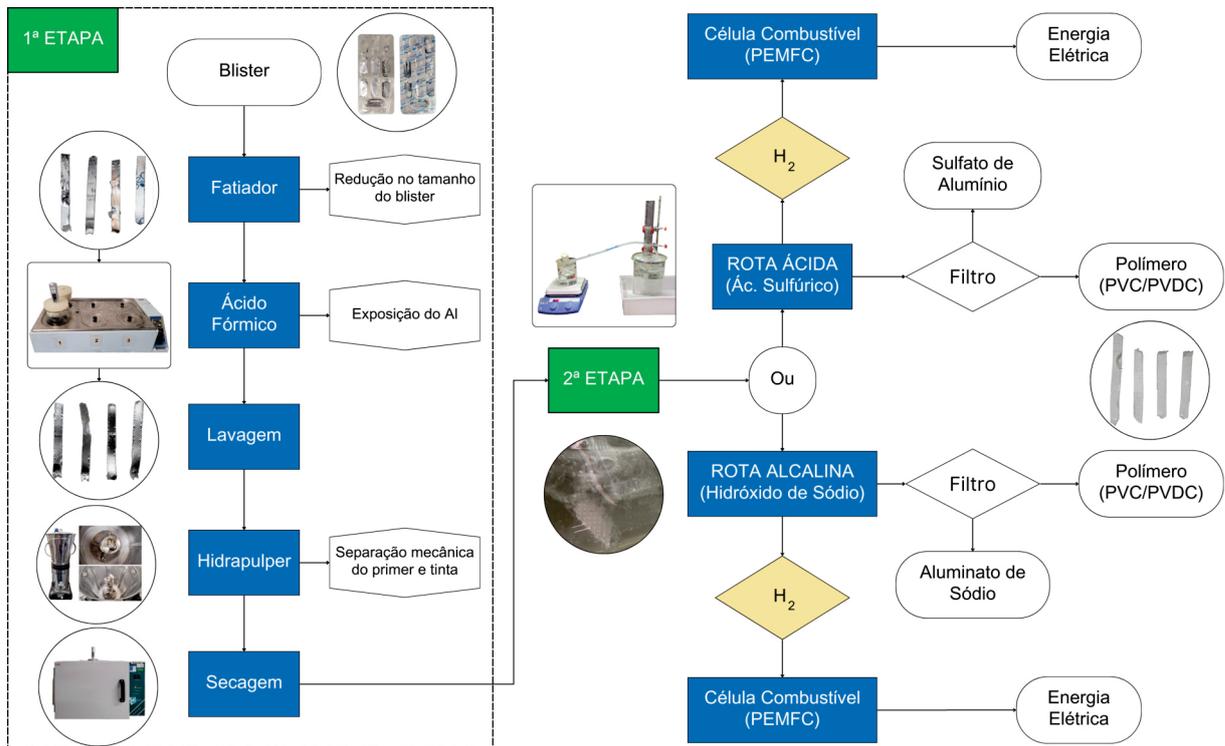
3.2 MÉTODOS

Na Figura 14 é apresentado o diagrama de blocos demonstrando as etapas que serão desenvolvidas neste trabalho.

O processo iniciou-se com a 1ª ETAPA, sendo a redução do tamanho das partículas e o tratamento com ácido fórmico para a exposição da camada de alumínio. Em seguida procedeu-se à 2ª ETAPA, na qual ocorreu a produção de hidrogênio através da rota ácida ou alcalina.

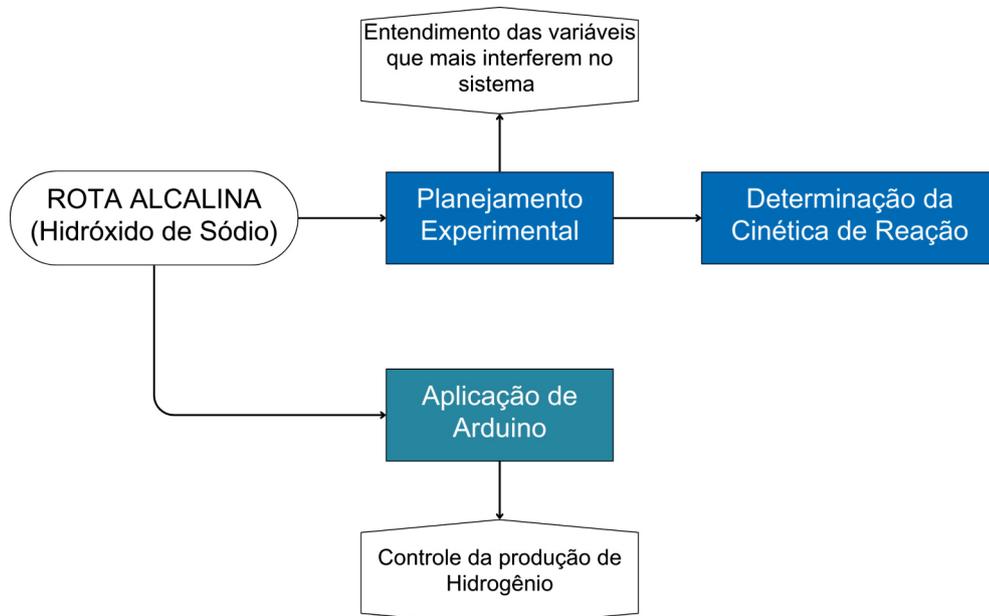
Após os testes preliminares, optou-se por dar continuidade ao estudo utilizando a rota alcalina, conforme apresentado no diagrama da Figura 15, uma vez que esta condição demonstrou maior eficiência, operando a temperaturas mais baixas e promovendo uma maior taxa de geração de hidrogênio. A partir dessa escolha, foram conduzidas análises experimentais para avaliar a influência da temperatura, do tempo de tratamento com ácido fórmico na etapa inicial e da massa de alumínio, utilizando um planejamento experimental estruturado. Foi conduzido um estudo cinético do sistema, utilizando as melhores condições determinadas no planejamento experimental. Em seguida, implementou-se um sistema de monitoramento da produção de hidrogênio baseado em Arduino.

FIGURA 14 – DIAGRAMA DE BLOCOS REPRESENTANDO OS PROCESSOS CONTIDOS NAS ETAPAS REALIZADAS NESTE ESTUDO.



FONTE: O autor (2025).

FIGURA 15 – DIAGRAMA DE BLOCOS APÓS ESCOLHA DA ROTA ALCALINA.



FONTE: O autor (2025).

3.2.1 Metodologia analítica

Para a caracterização dos blisteres foram utilizadas as técnicas de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), Fluorescência de Raios

X (FRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS).

A FTIR é uma técnica amplamente utilizada para identificar a composição química de materiais com base na interação da radiação infravermelha com as moléculas. Quando um feixe de luz infravermelha incide sobre uma amostra, diferentes grupos funcionais absorvem a energia em comprimentos de onda específicos, resultando em um espectro característico. Esse espectro é então processado por uma transformada de Fourier, permitindo a identificação precisa dos grupos funcionais presentes. No contexto deste trabalho, o FTIR foi aplicado para caracterizar as camadas poliméricas dos blisters, fornecendo informações sobre suas composições químicas. Os resultados foram obtido por meio do equipamento Espectrômetro Cary 630 FTIR (Figura 16) que forneceram informações sobre a presença de diferentes grupos funcionais destas camadas. Os relatórios contendo os resultados obtidos estão dispostos no Apêndice 1 deste trabalho.

FIGURA 16 – ESPECTRÔMETRO CARY 630 FTIR.



FONTE: Agilent (2024).

A Fluorescência de Raios X (FRX) é uma técnica analítica utilizada para a identificação e quantificação dos elementos químicos presentes em uma amostra. Quando a amostra é irradiada com raios X, os átomos presentes nela emitem fluorescência em comprimentos de onda específicos, que são característicos de cada elemento. O espectro resultante permite a determinação qualitativa e quantitativa dos elementos presentes na amostra, com alta precisão e sensibilidade. No presente estudo, o FRX foi utilizado para analisar a composição da camada metálica do blister realizada após a sua calcinação durante 6h e temperatura de 400 °C, fornecendo informações detalhadas sobre a concentração de alumínio e outros elementos. A análise foi realizada utilizando o espectrômetro Axios Max (Malvern Panalytical)(Figura 17) equipado com tubo de

Ródio 4 kV, no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas do Departamento de Geologia da UFPR (LAMIR) da UFPR.

FIGURA 17 – FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X PANALYTICAL, MODELO AXIOS MAX: TUBO RÓDIO 4 KV.



FONTE: O autor (2025).

O MEV é uma técnica que utiliza um feixe de elétrons para produzir imagens de alta resolução da superfície de amostras sólidas. Nesta técnica, dois tipos principais de feixe de elétrons são utilizados: os elétrons secundários e os elétrons retroespalhados. Os elétrons secundários, gerados pela interação entre o feixe de elétrons primário e os átomos da superfície, são utilizados para produzir imagens topográficas detalhadas, revelando as características tridimensionais da amostra. Já os elétrons retroespalhados, resultantes da interação elástica dos elétrons primários com o núcleo dos átomos da amostra, fornecem informações sobre a composição atômica, uma vez que elementos mais pesados refletem mais elétrons.

Adicionalmente, a técnica de EDS é acoplada ao MEV para análise elementar, identificando os elementos químicos presentes na amostra com base na emissão de raios X característicos, que ocorrem quando os elétrons primários excitam os átomos da amostra. Isso permite a determinação da distribuição e quantificação dos elementos em diferentes regiões da amostra.

No presente trabalho, as técnicas de MEV e EDS foram empregadas para analisar as camadas do blister e compará-las com folhas de alumínio comercial. As

imagens de alta resolução obtidas com o MEV forneceram detalhes topográficos das camadas do blister, enquanto o EDS revelou a composição química dessas camadas. As análises foram realizadas utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura TESCAN VEGA3 LMU (Figura 18), e o sistema de EDS Oxford com detector SDD de 80 mm² e software AZ Tech Advanced, no Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da UFPR (CME-UFPR, 2024). As amostras para a observação das camadas que compõem o blister foram preparadas inserindo os blisters verticalmente em resina epóxi cristal de baixa viscosidade. Após a cura completa da resina, as amostras foram submetidas a um processo de lixamento e polimento. O lixamento foi realizado utilizando lixas d'água nas granulações 220, 400, 600, 800 e 1500 (Wetordry 3M), com a posição da peça sendo rotacionada em 90° a cada etapa, garantindo a remoção completa das marcas da etapa anterior. Por fim, foi aplicado um polimento com solução apropriada para obtenção de uma superfície final lisa e adequada para análise.

FIGURA 18 – MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA TESCAN VEGA3 LMU.



FONTE: CME-UFPR (2024).

As técnicas de FRX e FTIR foram empregadas para a caracterização inicial dos blisters. Para a caracterização após tratamento fórmico foram empregadas as análises de FRX, MEV e EDS. Além disso, MEV e EDS foram realizadas em folha de alumínio para comparação entre o metal utilizado nos blisters.

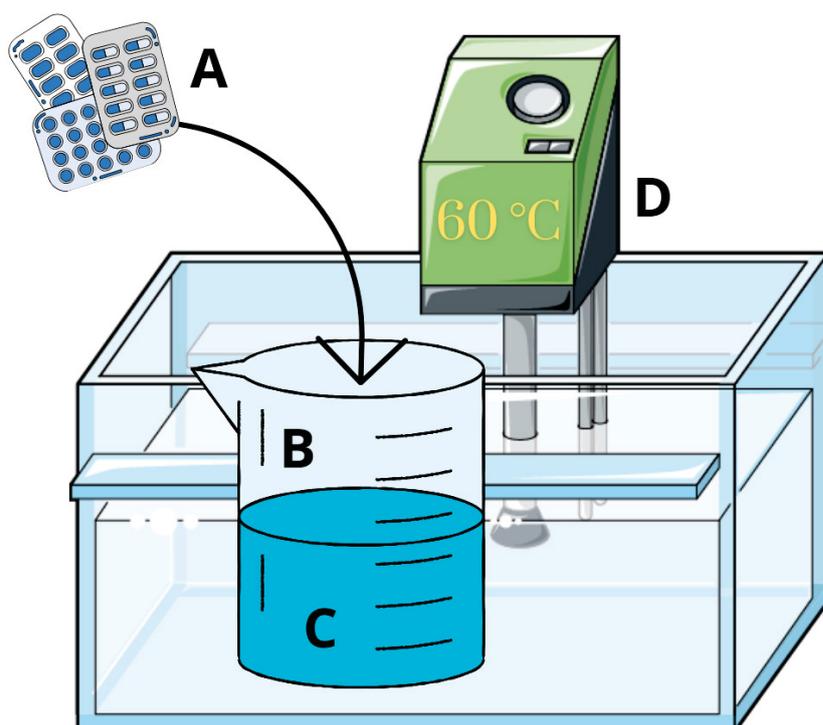
3.2.2 Etapa 1 - Separação das camadas

Após a caracterização do blister, foram realizados experimentos com o tratamento em ácido fórmico para verificar a sua capacidade de remoção das camadas poliméricas e da exposição do alumínio presente nas embalagens por conta da retirada do primer.

As embalagens blister transparentes foram inicialmente processadas utilizando a fragmentadora, resultando em partículas com dimensões de aproximadamente 0,4 cm de largura e 4 cm de comprimento.

Para avaliar a influência do tempo na interação do blister com o ácido fórmico, utilizou-se o aparato experimental ilustrado na Figura 19, composto pela embalagem blister (A) em contato com a solução de ácido fórmico (C) contida no béquer Berzelius (B), imerso em um banho-maria mantido a 60 °C. Condições obtidas através do artigo de Rimšaitė, Mumladze e Denafas (2019)

FIGURA 19 – DESENHO ESQUEMÁTICO DO SISTEMA UTILIZADO PARA A EXPOSIÇÃO DO ALUMÍNIO.



FONTE: O autor (2025).

LEGENDA: "A" - Embalagem blister fatiadas, "B" - Béquer Berzelius de 1 L, "C" - Solução de ácido fórmico 4 mol·L⁻¹, "D" - Banho-maria à temperatura de 60 °C.

A quantidade de blister utilizada em cada teste foi de 10 g, para 200 mL de solução de ácido fórmico 4 mol·L⁻¹ com tempos experimentais variando de 1, 2, 3, 4, 5 e 6 h, avaliando assim até a completa separação da camada metálica do restante

do blister. Após cada intervalo de tempo, o material foi filtrado e separado utilizando um hidrapulper na proporção de 10 g de blister tratado para cada 3 L de água, com agitação de 30 s para garantir a separação entre as camadas. Na sequência, o polímero separado e o blister remanescente foram secos em estufa por 24 h e pesados.

Em seguida, para avaliar tempos de tratamentos menores do que 1 h afim, foram realizados 4 ensaios, sendo eles de 15, 25, 35 e 45 min, minimizando o tempo e consumo energético necessário na Etapa 1. Foram utilizadas as mesmas condições e equipamento descrito anteriormente. O material após tratamento também foi filtrado e separado utilizando um hidrapulper.

3.2.3 Estudo preliminar da produção de hidrogênio via rota ácida e alcalina

Este estudo preliminar consistiu na comparação da produção de hidrogênio pela rota ácida utilizando ácido sulfúrico e alcalina por meio do hidróxido de sódio. Concomitantemente, foi realizada a quantificação do teor de alumínio presente nas embalagens blister, etapa essencial devido à heterogeneidade do resíduo que decorre, principalmente, das variações no tamanho das embalagens e das diferenças entre fabricantes, fatores que impactam diretamente na quantidade de hidrogênio que pode ser gerada.

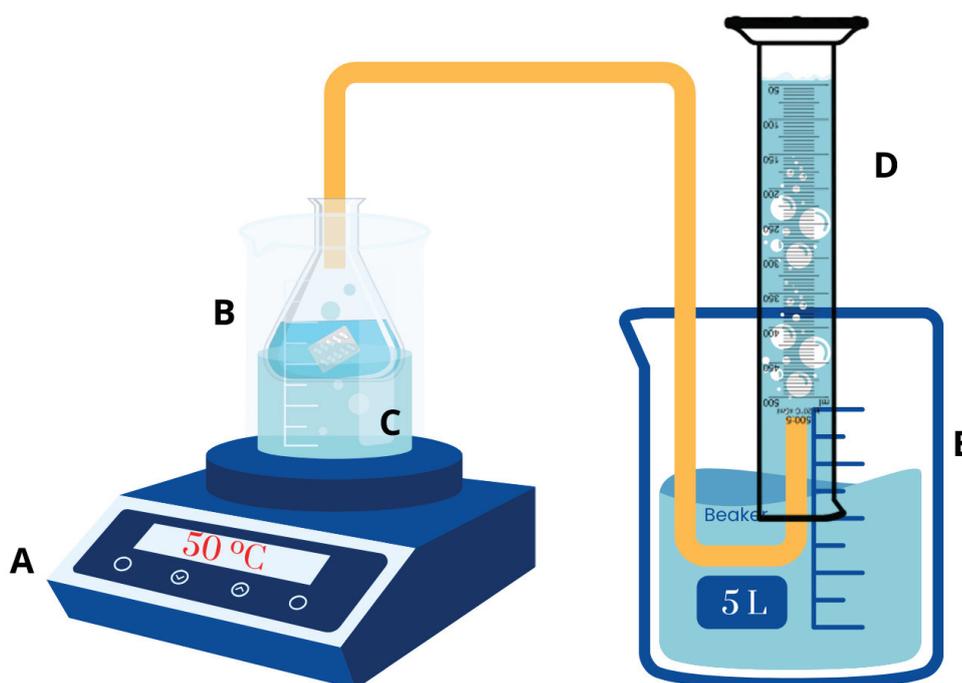
Além disso, a fragmentação dos blisters gerou partículas com proporções variáveis de alumínio e polímero, devido à ausência de metal nas cavidades destinadas aos medicamentos, que acabam sendo removidas durante o consumo. Essa característica dificultou o controle preciso da massa de alumínio no resíduo. Como o foco deste trabalho foi o desenvolvimento do processo de reciclagem e geração de hidrogênio, sem aprofundar os efeitos da granulometria, tornou-se fundamental quantificar o teor de alumínio nas embalagens. Essa etapa foi essencial para estimar a produção de hidrogênio e estabelecer a relação entre a massa de blister e o volume de solução empregado.

Para determinar a quantidade de alumínio no blister, foram registradas a massa inicial de 16 amostras (antes da etapa 2 (produção de hidrogênio)) e a massa final do polímero residual, obtida após o completo consumo do alumínio em cada ensaio. A diferença entre esses valores permitiu determinar a quantidade mássica de alumínio presente nas embalagens e consumido na reação.

O aparato experimental, ilustrado na Figura 20, foi empregado para a geração e quantificação do hidrogênio produzido. Um Kitassato de 250 mL foi utilizado como recipiente reacional, imerso em água contida num béquer e mantida na temperatura adequada por uma placa de aquecimento, assim fornecendo homogeneidade na temperatura necessária para a reação. Adicionalmente, uma proveta de 500 mL foi posicionada de maneira invertida dentro de outro béquer contendo água, mantendo

estável do nível da água em todo o experimento. O H_2 produzido na reação entre blister e solução (ácida ou alcalina) promoveu o deslocamento do nível de água dentro da proveta, de modo a permitir a quantificação de volume de H_2 gerado. Neste estudo preliminar, utilizou-se o blister com a camada de alumínio exposta, obtido na etapa de tratamento de 30 min com ácido fórmico.

FIGURA 20 – ESQUEMA DO APARATO EXPERIMENTAL UTILIZADO NA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO COM AVALIAÇÃO DO VOLUME PRODUZIDO.



FONTE: O autor (2025).

LEGENDA: "A" – Placa de aquecimento (IKA C-MAG HS7), "B" – Kitassato de 250 mL (recipiente reacional), "C" – Béquero de 1 L contendo água, "D" – Proveta de 500 mL invertida, "E" – Béquero de 5 L contendo água

Os ensaios para a produção de hidrogênio foram realizados em duplicata, sendo denominados como ensaio 1 e 2 utilizando a solução ácida. Ambos os ensaios foram conduzidos com 1,6 g de blister para um volume de 100 mL de solução de ácido sulfúrico, garantindo assim o excesso de ácido no meio reacional, que estará sendo consumido no processo. O meio reacional foi mantido inicialmente a temperaturas 50, 80 e 100 °C por meio da placa de aquecimento, assim como realizado no artigo de Alviani *et al.* (2019).

Adicionalmente, foram realizados os ensaios 3 e 4 utilizando 100 mL da solução hidróxido de sódio para a quantidade de 1,6 g de blister, sendo o meio reacional aquecido a 50 °C, onde já foi observado uma produção significativas de hidrogênio, utilizando o mesmo aparato experimental, apresentado na Figura 20.

3.2.3.1 Avaliação da influência do tempo de tratamento com ácido fórmico (Etapa 1) na produção de hidrogênio (Etapa 2)

Durante o estudo preliminar também observou-se a necessidade da avaliação da influencia da Etapa 1 na Etapa 2. Este estudo foi conduzido utilizando blisters submetidos a diferentes tempos de tratamento com ácido fórmico $4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$. Em cada ensaio, foi empregada uma massa total de 4 g, contendo assim 0,4 g de alumínio. Os testes foram realizados em duplicata para tempos de tratamento de 0, 0,5, 4 e 6 h, monitorando o volume de hidrogênio produzido ao longo do tempo. As reações foram realizadas a duas temperaturas distintas, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e $50 \text{ }^\circ\text{C}$, com o objetivo de comparar os resultados obtidos sob diferentes condições térmicas utilizando a solução de hidróxido de sódio $0,5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ até a não observação de produção de H_2 .

3.2.4 Etapa 2 - Produção de hidrogênio

Para obter os resultados de produção de hidrogênio empregando hidróxido de sódio, foi utilizado um Central Composite Design (CCD), com três níveis para cada variável e realizados em duplicata. Esse modelo foi escolhido por ser amplamente utilizado em estudos que buscam ajustar modelos quadráticos e explorar a relação entre as variáveis independentes e a variável resposta. Além disso, o CCD é adequado para identificar interações entre fatores e detectar a presença de curvaturas nos dados, proporcionando maior precisão na obtenção de superfícies de resposta (Neto; Scarminio; Bruns, 2010).

No presente estudo, o planejamento foi configurado com valor $\alpha = \sqrt{2}$ para os pontos axiais, o que aumenta a abrangência da região analisada e permite uma melhor caracterização da resposta experimental. As variáveis independentes analisadas foram temperatura e massa de alumínio, com os respectivos níveis apresentados na Tabela 1. O planejamento CCD também possui capacidade em otimizar os resultados obtidos com um número reduzido de experimentos, sendo especialmente útil em estudos onde há necessidade de minimizar recursos e tempo. (Neto; Scarminio; Bruns, 2010) As duplicatas foram realizadas para aumentar a confiabilidade dos dados e possibilitar a estimativa do erro experimental.

TABELA 1 – FATORES UTILIZADOS NO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.

Fatores:	$(-\alpha)$	$(-)$	(0)	$(+)$	$(+\alpha)$
1 Temperatura ($^\circ\text{C}$)	19,8	25	37,5	50	55,2
2 Massa de Alumínio (g)	0,16	0,2	0,3	0,4	0,44

FONTE: O autor (2025).

A Tabela 2 apresenta a matriz experimental utilizada no estudo, na qual cada medida foi realizada em duplicata. Essa abordagem permite a avaliação do erro experi-

mental e proporciona uma base mais robusta para análise estatística, como a aplicação de ANOVA para verificar a significância dos fatores e interações investigados.

TABELA 2 – MATRIZ DO PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL (CCD) 2².

Ensaio	Fatores	
	1	2
1	-	-
2	+	-
3	-	+
4	+	+
5	- α	0
6	+ α	0
7	0	- α
8	0	+ α
9	0	0

FONTE: O autor (2025).

A condução dos ensaios foi realizada utilizando o mesmo aparato experimental ilustrado na Figura 20, empregando exclusivamente a solução alcalina de hidróxido de sódio a 0,5 mol·L⁻¹, na proporção de 100 mL por ensaio. Para assegurar as quantidades de desejadas de 0,2 e 0,4 g alumínio no meio reacional foram utilizadas, respectivamente, 2,0 e 4,0 g de blister previamente tratado com ácido fórmico a 4 mol·L⁻¹ por 30 minutos.

O volume de H₂ produzido foi obtido em mL por meio da proveta invertida e o tempo de reação (período de tempo em que ocorreu a etapa 2) em min. O tempo total (obtido através da soma do tempo da etapa 1 mais o tempo de reação da etapa 2) foi dado em h. A taxa de produção que foi fornecida em mL·min⁻¹, obtida por meio de uma regressão linear no gráfico de volume de H₂ produzido em função do tempo para cada ensaio realizado.

Utilizando o Python como ferramenta computacional, os dados experimentais de taxa de produção em função das variáveis independentes (temperatura e massa de alumínio) foram empregados na modelagem estatística, conduzida por meio do Método de Regressão por Mínimos Quadrados Ordinários (OLS). Essa abordagem permitiu gerar a tabela ANOVA, contendo os principais parâmetros estatísticos do modelo, além de viabilizar a construção das superfícies de resposta e a determinação da equação matemática que descreve o comportamento do sistema. O script em Python utilizado para a análise do planejamento experimental encontra-se no Apêndice 2.

Além disso, foram realizados quatro ensaios experimentais afim de validar a equação obtida através da modelagem, sendo empregadas as temperaturas de 30 e 45 °C e massas de alumínio de 0,25 e 0,35 g, cujos resultados serviram para validar a capacidade preditiva do modelo.

3.2.5 Análise energética do tratamento de reciclagem dos blisters

Foi realizada inicialmente uma análise energética experimental das principais etapas do processo de reciclagem das embalagens blister, envolvendo a fragmentação, o aquecimento da solução de ácido fórmico, a separação das camadas por meio do hidrapulper e a geração de hidrogênio a partir do alumínio a 50 °C.

Avaliou-se o processo de fragmentação das embalagens, realizado utilizando o micro power monitor (CAI-HW17), que registrou a corrente elétrica em intervalos de 1 s durante o processamento de uma amostra de 37,67 g de blisters, com tempo total de 117 s. As medições foram realizadas em triplicata, sob tensão de 129,6 V e frequência de 60 Hz. A potência instantânea foi calculada pela expressão $P(t) = V \cdot I(t)$, e a energia total foi obtida por integração temporal, sendo posteriormente dividida pela massa de blister processada.

Na etapa seguinte, um béquer contendo 200 mL de solução de ácido fórmico foi isolado termicamente e aquecido sobre uma placa térmica configurada para 100 °C. A solução foi aquecida de 18 °C (temperatura ambiente) até atingir 60 °C utilizando a placa de aquecimento (IKA C-MAG HS7) configurada para 100 °C, sendo então estabilizada nesta temperatura com variação inferior a ± 1 °C. Os fragmentos de blister foram então submersos na solução por um período de 30 min e o consumo energético foi determinado com base na potência média da placa térmica durante o aquecimento, também sendo dividida pela massa de blister processada sendo igual a 10 g.

Para o processamento no hidrapulper (exposição da camada de alumínio do blister), em razão das limitações do power monitor, adotou-se o valor nominal de potência fornecido pelo fabricante do equipamento, igual a 1000 W. Assim, a energia consumida em 30 s de operação foi estimada como $E = P \cdot \Delta t = 30$ kJ, correspondente a 0,00833 kWh que foi dividida pela massa de 10 g de blister processado.

Na última etapa, considerou-se apenas a energia envolvida no aquecimento de 100 mL de solução de hidróxido de sódio para reagir com 4 g de blister, partindo de 18 °C até 50 °C, utilizado também a placa de aquecimento configurada para 100 °C. A energia liberada pela reação exotérmica entre o alumínio presente nos blisters e a solução foi considerada desprezível, tendo em vista o tempo de processo de 10 min.

O consumo energético associado às etapas de aquecimento e manutenção da temperatura das soluções também foi determinado utilizando o balanço de energia baseado no calor sensível, com o objetivo de obter um valor teórico, utilizando a Equação 3.1.

$$Q_{\text{aquec}} = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

Na Equação 3.1 o Q corresponde à quantidade de energia (J), m é a massa da solução (g), c é o calor específico ($\text{J}\cdot(\text{g}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$) e ΔT é a variação de temperatura ($^\circ\text{C}$).

Para a etapa de tratamento ácido, foram considerados 200 mL de solução de ácido fórmico $4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, com densidade de $1,05 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ e calor específico da água ($4,2 \text{ J}\cdot(\text{g}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$) (Perry; Green; Maloney, 2018). A solução foi aquecida de 18 até $60 \text{ }^\circ\text{C}$ e mantida nesta temperatura durante 30 minutos. A massa da solução foi calculada em 210 g.

Da mesma forma, para a solução alcalina, considerou-se o aquecimento de 100 mL de solução de NaOH $0,5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, com densidade de $1,04 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ e calor específico da água ($4,2 \text{ J}\cdot(\text{g}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$) (Perry; Green; Maloney, 2018). A solução foi aquecida de 18 até $50 \text{ }^\circ\text{C}$ e mantida nesta temperatura durante 10 minutos. A massa da solução foi de 104 g.

Além da energia necessária para o aquecimento (Q_{aquec}), também foi considerada a energia associada à manutenção da temperatura (Q_{manut}), estimada pela Equação 3.2, considerando as perdas térmicas para o ambiente.

$$Q_{\text{manut}} = U \cdot A \cdot \Delta T \cdot t \quad (3.2)$$

Em que U representa o coeficiente global de transferência de calor, considerado como $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ (Incropera *et al.*, 2007); A corresponde à área superficial exposta do recipiente (m^2); ΔT é a diferença de temperatura entre a solução e o ambiente ($^\circ\text{C}$); e t é o tempo de manutenção da temperatura (s).

As áreas dos recipientes foram estimadas com base em suas dimensões geométricas: para o tratamento com ácido fórmico, considerou-se uma área de $0,064 \text{ m}^2$, correspondente à área lateral somada à superfície superior de um béquer Berzelius de 1 L (raio de 5 cm e altura de 18 cm). Para o processo com solução de hidróxido de sódio, utilizou-se uma área de $0,022 \text{ m}^2$, estimada a partir da área lateral de um cone truncado representando o kitassato de 250 mL (com raio maior de 4,25 cm, raio menor de 1,5 cm e altura de 12 cm).

3.2.6 Determinação da cinética da reação

Os experimentos para determinar a cinética de reação foram realizados variando a temperatura do meio reacional, sendo monitorado o volume de hidrogênio produzido em função do tempo. Para cada temperatura foi realizado um ensaio em duplicata, de forma a calcular o erro padrão nas medidas. As temperaturas utilizadas foram 25, 35, 45, 55, 65 e $75 \text{ }^\circ\text{C}$, sendo controladas por meio da placa de aquecimento

e a utilização do termômetro para controle. A solução empregada foi a de hidróxido de sódio $0,5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

Após os ensaios foram plotados gráficos do volume de hidrogênio em função do tempo para cada temperatura e por meio de regressões lineares as constantes de velocidade da reação (k) foram obtidas.

Os valores de k obtidos, foram aplicados na equação de Arrhenius (Costa, 2025), que estabelece uma relação linear entre o logaritmo natural de k e o inverso da temperatura absoluta ($\frac{1}{T}$) descrita na Equação 3.3.

$$\ln(k) = \ln(A) - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (3.3)$$

Onde na Equação 3.3 A é o fator pré-exponencial, E_a é a energia de ativação, R é a constante universal dos gases ($8,314 \text{ J}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$) e T é a temperatura em Kelvin.

Os valores de $\ln(k)$ foram plotados em função de $\frac{1}{T}$, e um ajuste linear foi realizado. A inclinação da reta obtida permitiu a determinação da energia de ativação (E_a), enquanto a intersecção forneceu o fator pré-exponencial (A).

Para cada temperatura, foi calculada a média dos valores de k obtidos nas duplicatas. O desvio padrão (σ) também foi calculado para determinar a incerteza associada a essas medidas. A partir dessas médias e desvios padrão, foram geradas barras de erro para cada ponto no gráfico de $\ln(k)$ versus $\frac{1}{T}$.

A equação ajustada para a reta de Arrhenius foi obtida utilizando um ajuste por mínimos quadrados, com o coeficiente de determinação (R^2) sendo calculado para verificar a qualidade do ajuste.

A análise dos dados e o ajuste linear foram realizados utilizando o software *Python*, com as bibliotecas *NumPy*, *SciPy* e *Matplotlib*. O código Python utilizado para gerar o ajuste linear e calcular os erros está fornecido no Apêndice 3.

Além disso, foram utilizados gráficos de barras de erro para representar visualmente as incertezas associadas aos dados experimentais.

3.2.7 Utilização de Arduino e sensor de hidrogênio

Para o monitoramento da concentração de hidrogênio gerado durante os experimentos, foi utilizado o sensor de gás MQ-8 (Figura 21), reconhecido por sua sensibilidade à presença de H_2 no ambiente.

Inicialmente, o sensor foi integrado a uma placa Arduino Uno (Figura 22), conectada a um módulo SD (Figura 23), permitindo a coleta e o armazenamento dos dados gerados. Essa configuração possibilitou o registro da concentração de hidrogênio

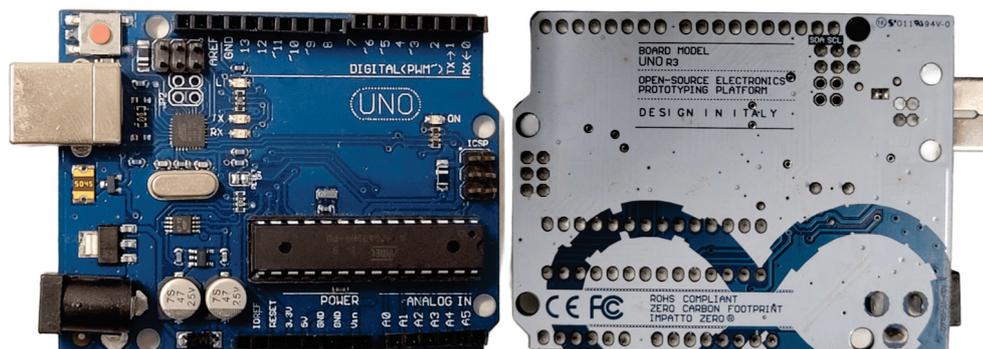
FIGURA 21 – SENSOR ARDUINO MQ-8.



FONTE: O autor (2025).

em função do tempo, sendo as informações armazenadas em um cartão SD de 4 GB para análise posterior. Além disso é importante ressaltar que microcontrolador Arduino Uno possui um Conversor analógico-digital (ADC) com resolução de 10 bits, que permite transformar sinais analógicos em valores digitais. Isso significa que a faixa de tensão aplicada às portas analógicas, normalmente variando de 0 a 5 V (que é a resposta do sensor a presença do gás hidrogênio), é discretizada em 1024 níveis distintos. Esses níveis são representados por valores inteiros que variam de 0 a 1023, sendo 0 equivalente a 0 V e 1023 correspondente a 5 V. Dessa forma, cada unidade no valor digital representa um incremento de aproximadamente 4,88 milivolts ($5V/1024$). Essa resolução permite uma leitura relativamente precisa da tensão aplicada, possibilitando o monitoramento de variáveis analógicas no desenvolvimento experimental e no controle de processos.

FIGURA 22 – PLACA DE DESENVOLVIMENTO ARDUINO UNO.

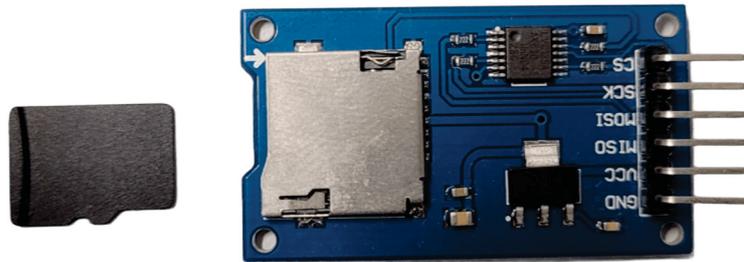


FONTE: O autor (2025).

O sensor MQ-8 foi posicionado na passagem do hidrogênio antes de ser armazenado na proveta para permitir que também seja quantificado analiticamente. Na Figura 24 é apresentado o aparato devidamente montado.

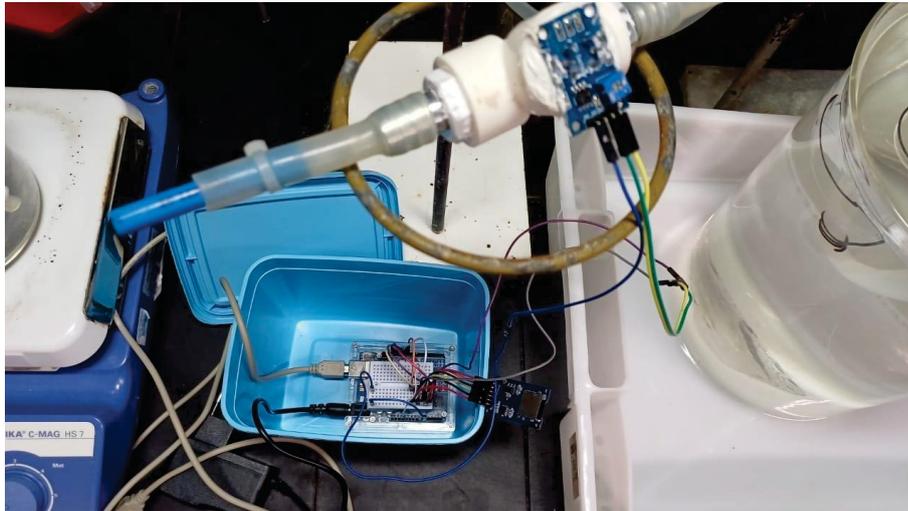
Foram realizados três testes para o monitoramento da geração de hidrogênio:

FIGURA 23 – MÓDULO SD.



FONTE: O autor (2025).

FIGURA 24 – SISTEMA COM SENSOR DE MEDIÇÃO DE HIDROGÊNIO E ARMAZENAMENTO DOS DADOS UTILIZANDO ARDUINO UNO E SD CARD.



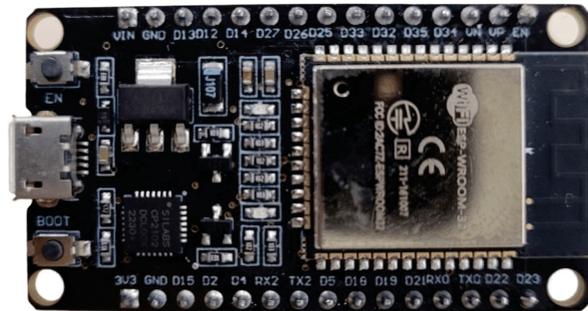
FONTE: Valt *et al.* (2024).

- Teste 1: utilizou-se 2 g de blister fragmentado em 100 mL de solução alcalina de hidróxido de sódio $0,5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, aquecida a $50 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Teste 2: os blisteres foram previamente tratados com solução de ácido fórmico $4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ por 30 min, para remoção da camada de primer. Após o tratamento, 2 g do material foram imersos em 100 mL de NaOH $0,5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, aquecidos a $50 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Teste 3: sem a remoção prévia do primer, foram utilizados 4 g de blister em 100 mL da mesma solução alcalina aquecida a $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

Durante os testes, foram identificadas limitações no sistema baseado na placa Arduino Uno, especialmente em relação ao armazenamento dos dados no cartão SD. As falhas eram ocasionadas por problemas nas conexões e devido à grande quantidade de fios e componentes, tornava-se difícil localizar a origem exata dos erros. Além disso, havia a necessidade de aprimorar a conectividade e flexibilizar o acesso às informações coletadas. Para superar essas dificuldades, a placa Arduino Uno foi substituída pela ESP-32 (Figura 25), um microcontrolador mais avançado, compatível com o sensor

MQ-8 e capaz de transmitir dados via comunicação Bluetooth. A ESP32 conta com ADCs de resolução nominal de até 12 bits, permitindo a conversão de sinais analógicos em valores digitais variando de 0 a 4095, totalizando 4096 níveis discretos. Dessa forma, considerando uma faixa de tensão típica de 0 a 3,3 V (tensão de referência padrão da ESP32), cada incremento no valor digital corresponde a aproximadamente 0,8 mV ($3,3V/4096$). A resolução ampliada permite uma leitura mais detalhada da variação dos sinais, o que pode ser vantajoso para monitoramento e controle em processos experimentais. O código desenvolvido e aplicado na ESP-32 está disponível no Apêndice 4.

FIGURA 25 – PLACA DE DESENVOLVIMENTO ESP32.

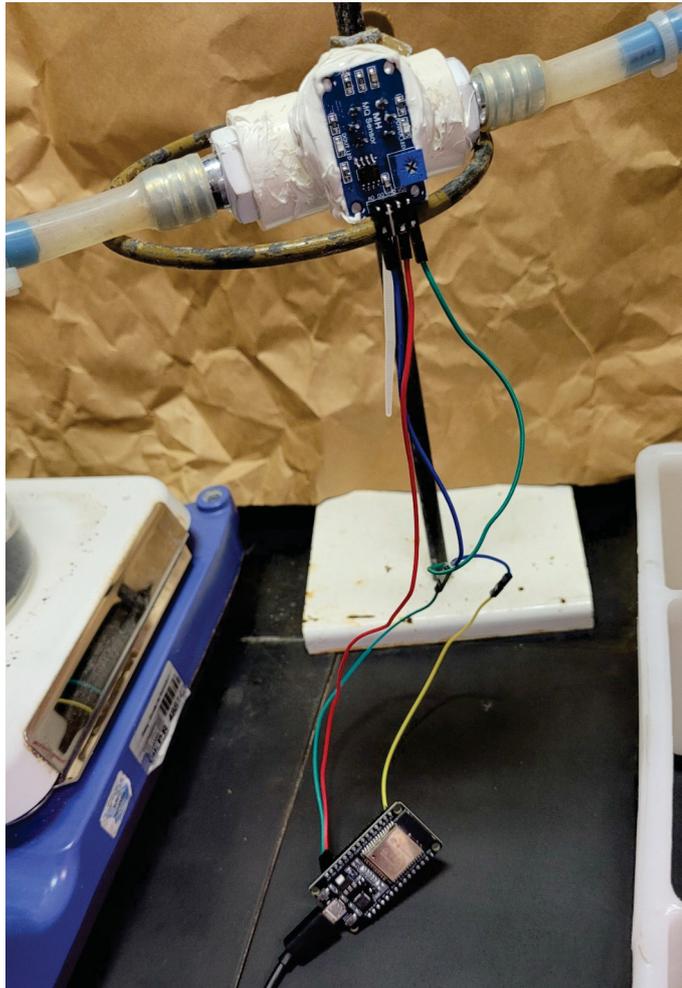


FONTE: O autor (2025).

Além disso, desenvolveu-se um código em Python, disponível no Apêndice 5 que automatiza a coleta e o armazenamento dos dados em arquivos locais no computador, além de exibir em tempo real os gráficos da leitura do sensor ao longo do tempo. Esse monitoramento dinâmico proporciona uma visualização imediata do comportamento do sistema, permitindo intervenções rápidas quando necessário.

A Figura 26 apresenta o novo sistema, visualmente mais simples e com menos conexões, mas com maior eficiência na transmissão e visualização dos dados em tempo real.

FIGURA 26 – SISTEMA COM SENSOR DE MEDIÇÃO DE HIDROGÊNIO E ESP32.



FONTE: O autor (2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos, envolvendo as análises de caracterização dos blisters utilizados, assim como os resultados de separação das camadas, estudo preliminar, produção de hidrogênio e cinética de obtenção do hidrogênio.

4.1 CARACTERIZAÇÃO INICIAL DOS BLISTERES

A caracterização inicial dos blisters diz respeito a metodologia analítica aplicada na avaliação do blister sem nenhum tipo de tratamento. Os resultados da análise por FRX estão apresentados na Tabela 3.

TABELA 3 – RESULTADOS FRX BLISTER SEM TRATAMENTO

Elementos	Composição (%)	Elementos	Composição (%)
Al_2O_3	13,51	Cl	0,06
P_2O_5	0,28	MgO	0,04
SiO_2	0,19	K_2O	0,03
PbO	0,13	TiO_2	0,03
SO_3	0,10	SnO_2	0,01
Fe_2O_3	0,09	CuO	0,01
Na_2O	0,09	ZnO	0,01
CaO	0,07	P.F.	85,33

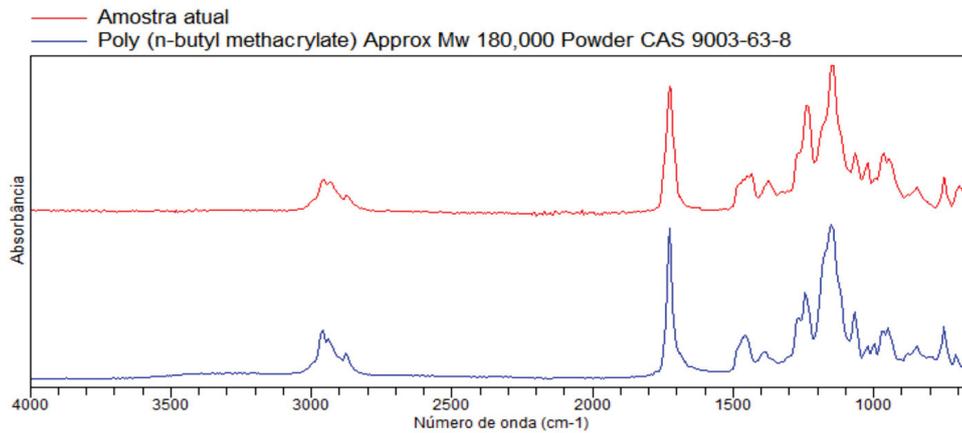
FONTE: O autor (2025).

Estes dados indicaram que a quantidade de 13,51% de alumínio presente nos blisters, está dentro da faixa esperada que é de 10 a 15% segundo Çapkın e Göknelma (2023a). A perda ao fogo sendo igual a 85,33% é referente a composição polimérica do blister.

A Figura 27 apresenta um espectro de FTIR comparando uma amostra do adesivo retirado do blister (linha vermelha) com o espectro de referência do Poli-n-butil metacrilato (PMMA), de massa molar aproximada de $180.000 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ (linha azul). No gráfico, o eixo X representa o número de onda (cm^{-1}), indicando as frequências vibracionais dos grupos funcionais, enquanto o eixo Y mostra a absorbância, revelando a intensidade de absorção da radiação infravermelha.

Observa-se que, na região entre 3000 e 2800 cm^{-1} , o espectro de referência exhibe picos característicos das vibrações de estiramento C-H dos grupos metila e metileno, comuns em polímeros como o PMMA. Na amostra atual, esse sinal é menos evidente, sugerindo diferenças na composição molecular ou a presença de outros grupos funcionais. Já na faixa entre 1800 e 1600 cm^{-1} , picos distintos na amostra atual indicam a presença de ligações C=O (carbonila), possivelmente associadas a

FIGURA 27 – RESULTADO FTIR ADESIVO.



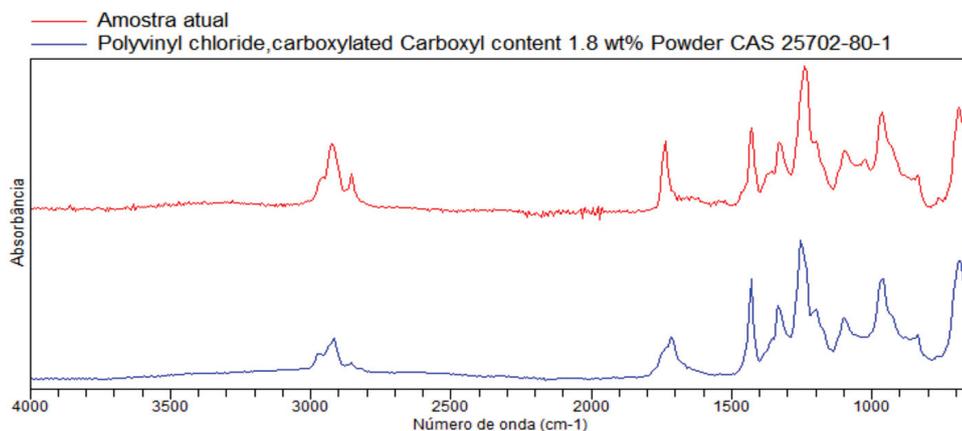
FONTE: O autor (2025).

grupos ésteres, comuns em materiais plásticos. Na região entre 1500 e 1000 cm^{-1} , as diferenças entre os espectros tornam-se mais evidentes, com picos mais intensos e distintos na amostra atual, correspondentes às vibrações de deformação e de estiramento de ligações C-O, C-C e C-H, características de polímeros com diferentes graus de substituição ou ramificação (Pavia *et al.*, 2015).

As discrepâncias observadas entre a amostra atual e o PMMA indicam uma composição química um pouco modificada em relação ao PMMA puro, sugerindo a presença de outros componentes ou aditivos que alteram levemente o perfil vibracional do material.

A Figura 28 apresenta o espectro FTIR, comparando a amostra de polímero transparente atual (linha vermelha) com o espectro de referência do policloreto de vinila (PVC) carboxilado, com teor de carboxila de 1,8% em peso e número CAS 25702-80-1 (linha azul).

FIGURA 28 – RESULTADO FTIR PARTE POLIMÉRICA.



FONTE: O autor (2025).

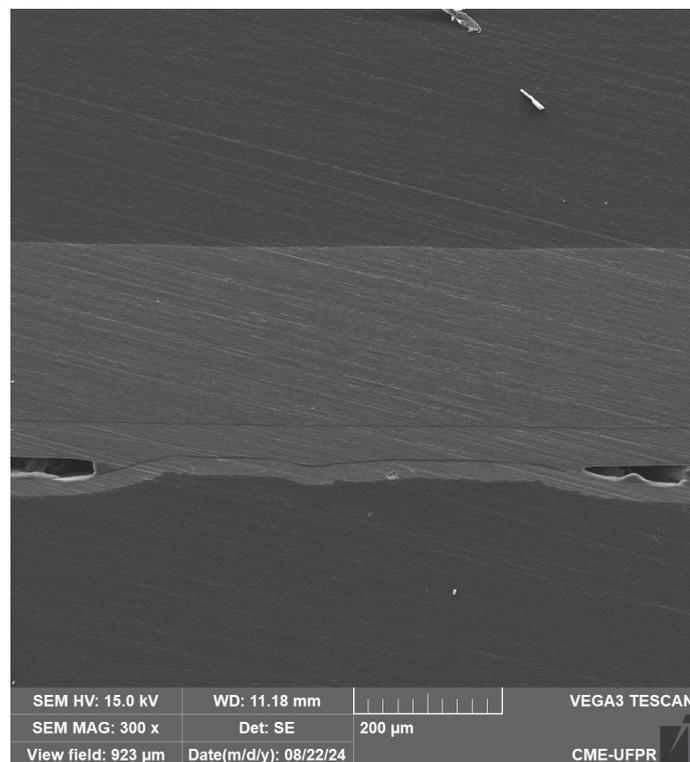
Na região entre 3000 e 2800 cm^{-1} , observa-se que o espectro de referência

do PVC carboxilado apresenta picos de vibrações de estiramento C-H, típicos de cadeias alifáticas. Na amostra atual, esses sinais estão menos definidos, indicando uma possível diferença na composição química ou na estrutura molecular em comparação ao PVC puro. Entre 1800 e 1600 cm^{-1} , picos distintos são observados na amostra atual, sugerindo a presença de grupos carbonílicos (C=O), possivelmente ligados a grupos funcionais adicionais. No espectro de referência, esses picos são menos intensos, indicando uma menor concentração desses grupos ou uma composição molecular diferente. Na região de 1500 a 1000 cm^{-1} , a amostra atual apresenta picos mais acentuados, correspondentes a vibrações de ligações C-O e C-Cl, o que pode indicar modificações na estrutura do polímero ou a presença de aditivos. O PVC carboxilado de referência exibe uma distribuição de picos similar, mas com intensidades e posições ligeiramente diferentes (Pavia *et al.*, 2015).

As discrepâncias entre os espectros sugerem que a amostra atual possui uma composição química modificada em relação ao PVC carboxilado puro, possivelmente com diferentes grupos funcionais ou aditivos. Os relatórios gerados das análises de FTIR realizadas, podem ser observados nos Apêndices 1 deste trabalho.

A imagem obtida por MEV do perfil do blister utilizado neste estudo com ampliação de 300 vezes está apresentada na Figura 29.

FIGURA 29 – IMAGEM DO PERFIL DO BLISTER UTILIZADO NESTE ESTUDO, OBTIDO POR MEIO DO MEV.

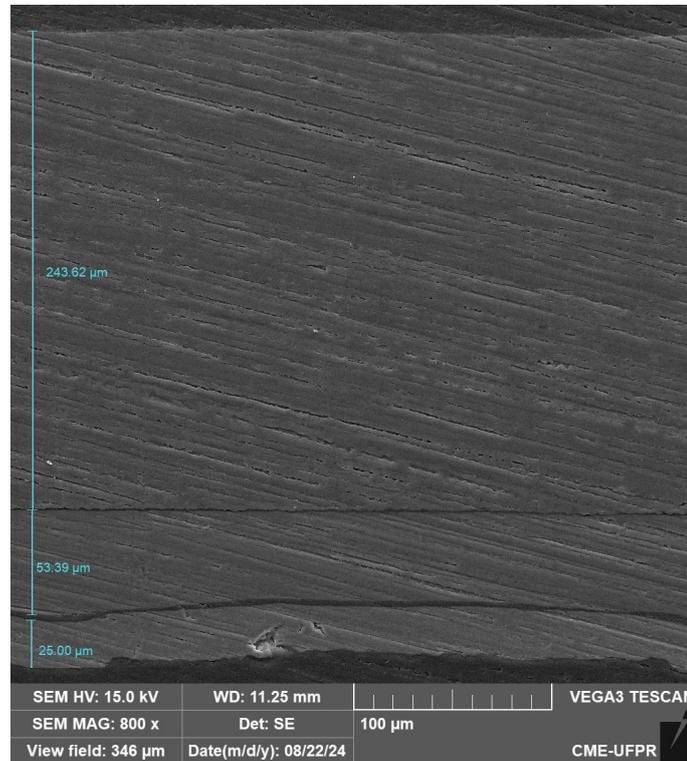


FONTE: O autor (2025).

É possível observar duas cavidades onde anteriormente havia medicamentos,

bem como a camada metálica de alumínio localizada abaixo das cavidades. Acima, identificam-se duas camadas poliméricas distintas. A Figura 30 apresenta uma ampliação de 800 vezes, mostrando as medidas de cada camada observada.

FIGURA 30 – IMAGEM DO PERFIL DO BLISTER UTILIZADO NESTE ESTUDO COM AMPLIAÇÃO DE 800X APRESENTANDO O TAMANHO DAS CAMADAS OBSERVADAS.

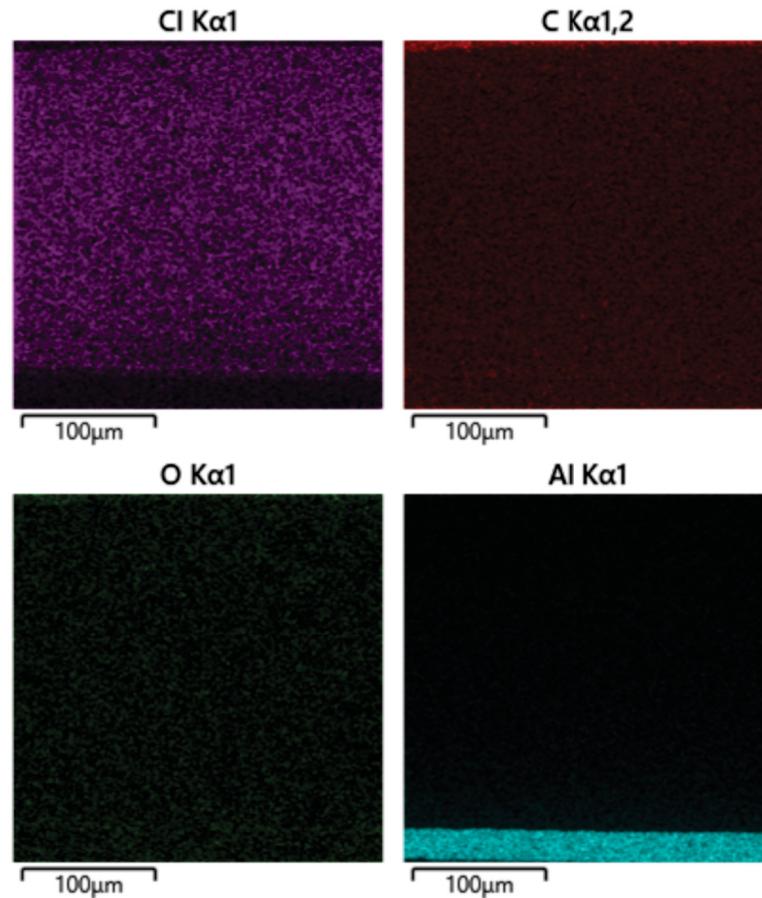


FONTE: O autor (2025).

Juntamente com as observações obtidas através do mapa de varredura do perfil do blister analisado, conforme apresentado na Figura 31 foi possível observar que a camada metálica possui $25 \mu m$, a primeira camada polimérica apresenta espessura de $53,39 \mu m$, e a última camada possui $243,62 \mu m$, resultados comparativamente próximos aos encontrados por Shukla *et al.* (2022) onde foram observadas o mesmo número de camadas para a amostra B apresentada em seu trabalho, com $34 \mu m$ na camada de alumínio, $57,52 \mu m$ na primeira camada polimérica e por fim $274,49 \mu m$ na última camada.

O mapa revelou a presença dos elementos cloro, carbono e oxigênio na parte polimérica do blister, sugerindo que o material pode ser PVC, em concordância com os resultados obtidos por FTIR. Além disso, foi detectada a presença de alumínio na camada inferior, correspondente ao metal utilizado para estrutura e de proteção dos blisters.

FIGURA 31 – MAPAS DE VARREDURA POR EDS-MEV DO PERFIL DO BLISTER UTILIZADO NESTE ESTUDO.



FONTE: O autor (2025).

4.2 ETAPA 1 - SEPARAÇÃO DAS CAMADAS

Após a caracterização inicial do blister, foram realizados experimentos com o tratamento em ácido fórmico para verificar a sua capacidade de remoção das camadas poliméricas e da exposição do alumínio presente nas embalagens.

A Tabela 4 apresenta os resultados, relacionando o tempo de tratamento e a quantidade de polímero e alumínio obtida após os experimentos. O pH da solução de ácido fórmico também foi monitorado, sendo inicialmente 1,67.

TABELA 4 – RESULTADO DOS TESTES DE SEPARAÇÃO DAS CAMADAS QUE COMPÕEM O BLISTER

Tempo (h)	Massa inicial (g)	Massa PVC com Al aderido (g)	Massa Al separado (g)	Al removido (%)	pH final
1	6,0787	5,9758	0,0000	0,0	1,69
2	6,0713	5,9701	0,0000	0,0	1,81
3	6,0745	5,7886	0,1872	30,7	1,90
4	6,0789	5,3147	0,4978	81,6	1,96
5	6,0681	5,1435	0,5943	97,4	2,00
6	6,0781	5,1132	0,6104	100,0	2,08

FONTE: O autor (2025).

Os resultados indicaram um aumento gradual na separação das camadas de polímero (podendo ser observado pelas porcentagens de Al removido) e alumínio com o aumento do tempo de contato com o ácido fórmico, todas sendo facilitadas pelo uso do hidrapulper (apresentado na Figura 12). Nos experimentos de 1 a 3, apenas a camada externa de primer e tinta que foi visualmente removida. A separação efetiva da camada metálica do blister começou a ocorrer somente após 4 horas de tratamento.

Observou-se que um tempo de contato prolongado entre o blister e a solução de ácido fórmico facilitou a separação entre o polímero e o alumínio, ocorrendo totalmente após 6 horas de tratamento. O aumento do pH da solução pode ser indicativo da dissolução do adesivo presente entre as camadas, causada pela solução de ácido fórmico. A diferença entre a quantidade inicial de blister utilizada e a soma das quantidades de polímero e alumínio obtidas pode estar relacionada a dissolução desse adesivo e da camada de tinta que permanecem na solução após experimentos.

A quantidade de alumínio obtida após o experimento 6 foi de aproximadamente 10%, confirmando a quantidade comumente observada nas embalagens blisteres de apenas uma camada de alumínio e polímero transparente, conforme apresentado por Rimšaitė, Mumladze e Denafas (2019).

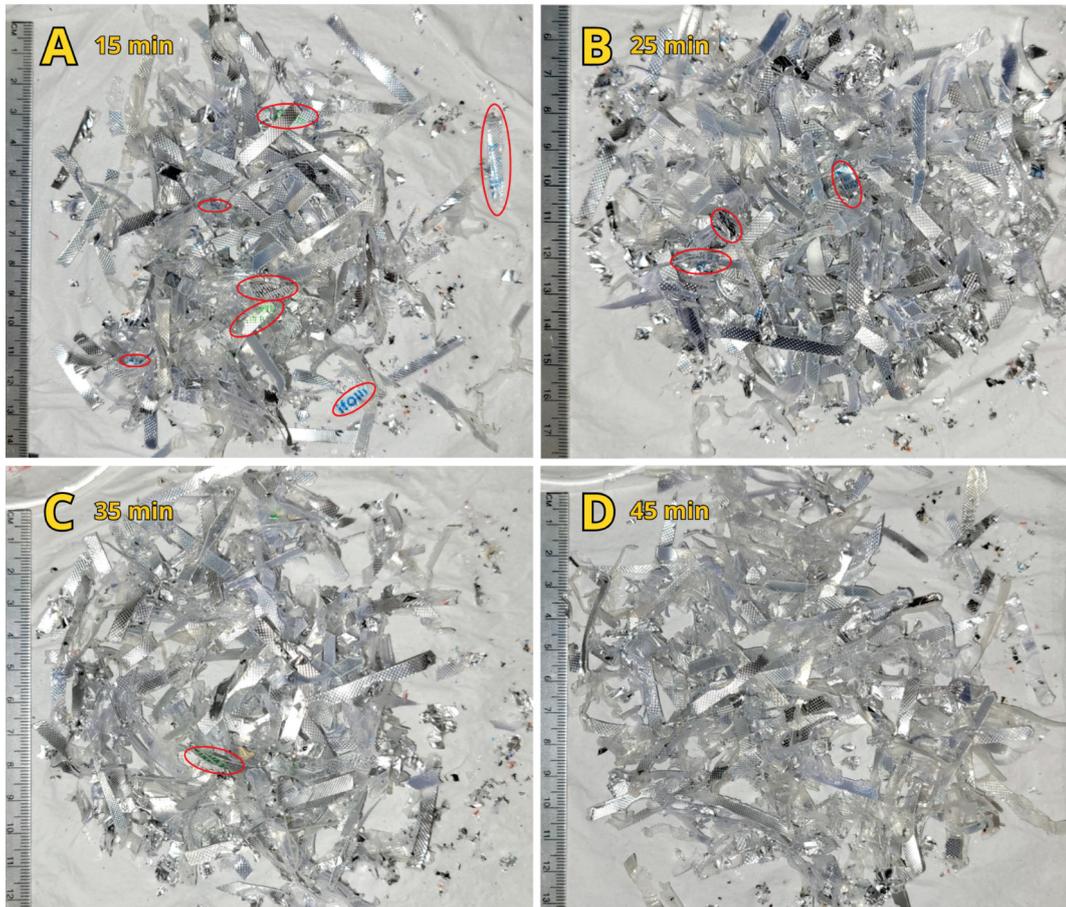
Na Figura 32 estão dispostas fotos dos ensaio realizados utilizando 15, 25, 35 e 45 min de tratamento com ácido fórmico, sendo marcadas em vermelho as partes onde a camada de tinta e do primer ainda estavam aderidas na superfície do blister.

Os resultados visuais indicam que em 45 min de tratamento com ácido fórmico o blister está totalmente limpo, não necessitando de 1 h para isso. Além disso foi verificado que entre 25 e 35 min houve uma boa exposição do alumínio e por conta disso o valor intermediário foi escolhido para realizar o planejamento experimental e demais ensaios.

Os resultados visuais para o tratamento de 30 min estão apresentados na Figura 33.

A Figura 33 mostra que a pigmentação presente nas embalagens antes do

FIGURA 32 – RESULTADOS VISUAIS DE TRATAMENTO FÓRMICO COM MENOR TEMPO DE TRATAMENTO.



FONTE: O autor (2025).

FIGURA 33 – EMBALAGENS BLISTER ANTES E APÓS TRATAMENTO DE 30 MIN COM ÁCIDO FÓRMICO.



FONTE: O autor (2025).

tratamento foi completamente removida. Esse resultado é ilustrado na Figura 34, onde é possível observar a tinta e primer que permaneceu na peneira que foi utilizada para a separação dos blisters tratados. Após o tratamento, observou-se a exposição da superfície metálica do alumínio, caracterizada por sua cor brilhante. Esse resultado

sugere que o tempo de tratamento de 30 minutos foi suficiente para a remoção da camada de primer e tinta.

FIGURA 34 – TINTA E PRIMER RETIRADO DO BLISTER APÓS 0,5 H DE TRATAMENTO.



FONTE: O autor (2025).

4.3 CARACTERIZAÇÃO APÓS TRATAMENTO COM ÁCIDO FÓRMICO DOS BLISTERS

A análise por FRX foi realizada nos blisters com tratamento de 30 min e com 6 h, sendo que neste último utilizou-se o alumínio separado da parte polimérica. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.

TABELA 5 – RESULTADOS FRX APÓS TRATAMENTO

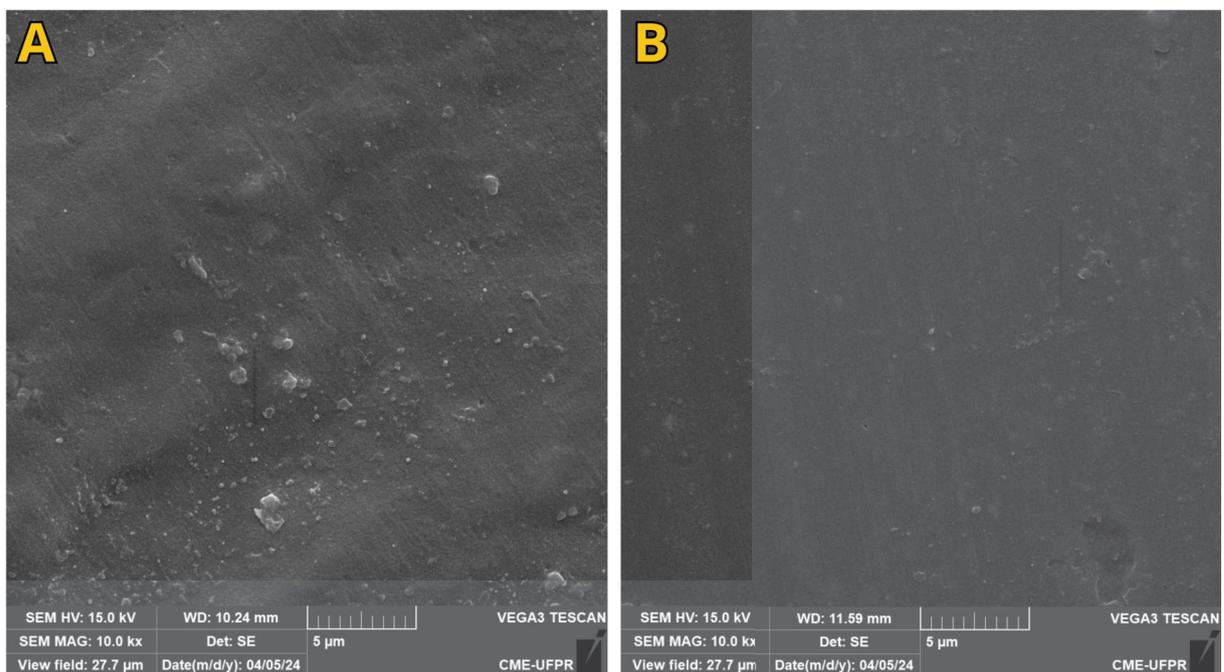
Elementos	30 min	6 h
<i>Al₂O₃</i> (%)	12,87	91,60
<i>P₂O₅</i> (%)	0,37	0,09
<i>SiO₂</i> (%)	0,21	0,95
<i>PbO</i> (%)	0,03	0,76
<i>SO₃</i> (%)	0,16	0,09
<i>Fe₂O₃</i> (%)	0,10	0,76
<i>Na₂O</i> (%)	0,27	0,38
<i>CaO</i> (%)	0,08	0,28
<i>Cl</i> (%)	0,01	0,09
<i>MgO</i> (%)	0,04	0,00
<i>K₂O</i> (%)	0,01	0,09
<i>TiO₂</i> (%)	0,01	0,09
<i>SnO₂</i> (%)	0,01	0,00
<i>CuO</i> (%)	0,01	0,09
<i>ZnO</i> (%)	0,01	0,09
P.F. (%)	85,79	4,88

FONTE: O autor (2025).

Os resultados indicaram que a quantidade de alumínio presente nos blisters com tratamento de 30 min (12,87%), está dentro da faixa esperada de 10 a 15%, como já comparado com o artigo de Rimšaitė, Mumladze e Denafas (2019).

Foram obtidas imagens por MEV tanto da parte metálica do blister, após tratamento com ácido fórmico por 30 min, quanto de uma folha de alumínio comercial, com o objetivo de comparação. O tratamento com ácido fórmico foi necessário para a remoção da camada de primer e tinta, expondo a superfície metálica do blister. As imagens obtidas estão apresentadas na Figura 35.

FIGURA 35 – MEV DO BLISTER COM TRATAMENTO DE ÁCIDO FÓRMICO E DA FOLHA DE ALUMÍNIO.



FONTE: O autor (2025).

LEGENDA: A - Camada metálica do blister com 30 min de tratamento com ácido fórmico; B - Folha de alumínio.

Ambas as superfícies apresentam uma textura uniforme e sinais de irregularidades típicas do material metálico, demonstrando que o tratamento foi eficaz na remoção do primer e tinta, expondo a camada metálica comparável ao alumínio puro. Os resultados obtidos pelo EDS estão apresentados na Tabela 6.

Os dados indicam que o teor de alumínio (Al) é bastante semelhante entre as duas amostras, com 86,2% para o blister e 86,9% para a folha de alumínio, demonstrando boa consistência analítica e confirmando que o tratamento foi eficaz na exposição da camada metálica comparável ao alumínio de referência.

Quanto aos outros elementos, observou-se um conteúdo maior de carbono (C) no blister tratado (11,5%) em comparação com a folha de alumínio (10,3%), o que

TABELA 6 – RESULTADOS EDS.

	Composição blister 30 min (%)	Composição Alumínio (%)
Al	86,2	86,9
C	11,5	10,3
O	1,3	1,2
Fe	0,9	1,0
Si	0,0	0,5

FONTE: O autor (2025).

pode ser atribuído à presença de resíduos de compostos orgânicos, possivelmente provenientes do primer ou tinta residual. O teor de oxigênio (O) foi similar, indicando uma leve oxidação superficial em ambas as amostras. A presença de ferro (Fe) foi pequena e equivalente em ambas (0,9% e 1,0%, respectivamente), enquanto o silício (Si) foi detectado apenas na folha de alumínio (0,5%).

Esses resultados confirmam que o tratamento aplicado nos blisters é eficiente para remover a maior parte dos contaminantes, expondo uma camada metálica cuja composição química é bastante próxima à do alumínio puro.

4.4 ESTUDO PRELIMINAR DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VIA ROTA ÁCIDA E ALCALINA

A Tabela 7 apresenta os resultados de massa do blister antes de passar pela etapa 2 (Massa blister), a quantidade de polímero resultante após essa etapa (Massa polímero), a massa de alumínio reagido e por fim a porcentagem de alumínio presente no blister, para os 16 ensaios realizados.

TABELA 7 – RESULTADOS DA QUANTIDADE DE ALUMÍNIO NO BLISTER

Massa blister (g)	Massa polímero (g)	Alumínio reagido (g)	Al no blister (%)
2,0110	1,8347	0,1763	8,7668
2,0107	1,8454	0,1653	8,2210
4,0020	3,6362	0,3658	9,1404
4,0011	3,6699	0,3312	8,2777
2,0133	1,7980	0,2153	10,6939
2,0135	1,8154	0,1981	9,8386
4,0085	3,6511	0,3574	8,9161
4,0083	3,6092	0,3991	9,9568
2,0105	1,8579	0,1526	7,5902
2,0091	1,7254	0,2837	14,1208
4,0008	3,6389	0,3619	9,0457
4,0015	3,5991	0,4024	10,0562
2,0089	1,8009	0,2080	10,3539
2,0094	1,7882	0,2212	11,0083
4,0065	3,5563	0,4502	11,2367
4,0046	3,6022	0,4024	10,0484

FONTE: O autor (2025).

O valor médio de alumínio encontrado no blister foi de 9,8295 %, com um

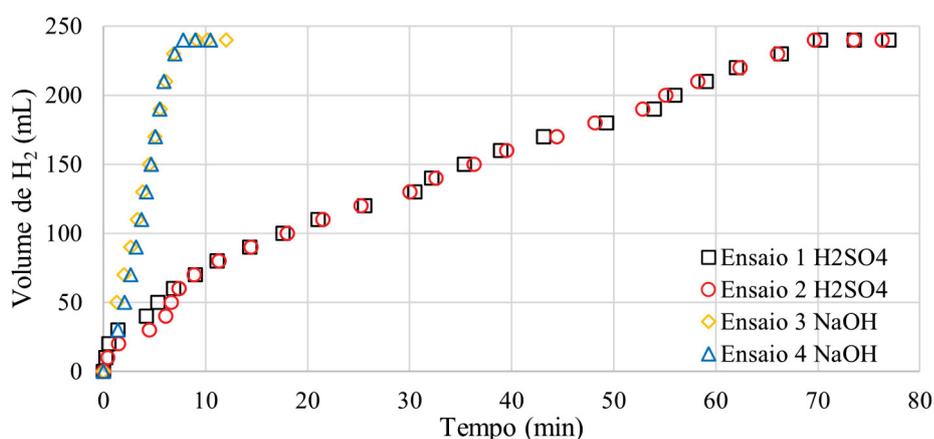
erro padrão de 0,3872. Assim, pode-se afirmar que o blister utilizado neste estudo contém $9,83 \pm 0,39$ % de alumínio. A variância calculada foi de 2,3990, valor que já era esperado ser mais elevado devido ao fato de ser um resíduo sólido, que possui embalagens de diferentes fabricantes e tamanhos diversos o que influencia diretamente na quantidade de alumínio em relação ao peso dos blisters.

Após saber a quantidade de alumínio presente nas embalagens blister foi possível o realizar o estudo preliminar da produção de hidrogênio via rota ácida e alcalina. Iniciando pelo tratamento com ácido fórmico por 30 min, seguido da remoção das camadas de tinta e primer por meio do hidrapulper. Os experimentos 1 e 2 foram realizados em meio ácido, utilizando ácido sulfúrico, enquanto os experimentos 3 e 4 foram conduzidos em meio alcalino, com hidróxido de sódio.

Nos ensaios realizados em meio ácido, não foram observadas quantidades significativas de hidrogênio nas temperaturas inferiores a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dessa forma, os testes realizados nas temperaturas de 50 e $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ foram descartados, por apresentarem rendimentos desprezíveis.

Os resultados obtidos para a produção de hidrogênio em função do tempo de reação, nas diferentes condições avaliadas, estão apresentados na Figura 36.

FIGURA 36 – GRÁFICO DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO PELO TEMPO DE EXPERIMENTO.



FONTE: O autor (2025).

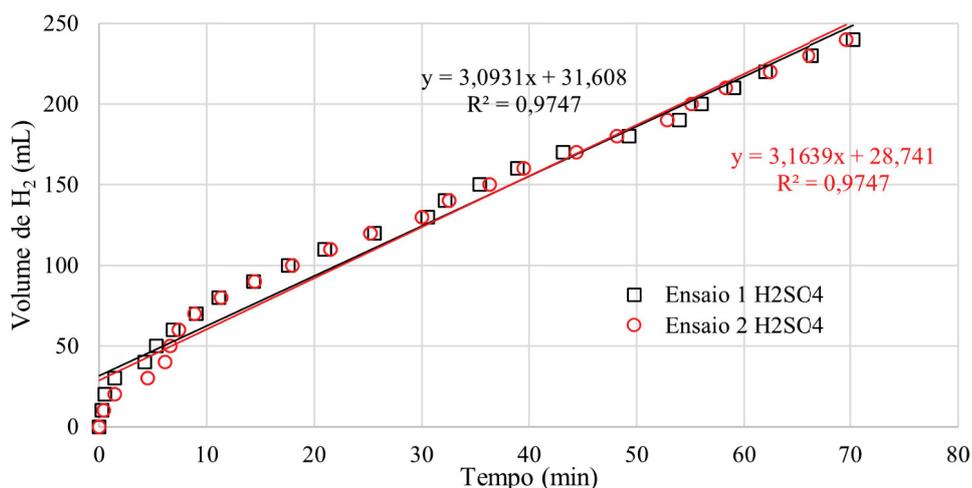
Durante os ensaios, observou-se o consumo completo do alumínio presente nos resíduos de blister, com liberação de hidrogênio, de acordo com as reações representadas nas Equações 2.1, 2.2 e 2.3.

As reações conduzidas em meio ácido apresentaram um tempo total de 70 min, enquanto as reações em meio básico foram significativamente mais rápidas, sendo concluídas em apenas 12 min. O fim da reação foi caracterizado visualmente pela término na liberação de gás e pela ausência do alumínio residual no material sólido remanescente.

O volume final obtido em todos os casos foi em torno de 240 ± 5 ml, bem próximo do valor estequiometricamente esperado de 247,4 ml, considerando gás ideal. Foram empregadas regressões lineares para determinar a taxa de geração de hidrogênio para ambos os casos estudados.

Na Figura 37 são apresentadas as linhas de tendência obtidas por meio de regressões lineares para a produção de hidrogênio em meio ácido.

FIGURA 37 – GRÁFICO COM LINHAS DE TENDÊNCIA PARA OS ENSAIOS 1 E 2 REALIZADO COM ÁCIDO SÚLFURICO.



FONTE: O autor (2025).

A taxa de produção encontrada foi de $3,09 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ no ensaio 1 e $3,16 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ no ensaio 2, sendo a média igual a $3,12 \pm 0,035 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$.

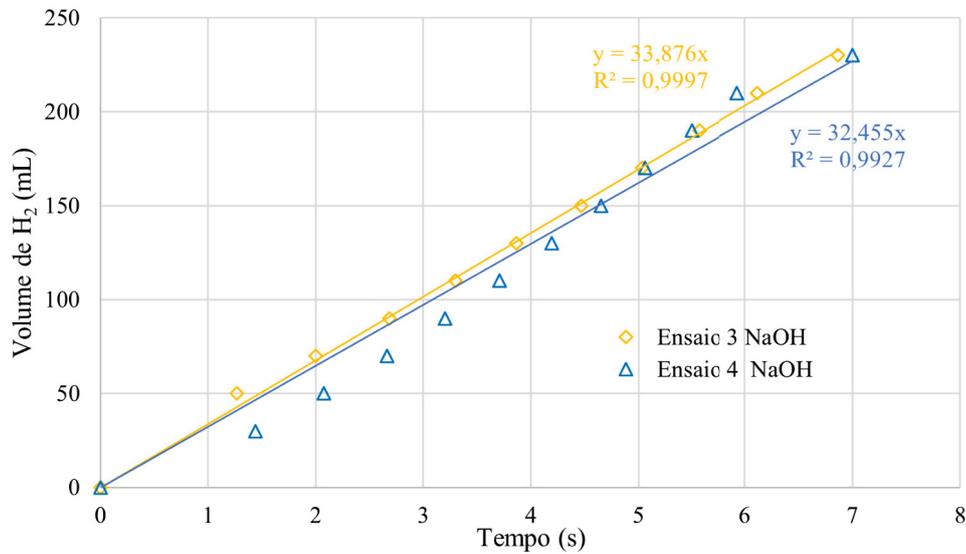
São apresentadas na Figura 38 as linhas de tendência obtidas por meio de regressões lineares para a produção de hidrogênio em meio alcalino.

Os resultados do ensaio 3 e 4 apresentaram taxas de produção de hidrogênio de $33,9 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ e $32,4 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, respectivamente, resultando em uma média de $33,15 \pm 0,75 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$. Esses valores são 10,6 vezes superiores às taxas observadas nos ensaios 1 e 2. Isso evidencia que, mesmo operando a uma temperatura reduzida ($50 \text{ }^\circ\text{C}$), as taxas de obtenção de hidrogênio são significativamente maiores ao utilizar um meio alcalino. Além disso, essa abordagem demanda menor consumo energético, tornando-a uma alternativa mais eficiente e vantajosa em comparação ao uso de um meio ácido.

Ao final dos processos foi obtido um resíduo polimérico de coloração mais escura nos ensaios 1 e 2 (Letra "A", conforme Figura 39A) e mais claro nos ensaios 3 e 4 (Letra "B", conforme Figura 39B), que se tratam do PVC e possuem potencial para reciclagem.

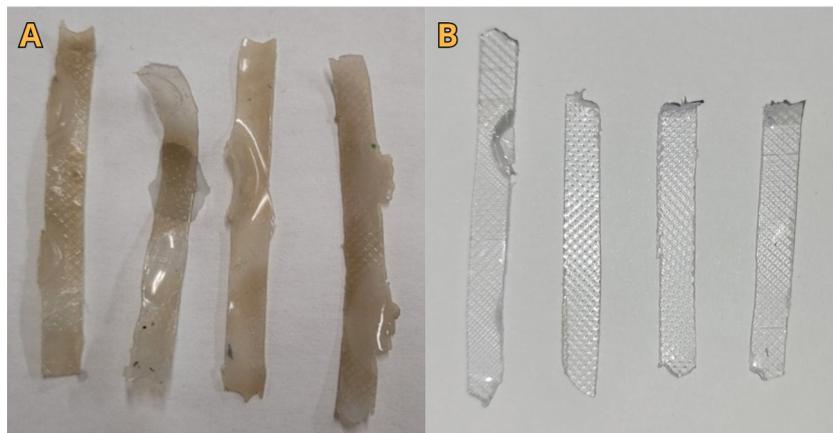
Devido à alta temperatura aplicada em meio ácido ($100 \text{ }^\circ\text{C}$), ocorreu degradação

FIGURA 38 – GRÁFICO COM LINHAS DE TENDÊNCIA PARA OS ENSAIOS 3 E 4 REALIZADOS COM HIDRÓXIDO DE SÓDIO.



FONTE: O autor (2025).

FIGURA 39 – POLÍMERO APÓS A ETAPA DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO COM ÁCIDO SULFÚRICO E HIDRÓXIDO DE SÓDIO.



FONTE: O autor (2025).

LEGENDA: "A- polímero após produção de hidrogênio utilizando H_2SO_4 100 °C e "B- polímero após produção de hidrogênio utilizando $NaOH$ 40 °C

na estrutura do polímero. No caso do PVC, sua temperatura de transição vítrea (T_g) é aproximadamente 80 °C, podendo variar conforme o método de polimerização e os aditivos empregados. Quando o PVC está abaixo de sua T_g , apresenta comportamento de sólido rígido. Entretanto, ao ultrapassá-la, sua fase amorfa torna-se flexível e dúctil. A degradação térmica, que ocorre acima dessa temperatura, resulta em alterações nas propriedades físicas e químicas do material, como evidenciado pela mudança de coloração do PVC (Carpio, 2009).

Na Tabela 8 são apresentadas as relações da quantidade de energia utilizadas para a produção primária de PVC e para o PVC reciclado, assim como a quantidade de

emissão de CO₂ equivalente.

TABELA 8 – COMPARAÇÃO ENTRE PVC NOVO E PVC RECICLADO QUANTO À ENERGIA E EMISSÕES DE CO₂ EQUIVALENTE.

Material	Energia (MJ.kg ⁻¹)	CO ₂ eq (kg.kg ⁻¹)
PVC novo	65	2,7
PVC reciclado	23	1,1

FONTE: Ashby (2021)

A reutilização do PVC é importante, como pode ser observado na Tabela 8, pois pode reduzir 2,45 vezes a emissão de CO₂ equivalente para cada kg de material produzido, além de necessitar 2,83 vezes menos energia quando comparado com a produção primária deste polímero.

Considerando que o meio alcalino permite a realização da reação em temperaturas mais baixas e com maior rapidez, decidiu-se interromper o estudo em meio ácido nas etapas subsequentes deste trabalho. Inicialmente, o meio ácido foi escolhido para manter a consistência com a etapa 1, que envolve o tratamento com ácido fórmico. No entanto, a expressiva diferença na eficiência reacional entre os meios alcalino e ácido justifica essa mudança. Além disso, foi levada em conta a possível neutralização que pode ocorrer ao longo do processo, reforçando ainda mais a escolha do meio alcalino como a abordagem mais eficiente e adequada para as etapas seguintes.

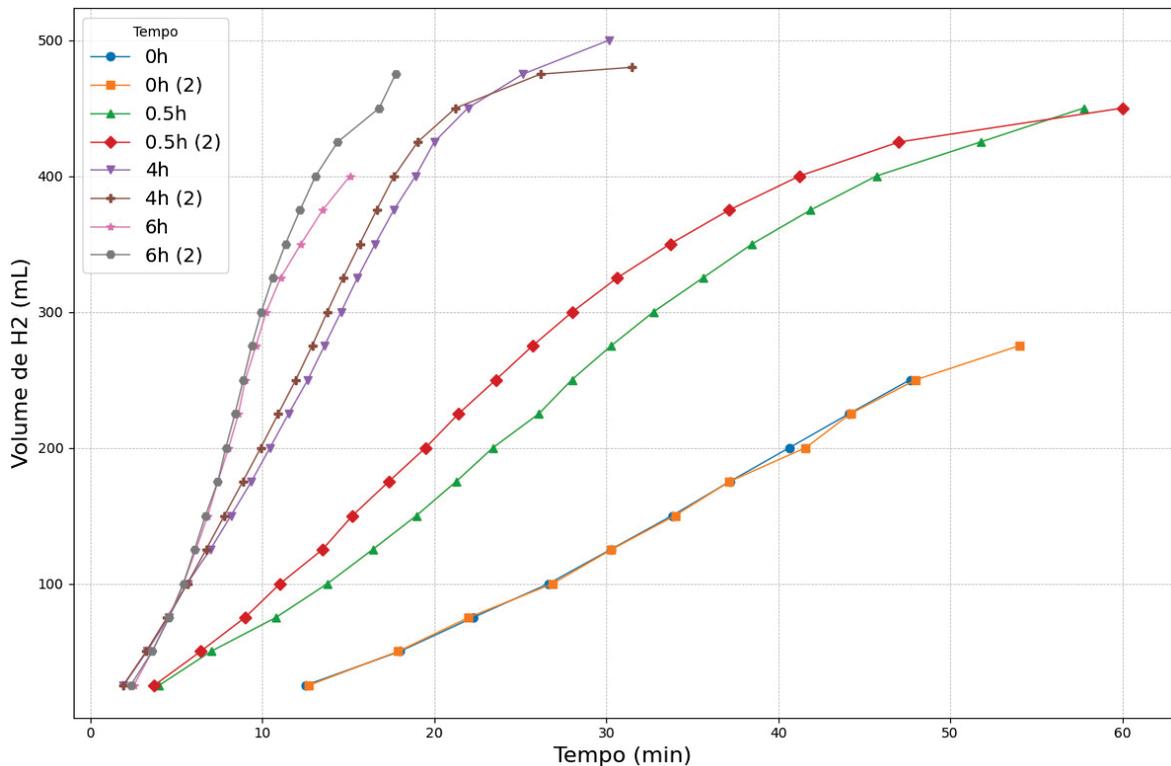
4.4.1 Resultado da avaliação da influência do tempo de tratamento com ácido fórmico (Etapa 1) na produção de hidrogênio (Etapa 2)

Nesta seção, serão apresentados os resultados da influência do tempo de tratamento com ácido fórmico na Etapa 1 sobre a produção de hidrogênio em meio alcalino na Etapa 2. A Figura 40 apresenta o gráfico do volume de hidrogênio produzido em função do tempo, considerando os tempos de tratamento com ácido fórmico de 0, 0,5, 4 e 6 h, sob a temperatura de 25 °C.

No gráfico, observa-se um aumento na quantidade de hidrogênio produzida e uma redução no tempo total de produção à medida que se utilizam blísteres submetidos a maiores tempos de tratamento com ácido fórmico. Esse comportamento está relacionado ao aumento da área de contato entre o alumínio presente no blíster e a solução de hidróxido de sódio. Tempos mais prolongados de tratamento permitem uma separação mais eficiente da camada de alumínio em relação às demais camadas do blíster, favorecendo uma maior área de reação sólido-líquido e, conseqüentemente, acelerando o processo de produção de hidrogênio.

A Tabela 9 apresenta os dados referentes ao tempo de reação, à taxa de produção de hidrogênio e ao tempo total do processo, que corresponde à soma do tempo de tratamento com ácido fórmico e do tempo de produção de hidrogênio.

FIGURA 40 – GRÁFICO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO (MEIO ALCALINO) EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA DIFERENTES TEMPOS DE TRATAMENTO COM ÁCIDO FÓRMICO EM 25 °C.



FONTE: O autor (2025).

LEGENDA: O índice (2) representa o teste em duplicata de cada condição utilizada

TABELA 9 – RESULTADOS DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO À 25 °C PARA DIFERENTES TEMPOS DE TRATAMENTO COM ÁCIDO FÓRMICO.

Tempo Tratamento (h)	Tempo Reação (min)	Taxa Produção (mL·min ⁻¹)	Tempo Total (h)
0,0	50,83 ± 4,48	6,46 ± 0,13	0,85 ± 0,07
0,5	58,88 ± 1,59	9,87 ± 0,46	1,48 ± 0,03
4,0	30,82 ± 0,92	21,01 ± 0,76	4,51 ± 0,02
6,0	16,43 ± 1,87	32,94 ± 0,52	6,27 ± 0,03

FONTE: O autor (2025).

A 25 °C, observou-se uma variação expressiva na quantidade de hidrogênio gerado, mesmo utilizando a mesma massa de alumínio. O blister sem tratamento produziu cerca de 275 mL de H₂, enquanto aquele tratado por 6 h atingiu aproximadamente 500 mL. Essa diferença pode ser atribuída à menor temperatura combinada com a presença da camada de primer, a qual limita significativamente a área de alumínio exposta à reação. Como resultado, a liberação de gás é menos intensa, gerando uma pressão mais baixa no sistema (insuficiente, em alguns casos, para deslocar o hidrogênio formado até a proveta invertida, devido à resistência imposta pela coluna de água na mangueira). Assim, o volume final de hidrogênio registrado foi inferior ao observado em outros testes. Contudo, essa limitação não compromete a comparação entre os ensaios, uma vez que todos os sistemas estão sujeitos à mesma resistência para o

deslocamento do gás e sua correta medição.

Ao comparar os resultados entre os tempos de tratamento de 0 e 0,5 horas, observou-se um aumento na taxa de produção e no tempo de processo. No caso da taxa de produção, o valor passou de $6,46 \pm 0,13 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ no tempo de tratamento de 0 h para $9,87 \pm 0,46 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ com o de 0,5 h, representando uma melhora de aproximadamente 1,5 vezes. Já o tempo de processo apresentou um incremento de $0,85 \pm 0,07 \text{ h}$ para $1,48 \pm 0,03 \text{ h}$ entre esses dois tempos de tratamento, indicando um aumento cerca de 1,7 vezes.

De forma geral, a comparação dos resultados entre os tempos de tratamento de 0 e 6 h mostra um aumento significativo de 5,1 vezes na taxa de produção de hidrogênio, enquanto o tempo de processo apresentou um incremento de 7,4 vezes. Esses resultados reforçam que tratamentos mais longos resultam em maior eficiência na produção, embora demandem mais tempo operacional. Assim, esses resultados podem ser utilizados para ajustar e otimizar os parâmetros do processo, buscando um equilíbrio entre a eficiência produtiva e o tempo necessário para as operações, além de serem fundamentais para definir a alimentação necessária para operação da célula combustível.

Na Figura 41, é apresentado o gráfico comparativo dos tempos de tratamento com ácido fórmico mencionados anteriormente, agora realizados à temperatura de 50 °C.

Independentemente da temperatura empregada, a quantidade de hidrogênio obtida foi constante, alcançando 500 mL. Observou-se o mesmo comportamento previamente identificado para 25 °C: o aumento do tempo de tratamento com ácido fórmico resultou em uma elevação da taxa de reação e em uma diminuição do tempo total de processo.

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos para o tempo de reação, a taxa de produção de hidrogênio e o tempo total do processo, que inclui a soma do tempo de tratamento com ácido fórmico e do tempo de produção de hidrogênio.

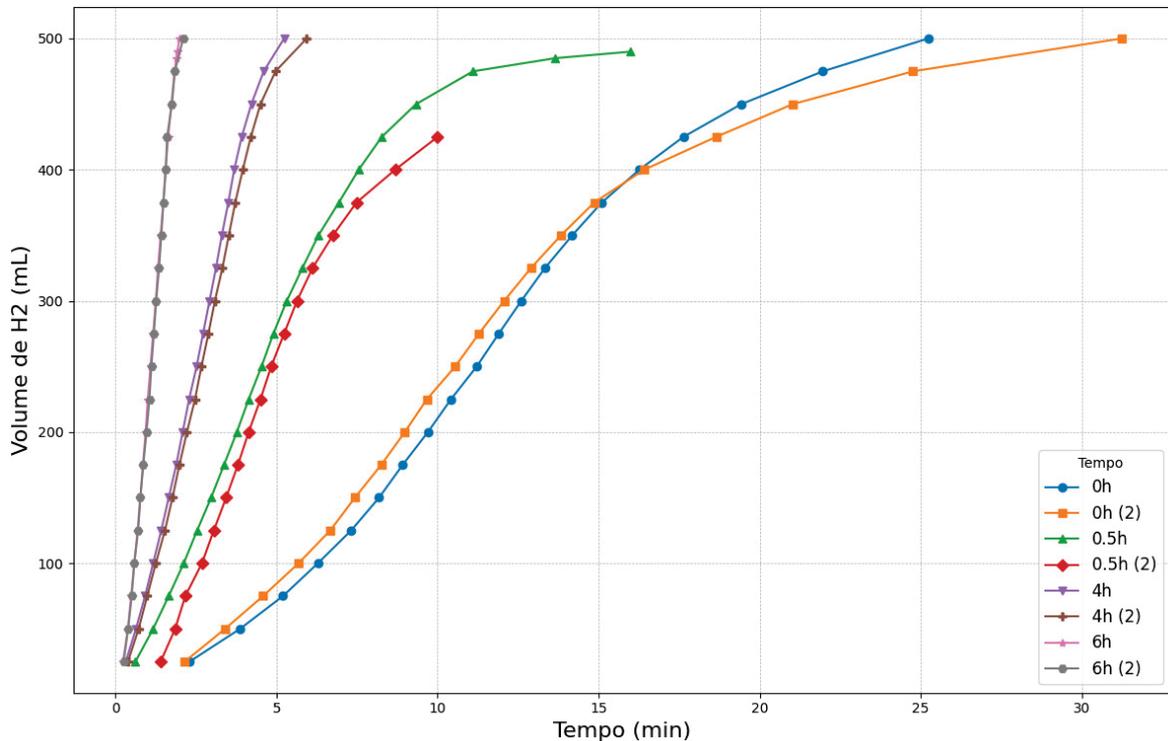
TABELA 10 – RESULTADOS DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO À 50 °C PARA DIFERENTES TEMPOS DE TRATAMENTO COM ÁCIDO FÓRMICO.

Tempo Tratamento (h)	Tempo Reação (min)	Taxa Produção ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)	Tempo Total (h)
0,0	$28,23 \pm 3,00$	$23,33 \pm 0,41$	$0,47 \pm 0,05$
0,5	$12,38 \pm 1,80$	$57,42 \pm 5,27$	$0,71 \pm 0,03$
4,0	$5,58 \pm 0,49$	$100,41 \pm 4,60$	$4,09 \pm 0,01$
6,0	$2,04 \pm 0,08$	$294,73 \pm 1,77$	$6,03 \pm 0,01$

FONTE: O autor (2025).

Com base nos resultados apresentados na Tabela 10 para a temperatura de 50 °C, foi possível observar tendências semelhantes às verificadas em 25 °C, mas com

FIGURA 41 – GRÁFICO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO (MEIO ALCALINO) EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA DIFERENTES TEMPOS DE TRATAMENTO COM ÁCIDO FÓRMICO EM 50 °C.



FONTE: O autor (2025).

LEGENDA: O índice (2) representa o teste em duplicata de cada condição utilizada

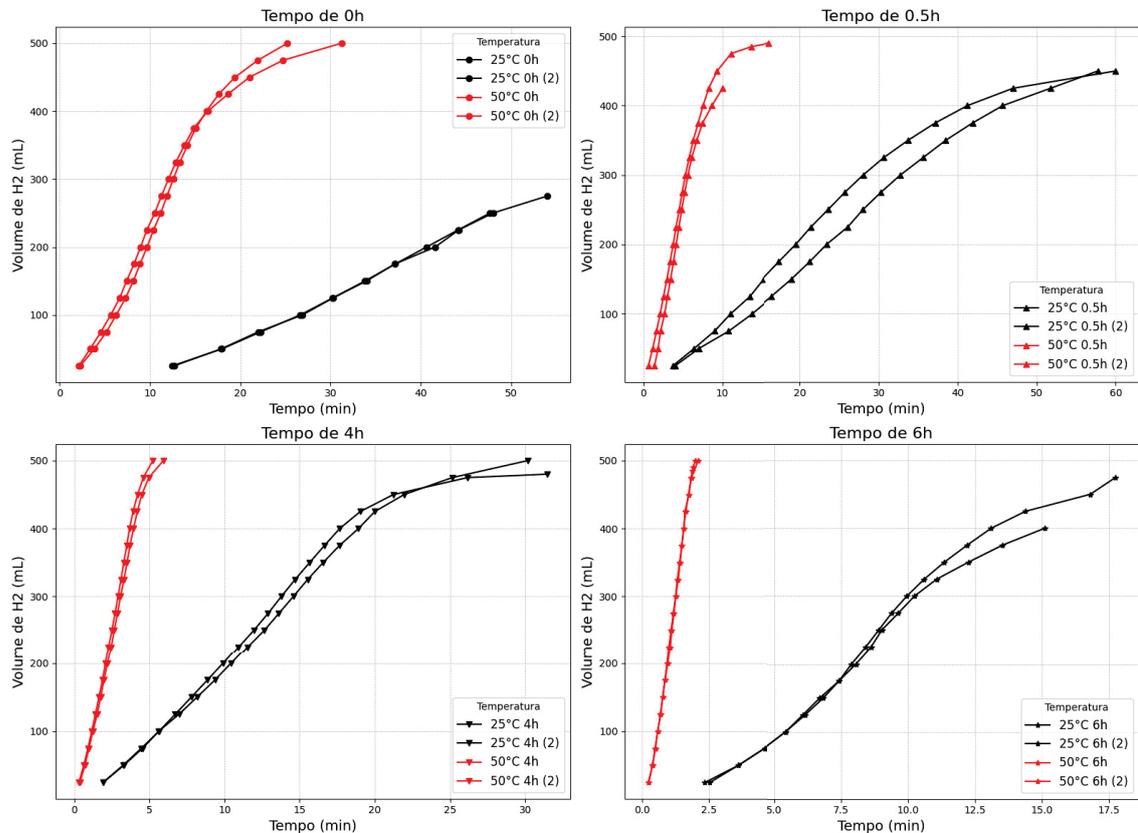
alterações mais acentuadas nas taxas de produção e tempos de processo.

Ao comparar os tempos de tratamento de 0 e 0,5 h, a taxa de produção foi de $23,33 \pm 0,41 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ para $57,42 \pm 5,27 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, correspondendo a um incremento de aproximadamente 2,5 vezes. O tempo de processo, por sua vez, foi de $0,47 \pm 0,05 \text{ h}$ para $0,71 \pm 0,03 \text{ h}$, indicando um aumento de cerca de 1,5 vezes. Esses resultados sugerem que, mesmo para curtos períodos de tratamento, o aumento da temperatura favorece uma produção mais eficiente.

Entre os tempos de tratamento de 0 e 6 h, a taxa de produção apresentou aumento de $23,33 \pm 0,41 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ para $294,73 \pm 1,77 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, o que representa uma melhoria de aproximadamente 12,6 vezes. Nesse intervalo, o tempo de processo aumentou de $0,47 \pm 0,05 \text{ h}$ para $6,03 \pm 0,01 \text{ h}$, resultando em um aumento de 12,8 vezes. Isso demonstrou que o aumento no tempo de tratamento, combinado com a temperatura mais elevada, potencializou significativamente a eficiência do processo.

Ao comparar os resultados médios entre as temperaturas de 25 °C e 50 °C, verificou-se que a temperatura mais alta proporcionou taxas de produção substancialmente superiores. Como pode ser observado pelo conjunto de gráficos apresentados na Figura 42.

FIGURA 42 – COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES RESULTADOS DE TEMPERATURA PARA CADA TEMPO DE TRATAMENTO COM ÁCIDO FÓRMICO



FONTE: O autor (2025).

Por exemplo, para um tempo de tratamento de 6 horas, a taxa de produção a 50 °C ($294,73 \pm 1,77 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$) é cerca de 8,9 vezes maior do que a registrada a 25 °C ($32,94 \pm 0,52 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$). Essa diferença evidenciou o forte impacto da temperatura no aumento da eficiência de produção de hidrogênio, tornando-a um parâmetro fundamental na otimização do processo. Entretanto o elevado tempo de tratamento acaba impactando negativamente o tempo de processo se tornando muito longo e com elevado consumo energético, pois é necessário manter a solução aquecida à 60 °C durante 6 h.

De forma geral, o resultado mais interessante foi a utilização de 30 min de tratamento com ácido formico que aumentou a taxa de produção 1,5 vezes em 25 °C e 2,5 vezes em 50 °C, sem um incremento tão elevado no tempo de processo (1,7 em 25 °C e 1,5 em 50 °C) comparados com resultados dos blisters sem tratamento.

Esses resultados são promissores, pois favorecem a futura implementação de células a combustível, que requerem condições ideais de temperatura e pressão de hidrogênio para otimizar a produção de energia elétrica. Por exemplo, no catálogo da célula H-100 Fuel Cell Stack da Horizon Fuel Cell Technologies, é especificada a necessidade de pressões entre 0,45 e 0,55 bar e temperaturas máximas de 65 °C

para operação eficiente. Assim, a maior taxa de produção de hidrogênio obtida com o tratamento de 30 *min* pode contribuir significativamente para a viabilidade e eficiência desses sistemas energéticos (Horizon Educational, 2024).

4.5 ETAPA 2 - PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

Os resultados que serão apresentados nesta seção dizem respeito ao planejamento experimental apresentado, conforme variáveis apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

A modelagem da taxa de reação em função das variáveis independentes temperatura e massa de alumínio foi realizada por meio de uma regressão por mínimos quadrados ordinários (OLS). Para facilitar a apresentação dos resultados, as variáveis foram codificadas, utilizando-se a notação T para a temperatura e Al para a massa de alumínio. Os coeficientes estimados e os respectivos parâmetros estatísticos obtidos na regressão estão apresentados na Tabela 11.

TABELA 11 – COEFICIENTES DA REGRESSÃO OLS.

Variável	Coefficiente	Erro padrão	t	P> t	[0,025	0,095]
Interseção	$1,96 \times 10^1$	$4,00 \times 10^0$	$4,86 \times 10^0$	$0,00 \times 10^0$	$1,08 \times 10^1$	$2,81 \times 10^1$
T	$1,56 \times 10^1$	$1,78 \times 10^0$	$8,78 \times 10^0$	$0,00 \times 10^0$	$1,18 \times 10^1$	$1,95 \times 10^1$
Al	$5,19 \times 10^0$	$1,75 \times 10^0$	$2,96 \times 10^0$	$1,10 \times 10^{-2}$	$1,41 \times 10^0$	$8,98 \times 10^0$
T^2	$4,62 \times 10^0$	$2,63 \times 10^0$	$1,76 \times 10^0$	$1,02 \times 10^{-1}$	$-1,06 \times 10^0$	$1,03 \times 10^1$
Al^2	$-1,94 \times 10^0$	$2,61 \times 10^0$	$-7,44 \times 10^{-1}$	$4,70 \times 10^{-1}$	$-7,78 \times 10^0$	$3,70 \times 10^0$
$T \cdot Al$	$3,63 \times 10^0$	$2,22 \times 10^0$	$1,63 \times 10^0$	$1,26 \times 10^{-1}$	$-1,17 \times 10^0$	$8,43 \times 10^0$

FONTE: O autor (2025).

A variável Temperatura apresentou o maior impacto positivo na taxa de produção, com um coeficiente de 15,6 e significância estatística ($P < 0,001$). Isso confirma que o aumento da temperatura tem uma influência direta e relevante no aumento da taxa de reação.

A variável massa de Alumínio também demonstrou uma contribuição significativa, com um coeficiente de 5,19 e um valor $P = 0,011$. Esse resultado sugere que a massa de alumínio está positivamente relacionada com a taxa de produção, embora sua influência seja menor quando comparada à temperatura.

O termo quadrático de temperatura T^2 apresentou um coeficiente de 4,62, mas com significância marginal ($P = 0,102$), indicando uma possível tendência não linear na relação entre temperatura e taxa de produção. Por outro lado, o termo quadrático de massa de alumínio (Al^2) teve um coeficiente negativo de -1,94, mas não foi estatisticamente significativo ($P = 0,470$), sugerindo uma contribuição desprezível para o modelo.

A interação entre temperatura e a massa de alumínio apresentou um coeficiente de 3,63, porém com significância marginal ($P = 0,126$), o que sugere uma influência potencialmente conjunta, mas com baixa confiança estatística.

A análise de variância (ANOVA) confirma que as variáveis Temperatura ($P = 6,74 \times 10^{-7}$) e massa de Alumínio ($P = 0,005$) são os principais fatores responsáveis pela variação da taxa de produção. Já os termos quadráticos e a interação não apresentaram significância suficiente.

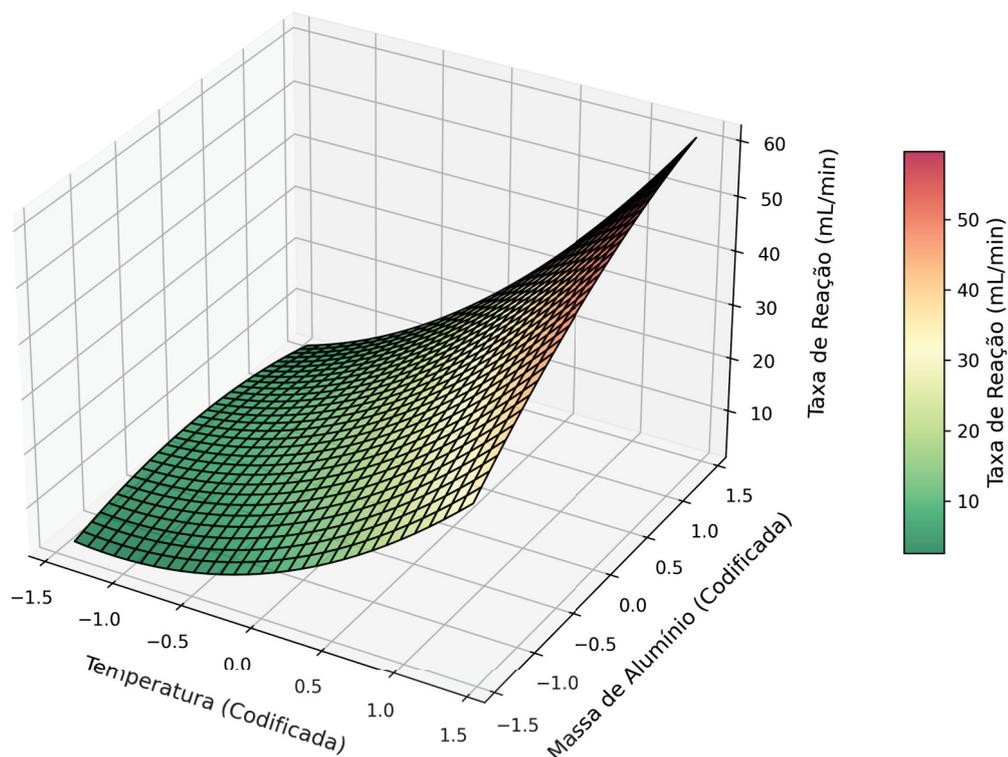
Alem disso o resultado do modelo de regressão demonstrou um ajuste global satisfatório, com um coeficiente de determinação $R^2 = 0,884$ e um R^2 ajustado de 0,839. Isso indica que 88,4% da variabilidade na taxa de produção é explicada pelas variáveis independentes incluídas no modelo.

A equação do modelo obtido, considerando os coeficientes estimados, é expressa por:

$$Taxa = 19,5 + 15,6 \cdot T + 5,19 \cdot Al + 4,62 \cdot T^2 - 1,94 \cdot Al^2 + 3,64 \cdot T \cdot Al \quad (4.1)$$

Na Figura 43 é apresentado gráfico de superfície resposta da taxa de reação ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$) em relação aos fatores codificados em relação aos fatores codificados apresentados na Tabela 1 e á matriz do planejamento experimental na Tabela 2, obtido por meio do código em python apresentado nos Apêndices 2 deste trabalho.

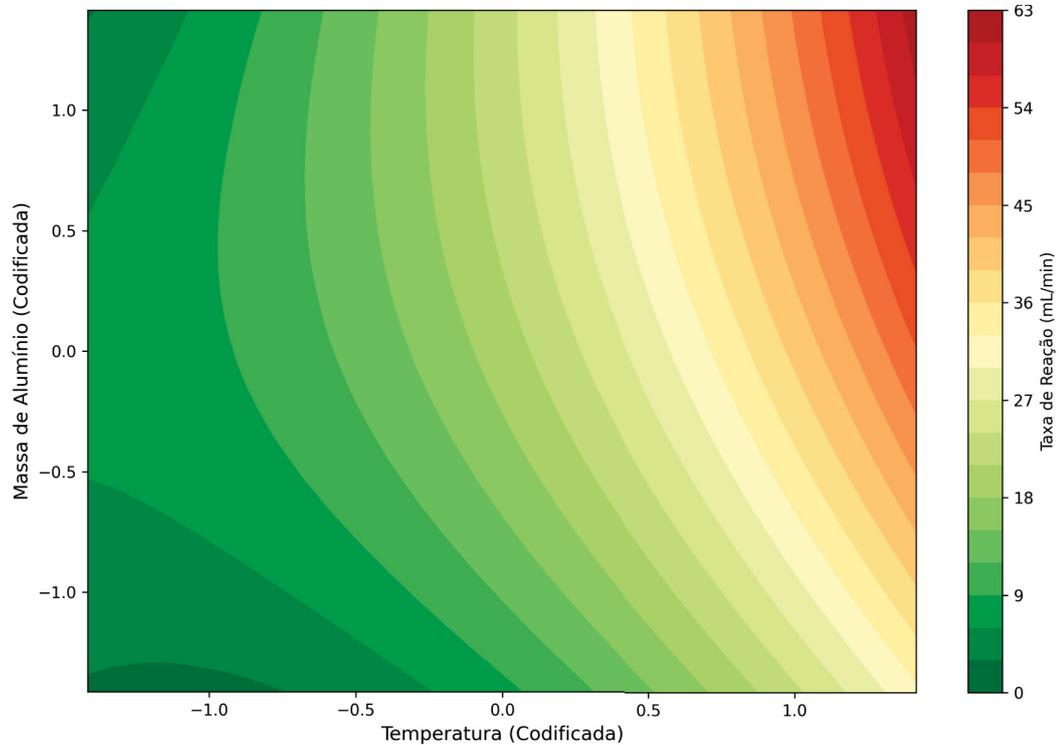
FIGURA 43 – GRÁFICO DA SUPERFICIE RESPOSTA DA TAXA DE REAÇÃO.



FONTE: O autor (2025).

Para melhor visualização dos resultados é apresentado as curvas de nível na Figura 44 com a coloração verde indicando as menores taxas de reação e em vermelho as maiores taxas, seguindo a mesma equação apresentada na Equação 4.1.

FIGURA 44 – CURVA DE NÍVEL DA TAXA DE REAÇÃO.



FONTE: O autor (2025).

Portanto, os resultados reforçam que temperatura é o fator mais relevante para a taxa de produção, seguido pela quantidade de alumínio. A simplificação do modelo, com a remoção de termos não significativos, pode ser considerada para aprimorar a interpretação dos dados e focar nos fatores principais que influenciam o processo. Desta forma a Equação 4.2 deve ser modificada considerando os p-valores, resultando na expressão a seguir:

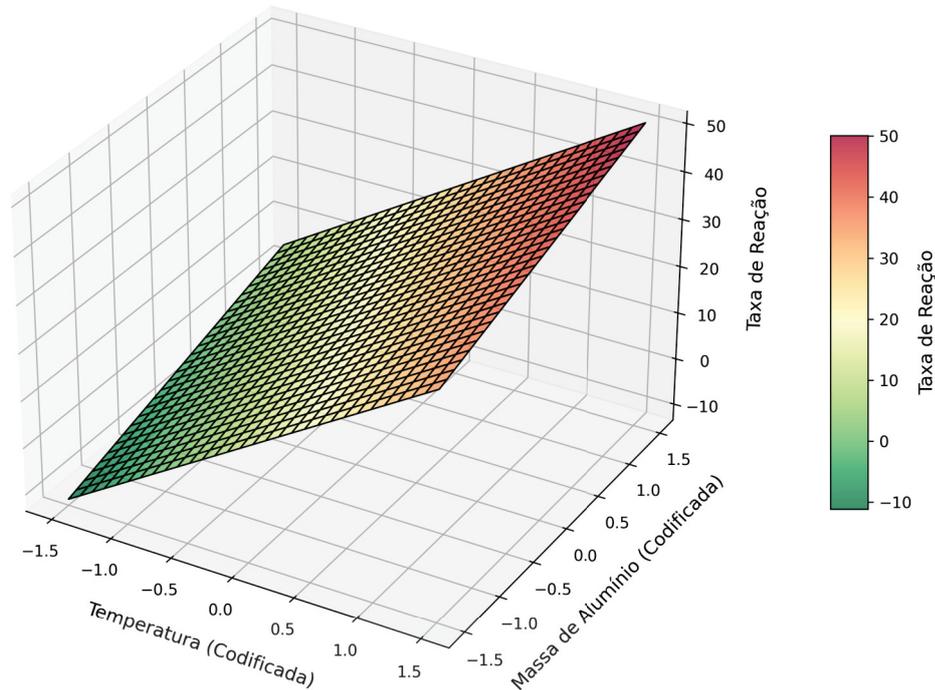
$$Taxa = 19,5 + 15,6 \cdot T + 5,19 \cdot Al \quad (4.2)$$

Esta expressão indica a influência de T e Al no valor da taxa e leva a obtenção de nova superfície de resposta.

Observa-se que em função da linearidade dos valores, as condições ótimas estão na fronteira, ou seja, deve-se utilizar o maior valor T e o maior valor de Al para obter o maior valor de taxa de reação.

A Figura 45 apresenta a superfície de resposta correspondente à equação reduzida, permitindo a visualização do comportamento da variável resposta em função dos fatores investigados.

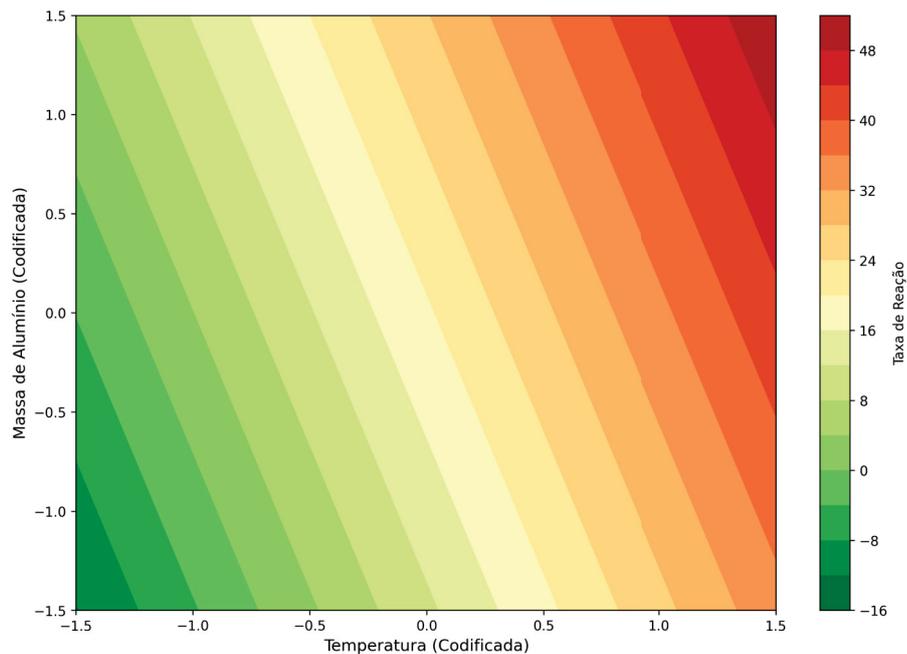
FIGURA 45 – SUPERFICIE RESPOSTA DA TAXA DE REAÇÃO PARA A EQUAÇÃO REDUZIDA.



FONTE: O autor (2024).

Complementarmente, a Figura 46 exibe a respectiva curva de nível, também baseada na equação reduzida, o que favorece a análise das regiões com maior intensidade de resposta.

FIGURA 46 – CURVA DE NÍVEL TAXA DE REAÇÃO PARA A EQUAÇÃO REDUZIDA.



FONTE: O autor (2025).

Foram realizados 4 ensaios afim de validar a equação reduzida obtida, utilizando a temperatura de 30 e 45 °C e massas de alumínio de 0,25 e 0,35 g. Os resultados estão dispostos na Tabela 12.

TABELA 12 – RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DO MODELO.

Al (g)	T (°C)	Taxa calc. (mL·min ⁻¹)	Taxa experimental (mL·min ⁻¹)	Erro Relativo (%)	Erro Absoluto (mL·min ⁻¹)
0,25	30	7,54	9,88	23,61	2,33
0,35	30	12,74	15,46	17,64	2,73
0,25	45	26,26	25,41	3,37	0,88
0,35	45	31,46	31,99	1,69	0,54

FONTE: O autor (2025).

Com base nos resultados obtidos na etapa de validação, observou-se que o modelo reduzido apresentou desempenho satisfatório na predição da taxa de reação, com boa concordância entre os valores calculados e experimentais, especialmente para temperaturas mais elevadas. Os maiores desvios ocorreram nas predições de taxas de menor magnitude, resultando em erros absolutos de 2,33 mL·min⁻¹ (para a massa de 0,25 g) e 2,73 mL·min⁻¹ (para a massa de 0,35 g), ambos a 30 °C, o que intensificaram os erros relativos, atingindo 23,62% e 17,64% respectivamente. Já a 40 °C, a amostra com menor massa apresentou erro relativo de 3,37%, enquanto a amostra com maior massa teve erro de apenas 1,69%. Esses resultados indicaram que o modelo é capaz de fornecer boas estimativas para condições com temperaturas mais elevadas.

Entretanto, observou-se que, para temperaturas inferiores a 31 °C, o modelo reduzido passou a prever taxas negativas de reação, dependendo da massa de alumínio utilizada. Do ponto de vista termodinâmico, a reação tende a não ocorrer nessas condições, o que justifica os resultados negativos obtidos.

4.6 RESULTADOS DA ANÁLISE ENERGÉTICA DO TRATAMENTO DE RECICLAGEM DOS BLISTERES

Os resultados da análise energética do tratamento de reciclagem dos blisteres encontram-se na Tabela 13, realizada de maneira experimental e com os aparatos de bancada.

O consumo energético total obtido foi de 18,4 kWh·(kg de blister)⁻¹, sendo as etapas de aquecimento das soluções químicas as que mais demandaram energia.

A utilização do um micro power monitor (CAI-HW17) para medição experimental indicou o mesmo valor absoluto de energia para ambos os aquecimentos (0,05 ± 0,01 kWh) em razão da incerteza instrumental de 0,01 kWh. No entanto, ao normalizar esses valores pela massa de resíduo blister processado, observou-se que o aquecimento da

TABELA 13 – CONSUMO ENERGÉTICO TOTAL CONSIDERANDO OS AQUECIMENTOS DE FORMA EXPERIMENTAL.

Etapa do processo	Energia (kWh)	Consumo específico (kWh·(kg de blister) ⁻¹)
Fragmentação	0,0026	0,070
Aquecimento do ácido fórmico	0,05	5,00
Agitação no hidrapulper	0,0083	0,83
Aquecimento do NaOH	0,05	12,50
Total	110,9	18,40

FONTE: Deboni *et al.* (2024).

solução de hidróxido de sódio apresentou um consumo específico significativamente maior. Esse comportamento é contraintuitivo, pois esperava-se que o aquecimento da solução de ácido fórmico (que envolveu maior volume e tempo de manutenção de temperatura) demandasse mais energia específica.

O cálculo do calor sensível foi realizado para estimar o consumo energético teórico no aquecimento das soluções, considerando as limitações dos equipamentos utilizados e aproximando-se das condições ideais aplicáveis à produção de hidrogênio a partir de blister. A Tabela 14 apresenta esse consumo teórico, estimado para as etapas de tratamento ácido e alcalino, considerando o aquecimento e a manutenção da temperatura, conforme os balanços térmicos aplicados. Os valores também foram normalizados por quilograma de blister tratado.

TABELA 14 – CONSUMO ENERGÉTICO TOTAL CONSIDERANDO OS AQUECIMENTOS DE FORMA TEÓRICA.

Etapa	Q_{aquec} (J)	Q_{manut} (J)	E_{total} (kWh)	E (kWh·(kg de blister) ⁻¹)
Ácido fórmico	38 556	24 192	0,01743	1,74
NaOH	13 978	2 112	0,00447	1,12

FONTE: O autor (2025).

A maior demanda energética no tratamento ácido pode ser atribuída à combinação de maior volume de solução, maior variação de temperatura ($\Delta T = 42$ °C) e maior tempo de manutenção térmica (30 minutos), em comparação com o processo alcalino, que apresenta $\Delta T = 32$ °C e tempo de manutenção de apenas 10 minutos. Além disso, a área superficial exposta ao ambiente no recipiente ácido (0,064 m²) é significativamente maior do que no alcalino (0,022 m²), o que potencializa as perdas térmicas e, conseqüentemente, aumenta a energia necessária para manutenção da temperatura. Sendo isso o que era esperado que acontecesse na avaliação experimental do consumo energético.

Observa-se que a energia necessária para a manutenção da temperatura na etapa ácida representa 37% da energia requerida para o aquecimento, enquanto na etapa alcalina este valor é cerca de 13%. Esse comportamento evidencia a influência do

tempo de manutenção na demanda energética do processo, sendo um fator relevante para otimização energética em escala industrial.

A Tabela 15 consolida os resultados de consumo energético obtido pelo cálculo teórico do calor sensível e mantém os valores obtidos anteriormente para a etapa de fragmentação e de agitação no hidrapulper.

TABELA 15 – CONSUMO ENERGÉTICO TOTAL CONSIDERANDO OS AQUECIMENTOS DE FORMA TEÓRICA.

Etapa do processo	Energia (kWh·(kg de blister)⁻¹)
Fragmentação	0,070
Aquecimento do ácido fórmico	1,74
Agitação no hidrapulper	0,83
Aquecimento do NaOH	1,12
Total	3,76

FONTE: O autor (2025).

Com isso é possível observar que serão necessários, ao menos, 3,76 kWh·(kg de blister)⁻¹, mantendo todas as etapas atualmente empregadas na reciclagem dos blisteres para a produção de hidrogênio.

Modificações no processo, visando à sua implementação em escala contínua, poderão ser realizadas com o objetivo de reduzir o consumo energético. Dentre elas, destaca-se a eliminação das etapas de fragmentação e de agitação no hidrapulper, o que representará uma redução de aproximadamente 24 % no consumo total de energia, reduzindo para 2,86 kWh·(kg de blister)⁻¹. Tais modificações serão viabilizadas por meio da utilização de aparatos reacionais de maior capacidade, que permitam o processamento das embalagens blister inteiras, tanto na etapa de remoção do prime e da tinta com ácido fórmico quanto na etapa de produção de hidrogênio utilizando hidróxido de sódio.

Além disso, a reação do alumínio com hidróxido de sódio é exotérmica, liberando aproximadamente 177,25 kJ para cada mol de alumínio reagido, o que equivale a 6,57 kJ por grama do metal (Chen; Zeng, 1994). Essa liberação de calor pode contribuir para o aquecimento e a manutenção da temperatura das soluções utilizadas no processo. No presente trabalho, por exemplo, a utilização de 0,4 g de alumínio resulta na liberação de cerca de 2,6 kJ de energia térmica, quantidade suficiente para manter a solução de hidróxido de sódio a 50 °C durante os 10 min de reação.

Com o objetivo de minimizar os impactos ambientais associados ao consumo energético do processo, uma alternativa é a substituição do aquecimento elétrico convencional por sistemas de aquecimento solar, os quais podem atingir facilmente temperaturas em torno de 60 °C, reduzindo assim a dependência de fontes de energia não renováveis. Além disso, recomenda-se o aproveitamento do calor residual proveni-

ente de processos industriais ou hospitalares, o que pode suprir a demanda térmica do sistema sem custos adicionais relacionados à implantação de tecnologias solares.

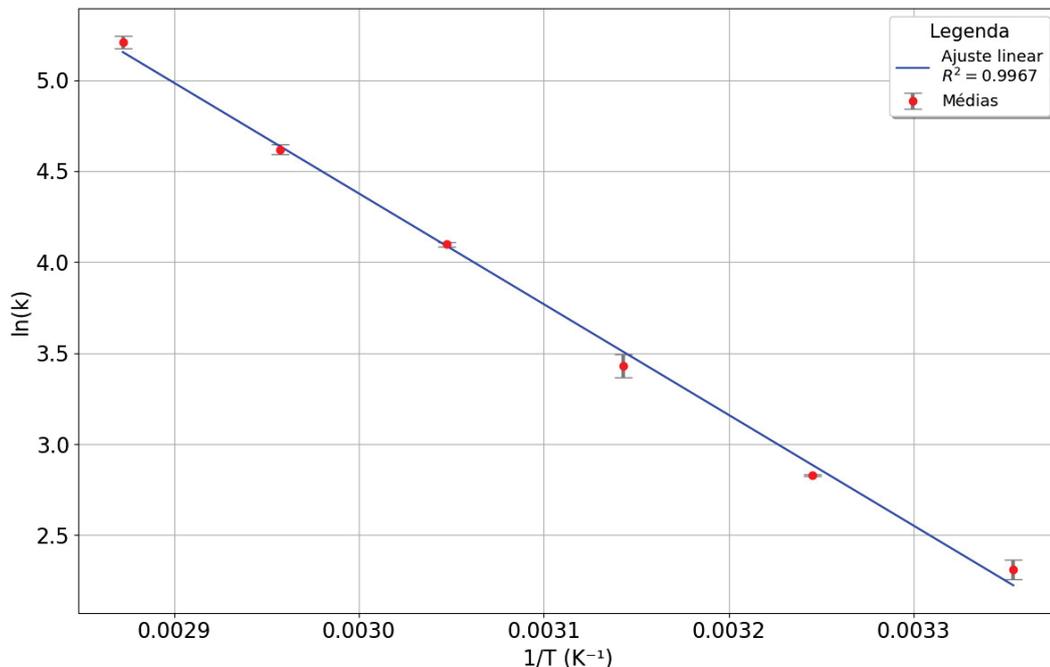
Produziu-se 11,24 g de gás hidrogênio por quilo de blister processado (CNTP), o que equivale a cerca de 0,21 kWh de energia aproveitável por quilo de resíduo (considerando 55% de eficiência na conversão de hidrogênio em eletricidade via célula a combustível PEMFC e poder calorífico inferior do H_2 de $120,13 \text{ kJ.g}^{-1}$ (Sousa Gomes, 2018)). Esse valor corresponde a uma parcela pequena da energia consumida no processo de reciclagem do blister.

Em resumo o consumo energético, isoladamente, pode não ser um parâmetro suficientemente atrativo. No entanto, quando avaliado em conjunto com aspectos ambientais, como a reciclagem e a reutilização dos materiais que compõem o blister (alumínio, PVC, primer e tinta), esse fator passa a agregar valor ao processo. Mesmo que a energia demandada seja superior à energia recuperada ao final, os benefícios associados à redução do impacto ambiental, à diminuição das emissões de CO_2 e à mitigação dos resíduos podem justificar a viabilidade do processo.

4.7 RESULTADOS OBTIDOS DA CINÉTICA DA REAÇÃO

A determinação dos parâmetros cinéticos da reação foi realizada com base no ajuste da equação de Arrhenius, conforme ilustrado na Figura 47.

FIGURA 47 – GRÁFICO DO AJUSTE DE ARRHENIUS.



FONTE: O autor (2025).

A equação utilizada para descrever o comportamento da constante de velocidade k em função da temperatura (T) é expressa pela Equação 4.3.

$$\ln(k) = a \cdot \frac{1}{T} + b \quad (4.3)$$

Na Equação 4.3 o termo a corresponde a $-\frac{E_a}{R}$ (E_a a energia de ativação ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$) e R a constante universal dos gases ($8,314 \text{ J}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$)), enquanto b representa o termo $\ln(A)$, com A sendo o fator pré-exponencial.

Com base nos dados experimentais, os valores ajustados foram $E_a = 50,55 \text{ kJ}\cdot(\text{mol})^{-1}$ e $A = 6,65 \times 10^9 \text{ min}^{-1}$, sendo obtidos através do Equação 4.4.

$$\ln(k) = 22,6174 - \frac{6080,2494}{T} \quad (4.4)$$

A Figura 47 apresenta o gráfico de $\ln(k)$ em função de $1\cdot T^{-1}$, onde observa-se um excelente ajuste linear ($R^2 = 0,9967$), indicando que o modelo descrito pela equação de Arrhenius representa adequadamente os dados experimentais.

Os resultados obtidos foram comparados com valores da literatura, que reportam energias de ativação para reações similares variando entre $E_a = 60 \text{ kJ}\cdot(\text{mol})^{-1}$ (Alviani *et al.*, 2019) e $E_a = 52 \text{ kJ}\cdot(\text{mol})^{-1}$ (Testa *et al.*, 2024). O valor encontrado neste trabalho ($E_a = 50,55 \text{ kJ}\cdot(\text{mol})^{-1}$) está em boa concordância com a literatura, reforçando a validade do procedimento experimental e da análise cinética realizada.

Além disso, a elevada precisão do ajuste ($R^2 = 0,9967$) reflete a baixa dispersão dos dados em relação à reta ajustada, como evidenciado pelas barras de erro na Figura 47. Esse resultado demonstra a reprodutibilidade e confiabilidade dos dados obtidos experimentalmente.

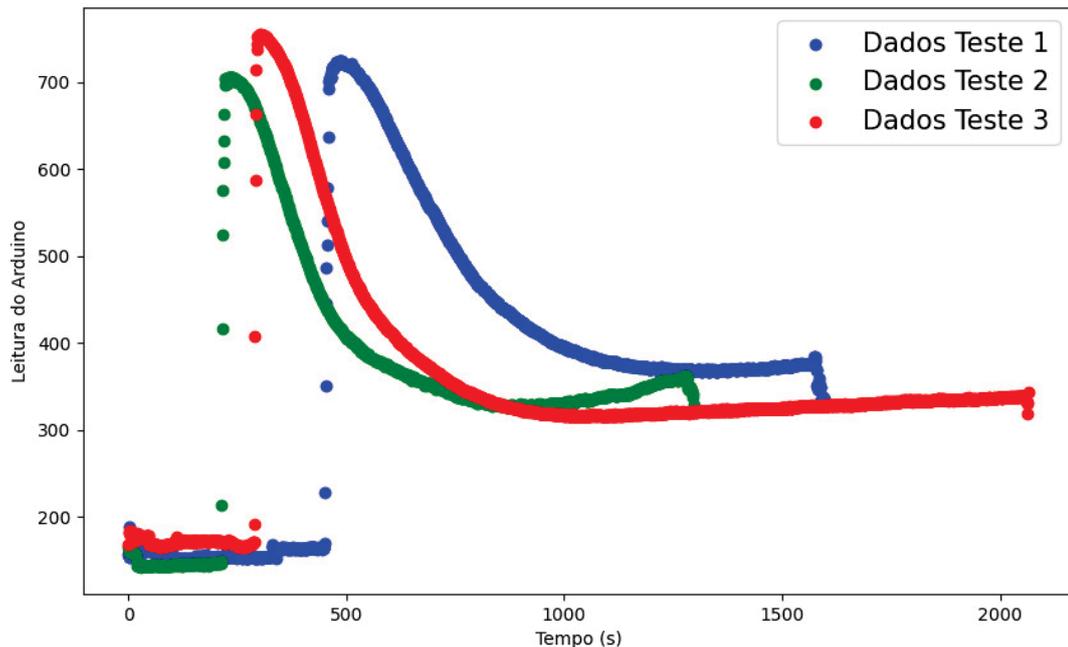
Os parâmetros cinéticos encontrados neste estudo são fundamentais para prever o comportamento da reação em diferentes condições de temperatura, possibilitando otimizações futuras no processo.

4.8 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO ARDUINO E DO SENSOR DE HIDROGÊNIO

Inicialmente, a utilização do Arduino Uno em conjunto com o adaptador micro SD permitiu registrar o comportamento do sensor MQ-8, conforme apresentado na Figura 48.

A partir dos gráficos apresentados, observou-se um padrão semelhante entre as leituras: no início dos testes, os valores permaneceram estáveis, seguidos por aumentos abruptos superiores a 700. Esse aumento provavelmente corresponde ao momento em que o sensor detecta a presença de gás hidrogênio no sistema. Posteriormente, ocorreu uma queda gradual nos valores, possivelmente associada à diminuição do fluxo de hidrogênio à medida que a reação se aproxima do término.

FIGURA 48 – RESULTADOS DE LEITURA DO ARDUINO CONFORME O TEMPO.



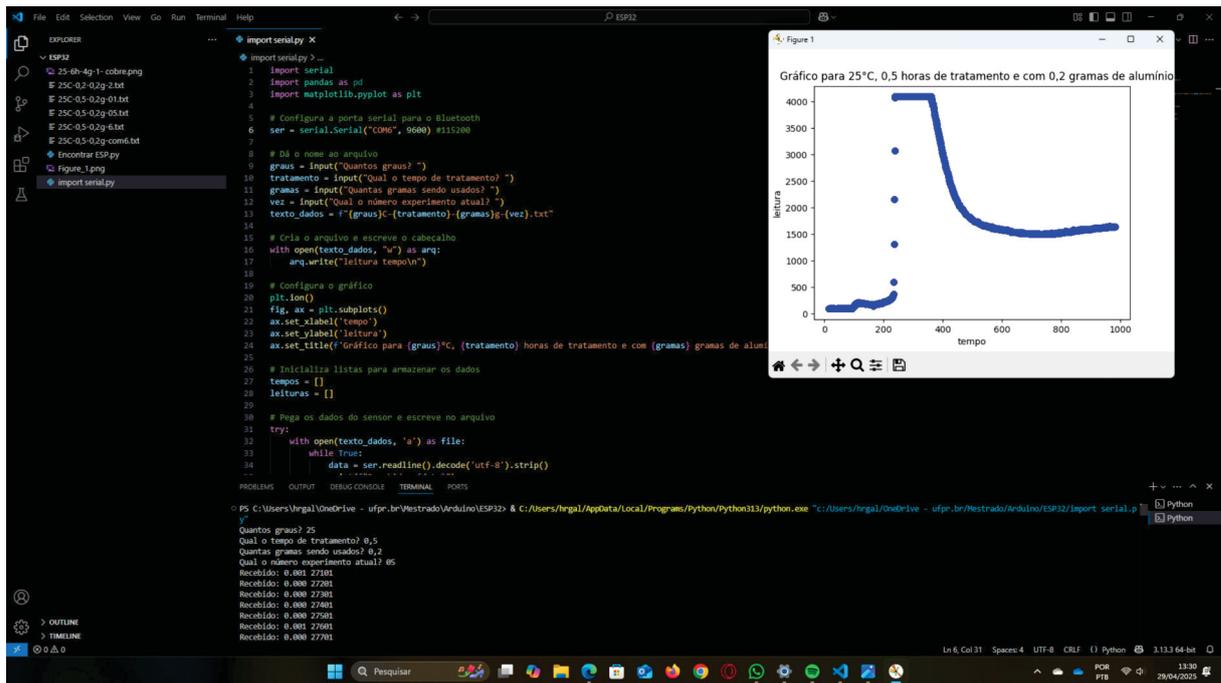
FONTE: Valt *et al.* (2024).

Os resultados indicaram que a plataforma Arduino é uma alternativa viável para a detecção da produção de hidrogênio no meio reacional. Observou-se ainda que a taxa de reação e a quantidade de hidrogênio gerado influenciam na resposta do sensor. Contudo, até o momento, esse sistema podia ser utilizado apenas como um detector da presença de gás hidrogênio, sem uma correlação direta com a quantidade produzida. Para um melhor entendimento do comportamento do sensor no sistema, são recomendados ensaios complementares, com variações de temperatura e diferentes tempos de tratamento com ácido fórmico.

Além disso, ao substituir o Arduino Uno pela placa ESP-32, tornou-se possível transmitir os dados diretamente para um computador ou smartphone via Bluetooth. O código-fonte carregado na ESP-32 (disponível no Apêndice 4) faz a leitura do sensor e envia as medições em tempo real. No computador, um script em Python (Apêndice 5) gera gráficos dinâmicos que relacionam o sinal do sensor ao tempo, facilitando tanto a visualização quanto o armazenamento dos resultados, conforme ilustrado na Figura 49.

Inicialmente, o usuário é solicitado a informar, em sequência, a “temperatura de operação (°C)”, o “tempo de tratamento com ácido fórmico (h)”, a “massa de alumínio (g)” e o “número do experimento”. Essas respostas são utilizadas para compor automaticamente o nome do arquivo de dados no formato “25C-0,5h-0,2g-05.txt”, garantindo padronização e rastreabilidade. Em seguida, o gráfico em tempo real é exibido na interface Python e, ao término da execução, pode ser salvo manualmente clicando no ícone de disquete, gerando uma figura pronta para inclusão em relatórios

FIGURA 49 – RESULTADOS DE LEITURA DO ARDUINO CONFORME O TEMPO.



FONTE: O autor (2025).

ou publicações.

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa mostrou que é possível separar as diferentes camadas das embalagens blister farmacêuticas e aproveitar o alumínio extraído para a geração de hidrogênio, ao mesmo tempo em que o PVC pode ser recuperado para reciclagem. Foi constatado que o alumínio representa $9,83 \pm 0,39$ % da massa total dos blisters. O tratamento com ácido fórmico foi capaz de remover o primer e a tinta contidos nas embalagens, expondo a superfície metálica do alumínio e preparando-a para a etapa de produção de hidrogênio.

Nos testes iniciais com solução de ácido sulfúrico e hidróxido de sódio, verificou-se que o meio alcalino é muito mais eficiente do que o meio ácido na produção de hidrogênio. Enquanto o meio ácido proporcionou uma taxa de produção de H_2 igual a $3,12 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ e tempo de reação de 70 min, o meio alcalino atingiu uma taxa de $33,16 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$, que é 10,6 vezes superior, com tempo de reação de apenas 10 min. Além disso, o polímero residual do emprego de solução alcalina se mostrou visivelmente menos degradado, por conta da temperatura de $50 \text{ }^\circ\text{C}$ utilizada, possibilitando a sua reutilização.

Outro ponto importante foi a análise das condições reacionais, a qual evidenciou que a temperatura e a quantidade de alumínio são fatores determinantes para a eficiência do processo. Em especial, os resultados indicaram que o tratamento com ácido fórmico por apenas 30 min foi suficiente para remover o primer e aumentar a taxa de produção de hidrogênio significativamente, 1,5 vezes em $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e 2,5 vezes em $50 \text{ }^\circ\text{C}$, sem comprometer o tempo total de processamento. Esse avanço é bastante promissor para a integração de células a combustível, que requerem condições bem definidas de temperatura e pressão.

Com base nos resultados deste trabalho, concluiu-se que 1 kg de blister pode gerar 1,25 L de H_2 nas CNTPs correspondendo a 11,24 g de hidrogênio. Dessa forma, para produzir 1 kg de hidrogênio estima-se que são necessários 89 kg de blister. Além disso, com base na classificação de cores do hidrogênio a que mais se encaixa com a produção de H_2 deste trabalho é a cor verde, pois está convertendo o alumínio que seria descartado em combustível sem a emissão de CO_2 .

O modelo reduzido obtido para a predição da taxa de produção de hidrogênio apresentou desempenho satisfatório, demonstrando boa concordância entre os valores calculados e os dados experimentais. Contudo, observou-se que, para temperaturas inferiores a $31 \text{ }^\circ\text{C}$, o modelo passou a prever taxas negativas de reação, especialmente em condições de menor massa de alumínio. Do ponto de vista termodinâmico, a

ocorrência da reação nessas condições é de fato limitada ou inexistente, o que justifica os resultados negativos obtidos nas simulações.

O consumo energético teórico avaliado neste trabalho foi de $3,76 \text{ kWh} \cdot (\text{kg de blister})^{-1}$, considerando todas as etapas envolvidas no processamento das embalagens blister. Entretanto, ao se considerar a operação em escala contínua e de maior capacidade, com a possibilidade de eliminação das etapas de fragmentação e de agitação no hidrapulper, esse valor poderá ser reduzido para $2,86 \text{ kWh} \cdot (\text{kg de blister})^{-1}$. Além disso, destaca-se o potencial de aproveitamento da energia térmica liberada durante a reação do alumínio com o hidróxido de sódio na produção de hidrogênio, bem como da utilização de energia residual proveniente de outros processos industriais ou hospitalares, visando à redução adicional do consumo energético necessário para a produção de H_2 .

A reciclagem e a reutilização dos materiais constituintes das embalagens blister promovem a economia circular, contribuindo para a redução das emissões de CO_2 e a mitigação de resíduos sólidos. Dessa forma, mesmo que a energia demandada no processo supere a quantidade efetivamente recuperada, os benefícios associados à minimização dos impactos ambientais e à conformidade com práticas sustentáveis de gestão de resíduos justificam a viabilidade da metodologia proposta, especialmente quando aplicada em escalas maiores.

Quanto aos resultados obtidos da cinética de reação, o valor da energia de ativação encontrado foi de $50,55 \text{ kJ} \cdot (\text{mol})^{-1}$ que está em boa concordância com a literatura.

Os testes realizados com o sensor MQ-8 integrados às plataformas Arduino Uno e ESP-32 demonstraram a viabilidade de monitorar a presença de hidrogênio em sistemas reacionais de forma simples e acessível. A utilização da plataforma ESP-32 permitiu melhor conectividade, praticidade e a visualização em tempo real dos resultados.

Desta forma este trabalho estabeleceu uma abordagem para a reciclagem de embalagens blister, evidenciando tanto a recuperação do polímero quanto a conversão do alumínio em fonte energética por meio da produção de hidrogênio. Avançando assim, no desenvolvimento de estratégias para a gestão de materiais complexos e de difícil reciclagem.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, foram observadas oportunidades de melhoria, bem como algumas lacunas que podem ser abordadas em pesquisas futuras. A seguir, serão discutidas e elencadas as sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar a viabilidade e a possível implementação do uso de ácido acético na Etapa 1, considerando que os resultados indicaram desempenho semelhante ao do ácido fórmico nas mesmas condições de tratamento ($4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ e $60 \text{ }^\circ\text{C}$) para a remoção da camada de primer e tinta, com o benefício adicional de ser um ácido menos agressivo ao meio ambiente;
- Realizar um estudo detalhado do consumo energético do processo, com foco na coleta de dados para futuras otimizações, visando à redução do consumo e à maximização da eficiência na produção de energia;
- Investigar o aproveitamento do calor gerado durante a reação para conversão em energia elétrica, por meio da aplicação do efeito Seebeck;
- Avaliar o acoplamento de uma célula a combustível ao sistema, possibilitando a conversão direta do hidrogênio produzido em energia elétrica;
- Desenvolver o estudo e a implementação de um sistema em escala contínua, aproveitando a base de conhecimento e os resultados obtidos neste trabalho, com o objetivo de ampliar a geração de energia;
- Realizar a análise dos efluentes gerados ao longo do processo, visando à otimização do sistema reacional e à minimização da formação de subprodutos;
- Conduzir ensaios complementares com variações de temperatura e diferentes tempos de tratamento com ácido fórmico, visando a melhor compreensão do comportamento do sensor de H_2 (MQ-8) no sistema;
- Investigar a possibilidade de desenvolvimento de novos tipos de embalagens blister, que favoreçam a obtenção de hidrogênio e otimizem o processo, sem comprometer as propriedades essenciais para o armazenamento de medicamentos;
- Estimar o custo de produção por kg de hidrogênio gerado a partir do alumínio presente nas embalagens blister, considerando todos os custos envolvidos nas diferentes etapas do processo;

- Avaliar o potencial de geração de receita a partir da comercialização do PVC reciclado, bem como os benefícios econômicos associados à redução das emissões de CO₂ (incluindo a possibilidade de créditos de carbono) e ao menor consumo de energia no processamento contínuo dos blisteres;
- Realizar um estudo de análise do ciclo de vida (LCA) do processo de reciclagem de blisteres para a produção de hidrogênio, considerando os impactos ambientais e energéticos em todas as etapas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Anvisa divulga dados do Anuário Estatístico do Mercado Farmacêutico 2022**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/noticias-anvisa/2023/anvisa-divulga-dados-do-anuario-sobre-a-industria-farmaceutica-no-brasil/anuario-estatistico-2022-versao-final.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2024.

AGILENT. **Agilent Cary 630 FTIR Spectrometer**. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <https://www.agilent.com/en/product/molecular-spectroscopy/ftir-spectroscopy/ftir-benchtop-systems/cary-630-ftir-spectrometer>. Acesso em: 15 out. 2024.

ALVES, L. L. M. **Caracterização Físico-Química de Filmes Poliméricos Multicamadas para Avaliação de Embalagens Farmacêuticas**. 2020. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Thesis (Ph.D.) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Department of Chemistry. DOI: 10.17771/PUCRio.acad.47383. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/47383/47383.PDF>.

ALVIANI, V. N.; SETIANI, P.; UNO, M.; OBA, M.; HIRANO, N.; WATANABE, N.; TSUCHIYA, N.; SAISHU, H. Mechanisms and possible applications of the Al–H₂O reaction under extreme pH and low hydrothermal temperatures. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 57, p. 29903–29921, 2019. ISSN 0360-3199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.152>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319919335529>.

ASHBY, M. F. **Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice**. 3. ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2021. ISBN 978-0-12-821521-0.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (ABAL). **A Indústria do Alumínio e a Crise de Energia**. 2001. Disponível em: <https://abal.org.br/noticia/a-industria-do-aluminio-e-a-crise-de-energia/>. Acesso em: 25 jun. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (ABAL). **Anuário Estatístico do Alumínio 2022**. 2023. Disponível em: <https://abal.org.br/noticia/ja-esta-disponivel-a-nova-edicao-do-anuario-estatistico-do-aluminio/>. Acesso em: 30 jun. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (ABAL). **Cadeia Primária do Alumínio**. 2024. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/cadeia-primaria/>. Acesso em: 21 jun. 2024.

BAJPAI, P. Chapter 3 - Stock Preparation. *In*: BAJPAI, P. (ed.). **Biermann's Handbook of Pulp and Paper (Third Edition)**. Third Edition. [S. l.]: Elsevier, 2018. p. 65–76. ISBN

978-0-12-814238-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814238-7.00003-9>.
Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128142387000039>.

ÇAPKIN, İ. Y.; GÖKELMA, M. A review on characterization and recyclability of pharmaceutical blisters. **Cleaner Waste Systems**, v. 4, p. 100082, 2023. ISSN 2772-9125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100082>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772912523000088>.

ÇAPKIN, İ. Y.; GÖKELMA, M. Characterization and Separation Behavior of Multi-layers in Aluminum-Rich Waste Pharmaceutical Blisters. **JOM**, Springer, v. 75, p. 4672–4679, 2023. DOI: 10.1007/s11837-023-06072-2.

CARPIO, D. C. F. D. **Degradacao Fisico-Quimica do PVC Causada por Derivados de Petroleo**. [S. l.]: Maxwell, 2009. Disponível em:
https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/15128/15128_1.PDF. Acesso em: 20 jun. 2024.

CENTRO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA - UFPR (CME-UFPR). **Equipamentos - Centro de Microscopia Eletrônica**. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em:
<https://cme.ufpr.br/equipamentos/>. Acesso em: 15 out. 2024.

CHEN, Q.; ZENG, W. Thermodynamic properties of aqueous aluminate ion, $\text{Al}(\text{OH})_4(\text{aq})$. **Journal of Central South University of Technology**, v. 1, n. 1, p. 8–13, 1994. ISSN 1993-0666. DOI: 10.1007/BF02652077. Disponível em:
<https://doi.org/10.1007/BF02652077>.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 358, de 29 de abril de 2005 (GESTÃO DE RESÍDUOS E PRODUTOS PERIGOSOS)**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2005. Disponível em:
<https://conama.mma.gov.br/images/conteudo/LivroConama.pdf>.

COSTA, L. A. S. **Apostila de Cinética Química**. [S. l.]: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2025. Disponível em:
https://www2.ufjf.br/quimicaead/wp-content/uploads/sites/224/2013/03/APOSTILA-DE-CIN%C3%89TICA-QU%C3%8DMICA_EADQUI047.pdf.

DEBONI, B. B.; ROSA GALESKI, H. da; VALT, R. B. G.; VALT, J. H. B. G.; SANTANA PONTE, M. J. J. de; ARAÚJO PONTE, H. de. Balanço energético da recuperação de polímero a partir de embalagens blister pós-consumo. **Anais do 12º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás**, 2024. DOI: <http://doi.org/10.71190/2024-12-1224280>. Disponível em:
<https://pdpetro.com.br/anais/repositorio/12pdpetro/57530405082024605.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2024.

DEEBIKA, P.; SARAVANAKUMAR, M. Utilization of RO rejects and waste aluminum scraps for hydrogen generation. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48,

n. 91, p. 35516–35531, 2023. ISSN 0360-3199. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.015>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923028288>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Nacional de Energia 2050**. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 17 maio 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional – BEN 2023**. 2023. Disponível em:
<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2024**. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/anuario-factsheet-2024.pdf>. Acesso em: 17 maio 2024.

ENERGY INSTITUTE. **Statistical Review of World Energy 2024**. London: Energy Institute, 2024. ISBN 978-1-78725-408-4. Disponível em:
https://www.energyinst.org/__data/assets/pdf_file/0006/1542714/684_EI_Stat_Review_V16_DIGIT. Acesso em: 1 jun. 2024.

HIGGINS, F. **Pharmaceutical Packaging Materials Quality Control and USP 661.1 Compliance: Agilent Cary 630 FTIR**. [S. l.], 2016. 8 p. Disponível em:
<https://www.agilent.com/cs/library/applications/5991-6978EN.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2024.

HORIZON EDUCATIONAL. **H-100 PEM Fuel Cell - 100W**. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: <https://www.horizoneducational.com/h-100-pem-fuel-cell-100w/p1248>. Acesso em: 14 abr. 2025.

HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen Insights 2021: A Perspective on Hydrogen Investment, Deployment, and Cost Competitiveness**. [S. l.], 2021. Disponível em:
<https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2025.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 6. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities**. [S. l.], 2019. Disponível em:
https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf. Acesso em: 14 fev. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Hydrogen storage: Challenges and opportunities**. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/hydrogen-storage>. Acesso em: 2 jun. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2023**. 2023. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ed1e4c42-5726-4269-b801-97b3d32e117c/WorldEnergyOutlook2023.pdf>. Acesso em: 20 maio 2024.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Green Hydrogen: A Guide to Policy Making**. Abu Dhabi, 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen>. Acesso em: 2 jun. 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway**. 2022. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_WETO_Summary_2022_PT.pdf. Acesso em: 5 maio 2024.

KAUR, P.; VERMA, G. A critical assessment of aluminum-water reaction for on-site hydrogen-powered applications. **Materials Today Energy**, v. 40, p. 101508, 2024. ISSN 2468-6069. DOI: 10.1016/j.mtener.2024.101508. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2024.101508>.

KLEJNOWSKA, K.; PIKOŃ, K.; ŚCIERSKI, W.; SKUTIL, K.; BOGACKA, M. Influence of Temperature on the Composition and Calorific Value of Gases Produced during the Pyrolysis of Waste Pharmaceutical Blisters. **Applied Sciences**, v. 10, n. 3, 2020. ISSN 2076-3417. DOI: 10.3390/app10030737. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/3/737>. Acesso em: 25 jun. 2024.

LIMA, P. E. A.; SILVA, J. A. M.; NASCIMENTO, R. S. V. Investigação da reatividade e da cinética de dissolução do alumínio do metacaulim em ácido sulfúrico. **Cerâmica**, Associação Brasileira de Cerâmica, v. 59, n. 350, p. 317–325, 2013. DOI: 10.1590/S0366-69132013000200020.

MCMURRY, J. E.; FAY, R. C. **Química**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. ISBN 9788576056751.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional do Hidrogênio: Diretrizes para a Consolidação da Economia do Hidrogênio no Brasil**. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia/planejamento/plano-nacional-do-hidrogenio-pnh2>. Acesso em: 2 jun. 2025.

MITSIDI, P. **O que você precisa saber sobre o Hidrogênio Verde**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://mitsidi.com/o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 2 jun. 2025.

MORDOR INTELLIGENCE. **Mercado de Embalagens Blister da América Latina**. 2024. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/latin-america-blister-packaging-market>. Acesso em: 2 maio 2024.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). **Hydrogen**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=1333-74-0%7D>. Acesso em: 14 fev. 2025.

NETO, B.; SCARMINIO, I.; BRUNS, R. **Como Fazer Experimentos - 4.ed.: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**. [S. l.]: Bookman, 2010. ISBN 9788577807130. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=FDnT9ygeOccC>.

NIEMINEN, J.; ANUGWOM, I.; KALLIOINEN, M.; MÄNTTÄRI, M. Green solvents in recovery of aluminium and plastic from waste pharmaceutical blister packaging. **Waste Management**, v. 107, p. 20–27, 2020. ISSN 0956-053X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.03.014>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X20301161>.

OLIVEIRA, R. C. de. **Panorama do hidrogênio no Brasil**. Brasília, 2022. DOI: 10.38116/td2787. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf. Acesso em: 10 fev. 2025.

PAVIA, D. L.; LAMPMAN, G. M.; KRIZ, G. S.; VYVYAN, J. R. **Introdução à Espectroscopia**. 5. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2015. ISBN 9788522125768.

PEREIRA, D. A. C.; FERREIRA, L. A. Blister Farmacêutico: A Influência da cor e dos tipos de filmes no acondicionamento de medicamentos. **Visão Acadêmica**, Curitiba, v. 17, n. 3, 2016. ISSN 1518-8361.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 9. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018. ISBN 978-0-07-183408-7.

PILCHIK, R. Pharmaceutical Blister Packaging, Part I: Rationale and Materials. **Pharmaceutical Technology**, PharmaPortal.com, v. 24, n. 11, p. 68–78, 2000. Disponível em: <https://pharmanet.com.br/pdf/blister.pdf>. Acesso em: 1 maio 2024.

POURBAIX, M. **Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions**. 2nd English ed. [S. l.]: National Association of Corrosion Engineers, 1974. p. 644.

RAJA, P. R. Cyanoacrylate Adhesives: A Critical Review. **Reviews of Adhesion and Adhesives**, Scrivener Publishing LLC, v. 4, n. 4, p. 398–412, 2016. DOI: 10.7569/RAA.2016.097315. Disponível em:

<https://raajournal.com/menuscript/index.php/raajournal/article/download/179/100>.
Acesso em: 1 jun. 2024.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY (REN21). **Renewables 2024 Global Status Report**. Report Collection, Global Overview (Paris: REN21 Secretariat). 2024. Disponível em: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2024_GlobalOverview_Full_Report_with_endnotes_web.pdf. Acesso em: 10 jun. 2024.

RIMŠAITĖ, A.; MUMLADZE, T.; DENAFAS, G. Feasibilities of Aluminium Recovery from Combined Packaging Waste. **SSRG International Journal of Agriculture & Environmental Science**, v. 6, n. 6, p. 103–111, 2019. DOI: 10.14445/23942568/IJAES-V6I6P114.

RITCHIE, H.; ROSADO, P.; ROSER, M. Energy Production and Consumption. **Our World in Data**, 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>. Acesso em: 19 fev. 2024.

RITCHIE, H.; ROSER, M.; ROSADO, P. Brazil: Energy Country Profile. **Our World in Data**, 2022. Disponível em: <https://ourworldindata.org/energy/country/brazil>. Acesso em: 20 abr. 2024.

SÁNCHEZ-BASTARDO, N.; SCHLÖGL, R.; RULAND, H. Methane Pyrolysis for Zero-Emission Hydrogen Production: A Potential Bridge Technology from Fossil Fuels to a Renewable and Sustainable Hydrogen Economy. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 60, n. 35, p. 12735–12752, 2021. DOI: 10.1021/acs.iecr.1c01679. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.1c01679>. Acesso em: 14 fev. 2025.

SHUKLA, S.; HALLI, P.; KHALID, M. K.; LUNDSTRÖM, M. Waste Pharmaceutical Blister Packages as a Source of Secondary Aluminum. **JOM**, Springer, v. 74, p. 612–621, 2022. DOI: 10.1007/s11837-021-05038-6.

SILVA, V. W. P. d. *et al.* Descarte de medicamentos e os impactos ambientais: uma revisão integrativa da literatura. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 28, n. 4, p. 1113–1123, 2023. Acessado: 20 Maio 2024. DOI: 10.1590/1413-81232023284.05752022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csc/a/6wySXdYtDxp3vjcnxM8sWyH/>.

SOUSA GOMES, B. D. de. **Produção de Hidrogênio via Reação de Alumínio com Soluções Alcalinas**. [S. l.: s. n.], 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/13710/1/BDSG23112018.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2025.

SULAREVISCZ, A. R.; SCZEZEPANSKI, B.; SILVA, L. A. d.; CALDERARI, M. V. A.; HAILE, O. C.; WOSIACK, P. A.; BOBEK, V. B. O potencial contaminante do descarte

incongruente de blister farmacéutico: soluções ambientais. **Visão acadêmica**, v. 21, n. 3, p. 34–49, 2020. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/academica/article/view/76349/42283>.

TESTA, V.; GERARDI, M.; ZANNINI, L.; ROMAGNOLI, M.; SANTANGELO, P. E. Hydrogen production from aluminum reaction with NaOH/H₂O solution: Experiments and insight into reaction kinetics. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 83, p. 589–603, 2024. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.152. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031992403307X?via%3Dihub>. Acesso em: 15 nov. 2024.

VALT, J. H. B. G.; ROSA GALESKI, H. da; VALT, R. B. G.; DEBONI, B. B.; SANTANA PONTE, M. J. J. de; ARAÚJO PONTE, H. de. Utilização de Arduino para a Detecção de Hidrogênio a partir de Embalagens Blister Pós-Consumo. **Anais do 12º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás**, 2024. DOI: <http://doi.org/10.71190/2024-12-1224704>. Disponível em: <https://pdpetro.com.br/anais/repositorio/12pdpetro/12100807092024407.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2024.

WANG, C.; WANG, H.; LIU, Y. Separation of aluminum and plastic by metallurgy method for recycling waste pharmaceutical blisters. **Journal of Cleaner Production**, v. 102, p. 378–383, 2015. ISSN 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.04.067. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615004424>.

YOUNES, M. M.; EL-SHAMY, A. M.; EL-SHAZLY, A. H. Kinetics and thermodynamics of aluminum corrosion in sulfuric acid solutions. **Journal of Molecular Liquids**, Elsevier, v. 277, p. 568–577, 2019. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.01.056.

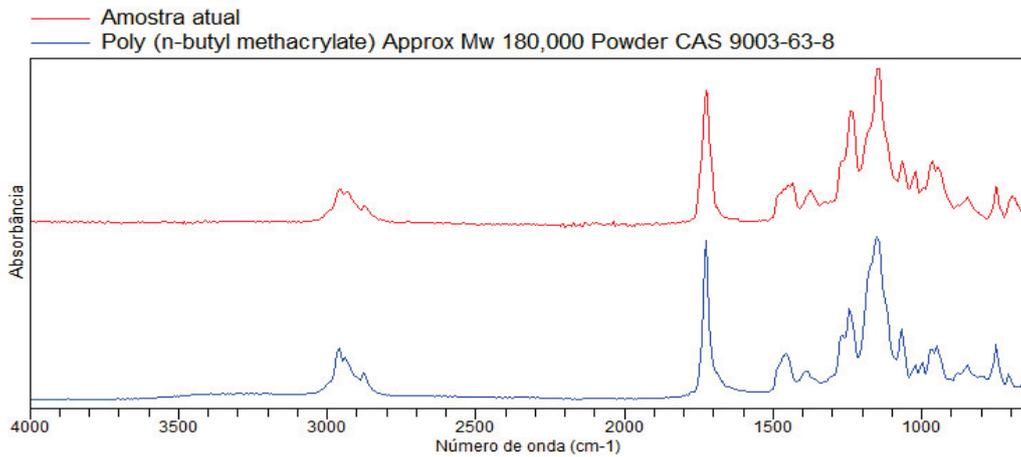
APÊNDICE 1 – RESULTADOS FTIR

1.1 RESULTADO ADESIVO



Sample ID:COLA 2.1
 Sample Scans:8
 Background Scans:8
 Resolution: 4
 System Status: Bom
 File Location:C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Results\FileLocationCOLA 2.1_0000.a2r

Method Name:library 1333
 User:1333
 Date/Time:04/22/2024 3:14:08
 Range:4000 - 650
 Apodization:Happ-Genzel



Quality	Library	CAS#	Name
0,93553	Agilent Polymer Handheld ATR Library (74)		Poly (n-butyl methacrylate) Approx Mw 180,000 Powder CAS 9003-63-8
0,91487	Agilent Polymer Handheld ATR Library (9)		Butyl methacrylate_isobutyl methacrylate copolymer, 50_50 copolymer beads Cas 9011-53-4

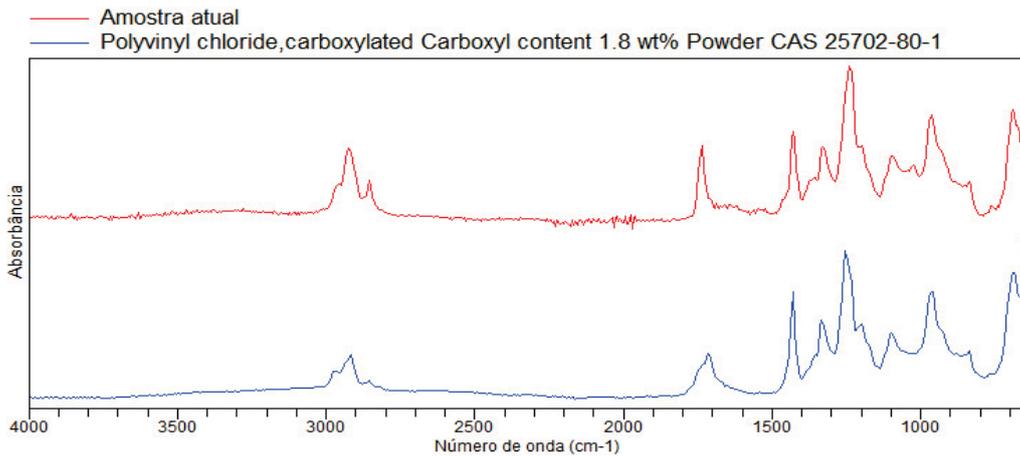
1.2 RESULTADO ADESIVO

0,90778	Agilent Polymer Handheld ATR Library (82)		Poly(methyl methacrylate)Approx Mw 35,000 Powder Cas 9011-14-7
0,89540	Agilent Polymer Handheld ATR Library (79)		Poly(ethyl methacrylate) Approx Mw 250,000 Powder CAS 9003-42-3
0,89307	Agilent Polymer Handheld ATR Library (81)		Poly(isobutyl methacrylate) Approx Mw 260,000 Powder Cas 9011-15-8
0,81808	ATR Demo Library (6)		adhesive tape

1.3 RESULTADO PARTE POLIMÉRICA



Sample ID:PVC 2.1
 Sample Scans:8
 Background Scans:8
 Resolution: 4
 System Status: Bom
 File Location:C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Results\FileLocationPVC 2.1_0000.a2r
 Method Name:library 1333
 User:1333
 Date/Time:04/22/2024 3:12:19
 Range:4000 - 650
 Apodization:Happ-Genzel



Quality	Library	CAS#	Name
0,91818	Agilent Polymer Handheld ATR Library (141)		Polyvinyl chloride,carboxylated Carboxyl content 1.8 wt% Powder CAS 25702-80-1
0,90784	Agilent Polymer Handheld ATR Library (143)		Polyvinylchloride (PVC)
0,90460	Agilent Polymer Handheld ATR Library		Vinyl choride_vinyl acetate copolymer,

1.4 RESULTADO PARTE POLIMÉRICA

	(176)		clear plastic
0,88864	Agilent Polymer Handheld ATR Library (171)		Vinyl chloride_vinyl acetate copolymer, Vinyl chloride 90% vinyl acetate 10% Powder CAS 9003-22- 9
0,88784	Agilent Polymer Handheld ATR Library (174)		Vinyl chloride vinyl acetate vinyl alcohol terpolymer Vinyl alcohol terpolymer, Vinyl chloride 91%, vinyl acetate 3%, Powder, CAS 25086- 48-0
0,86037	Agilent Polymer Handheld ATR Library (178)		Vinylidene chloride vinyl chloride copolymer, Vinylidene chloride 5%, Powder, CAS 9011-06-7

APÊNDICE 2 – CÓDIGO PYTHON UTILIZADO PARA ANÁLISE DE DADOS DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

```

1 import pandas as pd
2 import statsmodels.api as sm
3 from statsmodels.formula.api import ols
4 import numpy as np
5 import matplotlib.pyplot as plt
6 from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
7 from statsmodels.stats.anova import anova_lm
8 from statsmodels.stats.outliers_influence import
    variance_inflation_factor
9
10 # Passo 1: Criar o DataFrame com os novos dados
11 data = {
12     'Temperatura': [-1.414213562, -1.414213562, -1, -1, -1, -1, -1, 0,
13                    0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1.414213562],
14     'Aluminio': [0, 0, -1, -1, 1, 1, 1, -1.414213562, -1.414213562, 0,
15                 0, 0, 1.414213562, -1, -1, 1, 1, 1, 0],
16     'Taxa': [4.6599, 3.4192, 5.7598, 5.1716, 10.197, 9.5456, 12.906,
17             8.9517, 8.6726, 21.475, 18.72, 18.188, 13.609, 30.353, 27.242,
18             32.084, 53.69, 61.143, 47.752]
19 }
20 df = pd.DataFrame(data)
21
22 # Passo 2: Ajustar o modelo ANOVA
23 model = ols('Taxa ~ Temperatura + Aluminio + np.power(Temperatura, 2) +
24             np.power(Aluminio, 2) + Temperatura:Aluminio', data=df).fit()
25
26 # Passo 3: Analisar os resultados
27 anova_table = anova_lm(model)
28 print("Tabela ANOVA:")
29 print(anova_table)
30
31 print("\nResumo do Modelo:")
32 print(model.summary())
33
34 # Passo 4: Verificar a multicolinearidade (VIF)
35 X = sm.add_constant(df[['Temperatura', 'Aluminio']])
36 vif = pd.DataFrame()
37 vif['Variavel'] = X.columns
38 vif['VIF'] = [variance_inflation_factor(X.values, i) for i in range(X.
39                    shape[1])]
40
41 print("\nVIF (Variance Inflation Factor):")

```

```

36 print(vif)
37
38 # Passo 5: Superficie de Resposta
39 intercept = model.params['Intercept']
40 temp_coef = model.params['Temperatura']
41 alum_coef = model.params['Aluminio']
42 temp2_coef = model.params['np.power(Temperatura, 2)']
43 alum2_coef = model.params['np.power(Aluminio, 2)']
44 interaction_coef = model.params['Temperatura:Aluminio']
45
46 # Equacao do modelo
47 equation = f"Taxa = {intercept:.4f} + {temp_coef:.4f}*Temperatura + {
    alum_coef:.4f}*Aluminio + {temp2_coef:.4f}*Temperatura^2 + {
    alum2_coef:.4f}*Aluminio^2 + {interaction_coef:.4f}*Temperatura*
    Aluminio"
48
49 # Gerar superficies
50 temp_range = np.linspace(df['Temperatura'].min(), df['Temperatura'].max
    (), 30)
51 alum_range = np.linspace(df['Aluminio'].min(), df['Aluminio'].max(), 30)
52 X, Y = np.meshgrid(temp_range, alum_range)
53 Z = (intercept + temp_coef * X + alum_coef * Y +
54 temp2_coef * X**2 + alum2_coef * Y**2 +
55 interaction_coef * X * Y)
56
57 # Grafico de Superficie 3D
58 fig = plt.figure(figsize=(10, 7), dpi=300)
59 ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
60 surf = ax.plot_surface(X, Y, Z, cmap='RdYlGn', edgecolor='k', alpha=0.7)
61
62 ax.set_xlabel('Temperatura (Codificada)', fontsize=12, labelpad=10)
63 ax.set_ylabel('Massa de Aluminio (Codificada)', fontsize=12, labelpad
    =10)
64 ax.set_zlabel('Taxa de Reacao (mL/min)', fontsize=12, labelpad=10)
65 ax.set_title('Superficie de Resposta', fontsize=15, pad=20)
66
67 # Ajustar a barra de cores
68 cbar = fig.colorbar(surf, ax=ax, shrink=0.5, aspect=10, pad=0.1)
69 cbar.set_label('Taxa de Reacao (mL/min)', fontsize=12)
70
71 plt.tight_layout()
72 plt.show()
73
74 # Grafico de Contorno
75 plt.figure(figsize=(10, 7), dpi=300)
76 contour = plt.contourf(X, Y, Z, cmap='RdYlGn', levels=20)
77 plt.colorbar(contour, label='Taxa de Reacao (mL/min)')

```

```

78 plt.title('Grafico de Contorno', fontsize=15)
79 plt.xlabel('Temperatura (Codificada)', fontsize=12)
80 plt.ylabel('Massa de Aluminio (Codificada)', fontsize=12)
81 plt.tight_layout()
82 plt.show()
83
84 # Exibir a equacao final
85 print("\nEquacao do modelo ajustado sem a correcao do fator massico:")
86 print(equation)
87
88 # Modelo completo
89 model_full = ols('Taxa ~ Temperatura * Aluminio + np.power(Temperatura,
      2) + np.power(Aluminio, 2)', data=df).fit()
90
91 # Modelo reduzido (sem termos nao significativos)
92 model_reduced = ols('Taxa ~ Temperatura + Aluminio + np.power(
      Temperatura, 2)', data=df).fit()
93
94 # Comparar R^2 e R^2 ajustado
95 r2_full = model_full.rsquared
96 r2_adj_full = model_full.rsquared_adj
97
98 r2_reduced = model_reduced.rsquared
99 r2_adj_reduced = model_reduced.rsquared_adj
100
101 print(f"Modelo Completo: R^2 = {r2_full:.4f}, R^2 ajustado = {
      r2_adj_full:.4f}")
102 print(f"Modelo Reduzido: R^2 = {r2_reduced:.4f}, R^2 ajustado = {
      r2_adj_reduced:.4f}")
103
104 # Mostrar tabelas ANOVA para ambos os modelos
105 anova_full = anova_lm(model_full)
106 anova_reduced = anova_lm(model_reduced)
107
108 print("\nTabela ANOVA - Modelo Completo:")
109 print(anova_full)
110
111 print("\nTabela ANOVA - Modelo Reduzido:")
112 print(anova_reduced)
113
114 # Mostrar resumo dos dois modelos
115 print("\nResumo do Modelo Completo:")
116 print(model_full.summary())
117
118 print("\nResumo do Modelo Reduzido:")
119 print(model_reduced.summary())

```

APÊNDICE 3 – CÓDIGO PYTHON UTILIZADO PARA DETERMINAÇÃO DA CINÉTICA DA REAÇÃO

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from scipy.stats import linregress
4
5 # Novos dados fornecidos
6 ln_k = np.array([2.364432496, 2.256080315, 2.822568655, 2.834212844,
7                 3.494475195, 3.368605317, 4.111103346, 4.08584185, 4.591710003,
8                 4.64506375, 5.240900096, 5.17354748])
9 inv_T = np.array([0.003354016, 0.003354016, 0.003245173, 0.003245173,
10                 0.003143171, 0.003143171, 0.003047387, 0.003047387, 0.002957267,
11                 0.002957267, 0.002872325, 0.002872325])
12
13 # Encontrar valores medios e erros (desvio padrao) para pontos repetidos
14 unique_inv_T = np.unique(inv_T)
15 mean_ln_k = []
16 std_ln_k = []
17
18 for val in unique_inv_T:
19     mask = inv_T == val
20     mean_ln_k.append(np.mean(ln_k[mask]))
21     std_ln_k.append(np.std(ln_k[mask]))
22
23 mean_ln_k = np.array(mean_ln_k)
24 std_ln_k = np.array(std_ln_k)
25
26 # Ajuste linear nos valores medios
27 slope, intercept, r_value, p_value, std_err = linregress(unique_inv_T,
28                 mean_ln_k)
29
30 # Parametros da equacao de Arrhenius
31 R = 8.314 # Constante universal dos gases em J/mol.K
32 Ea = -slope * R / 1000 # Energia de ativacao (kJ/mol)
33 ln_A = intercept # ln(A)
34 A = np.exp(ln_A) # Fator pre-exponencial
35
36 # Calculo do R2
37 r_squared = r_value**2
38
39 # Exibir resultados
40 print(f"Equacao ajustada: ln(k) = {intercept:.4f} - ( {-slope:.4f} ) / T")
41 print(f"Ea (kJ/mol): {Ea:.4f}")
42 print(f"A: {A:.4e}")

```

```
38 print(f"R2: {r_squared:.4f}")
39
40 # Criar uma figura maior
41 plt.figure(figsize=(12, 8)) # Largura x Altura em polegadas
42
43 # Plotando os dados medios e o ajuste linear
44 plt.errorbar(unique_inv_T, mean_ln_k, yerr=std_ln_k, ecolor='gray',
45             elinewidth=3, fmt='o', label='Medias', color='red', capsizes=7)
46 plt.plot(unique_inv_T, slope*unique_inv_T + intercept, label=f'Ajuste
47         linear\nR^2 = {r_squared:.4f}$', color='blue')
48
49 # Configurar titulos e valores dos eixos
50 plt.xlabel('1/T (K^-a)', fontsize=17) # Tamanho maior para o titulo do
51     eixo X
52 plt.ylabel('ln(k)', fontsize=17) # Tamanho maior para o titulo do eixo
53     Y
54 plt.xticks(fontsize=17) # Tamanho dos valores do eixo X
55 plt.yticks(fontsize=17) # Tamanho dos valores do eixo Y
56
57 # Adicionar titulo ao grafico
58 plt.title('Ajuste da Equacao de Arrhenius', fontsize=18)
59
60 # Ajustes da legenda
61 plt.legend(title="Legenda", loc='upper right', fontsize=13,
62           title_fontsize='15', frameon=True, shadow=True)
63
64 # Ajustes no layout do grafico
65 plt.tight_layout()
66
67 # Salvar a imagem
68 plt.savefig('cinetica_personalizada.png', dpi=600)
69
70 # Mostrar o grafico
71 plt.grid(True)
72 plt.show()
```

APÊNDICE 4 – CÓDIGO IMPLEMENTADO NA PLACA ESP-32

```

1 #include <BluetoothSerial.h>
2
3 BluetoothSerial SerialBT;
4
5 const int PIN_MQ8 = 34;      // ADC1_CH6
6 unsigned long startTime;
7
8 void setup() {
9     // Debug via USB (opcional)
10    Serial.begin(115200);
11    while(!Serial) { delay(10); }
12
13    // Inicializa Bluetooth Classic
14    SerialBT.begin("ESP32_MQ8"); // nome do dispositivo Bluetooth
15    Serial.println("Bluetooth iniciado como ESP32_MQ8");
16
17    // Marca o tempo zero
18    startTime = millis();
19 }
20
21 void loop() {
22     // Le valor bruto do MQ-8 (0-4095)
23     int raw = analogRead(PIN_MQ8);
24
25     // Converte para tensao (0.0-3.3 V)
26     float voltage = raw * (3.3f / 4095.0f);
27
28     // Tempo decorrido desde o start (ms)
29     unsigned long t = millis() - startTime;
30
31     // Prepara a linha: "<leitura> <tempo_ms>\n"
32     // Enviada a tensao;
33     char buf[64];
34     int len = snprintf(buf, sizeof(buf), "%.3f %lu\n", voltage, t);
35
36     // Envia por Bluetooth
37     SerialBT.write((uint8_t*)buf, len);
38

```

```
39 // (Opcional) ecoa no Serial USB
40 Serial.print("Enviado: ");
41 Serial.print(buf);
42
43 delay(100); // ajusta o intervalo de envio conforme seu
44             experimento
45 }
```

APÊNDICE 5 – CÓDIGO PYTHON UTILIZADO PARA OBTENÇÃO DOS DADOS DO SENSOR DE HIDROGÊNIO

```

1 import serial as serial
2 import pandas as pd
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5 # Configura a porta serial para o Bluetooth
6 ser = serial.Serial("COM10", 115200)
7
8 # Da o nome ao arquivo
9 graus = input("Quantos graus? ")
10 tratamento = input("Qual o tempo de tratamento? ")
11 gramas = input("Quantas gramas sendo usados? ")
12 vez = input("Qual o numero experimento atual? ")
13 texto_dados = f"{graus}C-{tratamento}-{gramas}g-{vez}.txt"
14
15 # Cria o arquivo e escreve o cabeçalho
16 with open(texto_dados, "w") as arq:
17     arq.write("leitura tempo\n")
18
19 # Configura o gráfico
20 plt.ion()
21 fig, ax = plt.subplots()
22 ax.set_xlabel('tempo')
23 ax.set_ylabel('leitura')
24 ax.set_title(f'Gráfico para {graus} C, {tratamento} horas de tratamento
25             e com {gramas} gramas de alumínio')
26
27 # Inicializa listas para armazenar os dados
28 tempos = []
29 leituras = []
30
31 # Pega os dados do sensor e escreve no arquivo
32 try:
33     with open(texto_dados, 'a') as file:
34         while True:
35             data = ser.readline().decode('utf-8').strip()
36             print(f"Recebido: {data}")
37             file.write(data + '\n')
38             file.flush()
39
40 # Atualiza os dados do gráfico
41 leitura, tempo = map(float, data.split())
42 tempo_s = tempo/1000

```

```
42 tempos.append(tempo_s)
43 leituras.append(leitura)
44 ax.scatter(tempos, leituras, color='blue')
45 plt.pause(0.05)
46
47 finally:
48     plt.ioff() # Desativa o modo interativo
49     plt.show()
50     ser.close()
```