

GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO VIA PROCESSAMENTO ALCALINO DE RESÍDUOS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS PÓS-USO

HYDROGEN GENERATION VIA ALKALINE PROCESSING OF POST-CONSUMER PHOTOVOLTAIC PANEL WASTE

Rafael Francisco Schlindwein Odisi ¹
Maria Jeronimo de Santana Ponte ²
Renata Bachmann Guimarães Valt ³
Haroldo de Araújo Ponte ⁴

Resumo – Este estudo investiga a produção de hidrogênio a partir de resíduos de módulos fotovoltaicos pós-consumo por meio de reações em solução alcalina com hidróxido de sódio (NaOH). O processo experimental incluiu a separação física do painel, trituração, peneiramento e caracterização química das frações obtidas. Foram avaliadas diferentes granulometrias (malhas 7, 14, 65, 170 e fundo) quanto ao seu desempenho na geração de hidrogênio. Os resultados indicaram que a granulometria intermediária (malha 65) apresentou maior produção de gás, atingindo até 425 mL/g após moagem adicional e remoção do vidro. A eliminação de impurezas físicas e o aumento da área superficial favoreceram a cinética da reação. Os achados reforçam o potencial de valorização de resíduos eletrônicos como insumo para geração de hidrogênio em pequena escala, promovendo uma alternativa sustentável de reaproveitamento energético.

Palavras-chave: Hidrogênio. Energia renovável. Reciclagem.

Abstract – This study investigates the production of hydrogen from post-consumer photovoltaic module waste through reactions in an alkaline solution with sodium hydroxide (NaOH). The experimental process included physical separation of the panel, crushing, sieving, and chemical characterization of the resulting fractions. Different particle sizes (7, 14, 65, 170 mesh, and bottom) were evaluated for their hydrogen generation performance. The results

¹Doutorando do curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia em sistemas térmicos, da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba - PR. Contato: rafaelodisi@gmail.com

²Doutora em Engenharia de Processos UFSCar; Mestre em Engenharia Química UFSCar; Bacharel em Engenharia Química UFC. Professora Titular do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná. Contato: mponte@ufpr.br.

³Doutora em Engenharia e Ciência dos Materiais UFPR; Mestre em Engenharia com ênfase em Processos Térmicos e Químicos UFPR; Especialista em Gerenciamento Ambiental SENAI/Paraná; Bacharel em Engenharia Química UFPR. Pesquisadora do Grupo de Eletroquímica Aplicada (GEA) da UFPR. Contato: revalt@ufpr.br

⁴Doutor em Ciência e Engenharia dos Materiais UFSCar; Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais (UFSCar); Bacharel em Engenharia Mecânica UFC. Professor Titular da Universidade Federal do Paraná. Contato: hponte@ufpr.br

indicated that the intermediate particle size (65 mesh) presented the highest gas production, reaching up to 425 mL/g after additional crushing and glass removal. The elimination of physical impurities and the increase in surface area favored the reaction kinetics. The findings reinforce the potential for valorizing electronic waste as an input for small-scale hydrogen generation, promoting a sustainable alternative for energy reuse.

Keywords: *Hydrogen. Renewable energy. Recycling.*

I. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes renováveis de energia tem impulsionado a ampla adoção da energia solar fotovoltaica em escala global, favorecida pela redução nos custos de instalação e pelo incentivo a políticas sustentáveis. Contudo, esse avanço tecnológico acarreta um desafio ambiental significativo: a geração futura de resíduos provenientes de módulos fotovoltaicos ao fim de sua vida útil, estimada entre 25 e 30 anos (IRENA, 2016). Considerando a projeção de descarte em massa nas próximas décadas, torna-se imperativo o desenvolvimento de estratégias que possibilitem o reaproveitamento eficiente desses resíduos, em consonância com os princípios da economia circular (FARAGGI et al., 2023).

Os módulos fotovoltaicos contêm materiais de alto valor tecnológico e econômico, como silício (Si), alumínio (Al), estanho (Sn) e prata (Ag), amplamente utilizados na fabricação das células solares, contatos metálicos e sistemas de interconexão. O reaproveitamento desses elementos por meio de técnicas limpas e sustentáveis pode mitigar impactos ambientais e possibilitar novas rotas de valorização energética. Dentre essas rotas, destaca-se a utilização de reações químicas em meio alcalino com hidróxido de sódio (NaOH), que promovem a oxidação de metais presentes no resíduo sólido e a consequente liberação de gás hidrogênio (H₂), vetor energético limpo e com alto poder calorífico (LIU et al., 2013).

Neste contexto, o presente estudo investiga a produção de hidrogênio a partir de resíduos de módulos fotovoltaicos reciclados, avaliando a influência de variáveis como granulometria, remoção de impurezas (vidro e polímeros) e preparação física do material sobre a eficiência reacional. A investigação compreende etapas de separação mecânica, caracterização química, processamento em meio alcalino e análise da produção de hidrogênio.

A motivação central desta pesquisa é a exploração de uma rota alternativa para o aproveitamento de resíduos sólidos industriais, com foco na sustentabilidade ambiental e no aproveitamento energético do hidrogênio gerado. A identificação de parâmetros que maximizam a conversão do resíduo em gás útil contribui para o avanço de tecnologias de recuperação e para o desenvolvimento de soluções aplicáveis em escala laboratorial e, futuramente, industrial (OWEN; MA, 2021).

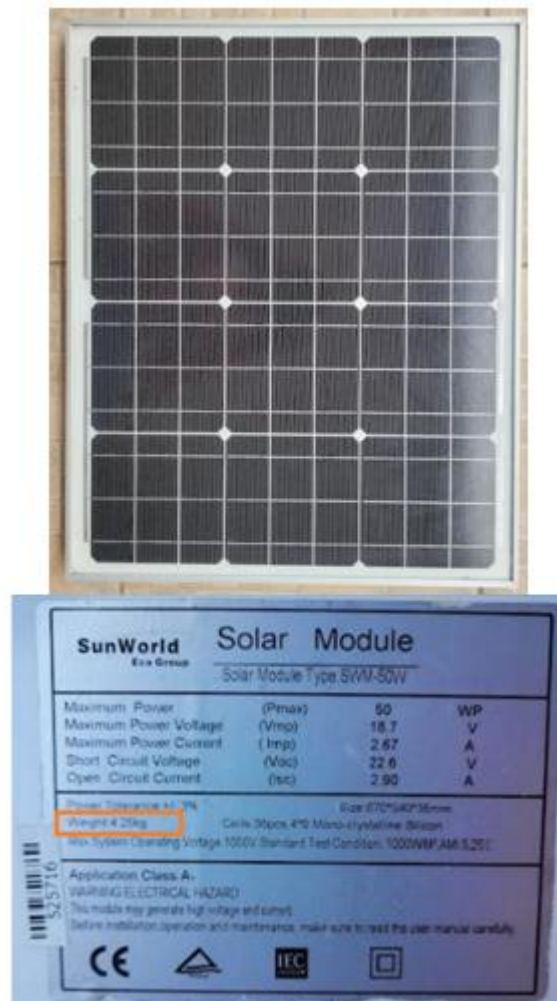
II. MODELO EXPERIMENTAL

O estudo consiste na produção de hidrogênio por meio da reação química entre o material base, composto pelos metais silício, alumínio, estanho e prata presentes no módulo laminado, e o hidróxido de sódio. O material a ser estudado consiste em um painel fotovoltaico pós-consumo, fabricado pela empresa Sun World- Eco Group.

O painel ao final do ciclo é submetido ao processo de reciclagem, com o objetivo de recuperar os componentes constituintes do painel, como estrutura de alumínio, caixa de junção, vidro e encapsulante TEDLAR. Esses elementos serão enviados para um centro de reciclagem convencional para cada material. Os resíduos das células moídas podem ser utilizados em um novo processo, como produzir novos painéis ou obter a

recuperação de elementos químicos presentes na célula, como silício, prata e alumínio. A Figura 1 mostra o painel fotovoltaico em estudo, a partir do qual serão realizados os experimentos.

Figura 1 – Características técnicas do painel fotovoltaico em estudo



Fonte: Autores, 2025

O painel fotovoltaico tem potência de 50W e estrutura de alumínio para dar sustentação e rigidez ao conjunto. O painel tem dimensão de 670x 540mm e massa total de 4250g. As células que compõem o painel são feitas de silício monocristalino. Durante seu uso, a eficiência de conversão de energia elétrica obtém níveis inferiores aos nominais e precisam ser descartadas após aproximadamente quinze anos de uso.

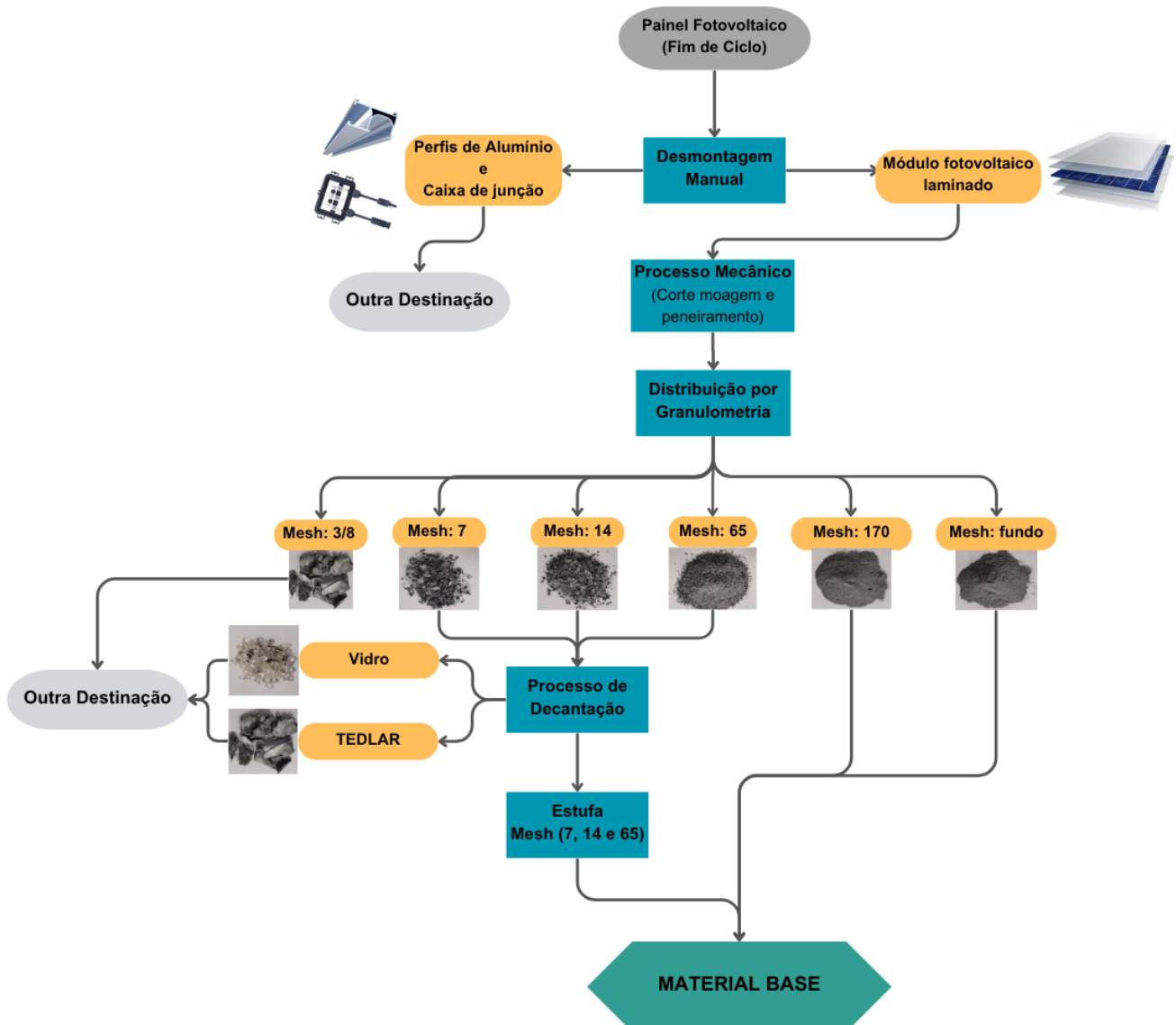
2. 1 Etapas do processo de reciclagem do módulo fotovoltaico

As etapas do processo utilizado para reciclar o painel fotovoltaico estão mostradas na Figura 2. O processo proposto inicia com a etapa de desmontagem manual, separando os perfis de alumínio (molduras) e caixa de junção (terminais elétricos) do painel laminado (vidro, EVA, célula e TEDLAR).

O painel laminado contendo as camadas de vidro, polímero e silício/metal passa para a próxima etapa, na qual é cortado em pedaços de aproximadamente 2x2 cm e

posteriormente moído. Os perfis de alumínio e a caixa de junção são destinados à reciclagem convencional desses materiais.

Figura 2 - Fluxograma do processo de reciclagem proposto



Fonte: Autores, 2025

Após a etapa de armazenamento, o painel fotovoltaico foi submetido ao primeiro tratamento, denominado separação manual. Essa etapa teve como objetivo a desmontagem inicial do equipamento em dois componentes distintos: o Bloco 1, composto pela esquadria de alumínio e pela caixa de junção elétrica, e o Bloco 2, correspondente ao módulo fotovoltaico propriamente dito, ainda em sua forma laminada.

Na sequência, realizou-se o corte manual do módulo fotovoltaico laminado correspondente ao bloco 2 em fragmentos de aproximadamente 2×2 cm. Foram utilizados uma serra manual e alicates de corte, de forma complementar. A serra manual foi empregada para a obtenção de elementos maiores 10×10 cm, o que facilitou o manuseio subsequente. Em seguida, o emprego do alicate padrão, utilizado como alavanca, e do alicate de corte permitiram a divisão dos pedaços em fragmentos menores, atingindo o tamanho padrão estabelecido de 2×2 cm. Após o corte, os fragmentos contendo vidro, EVA, células fotovoltaicas e TEDLAR foram submetidos ao processo de

moagem. A moagem consistiu na fragmentação mecânica dos painéis solares visando a redução do tamanho das partículas, o que promoveu maior facilidade na separação dos componentes, além de aumentar a área superficial disponível para reações subsequentes. A operação de moagem foi realizada utilizando-se um moinho de rosca. O processo teve início com o abastecimento do funil do equipamento, no qual foram inseridos os fragmentos do módulo. A movimentação dos materiais ocorreu por meio de um eixo caracol, que direcionou os pedaços à lâmina trituratora, garantindo a moagem adequada para a continuidade do tratamento. Esse processo viabilizou a separação do EVA e do TEDLAR por cisalhamento causado pelo moinho de rosca.

Posteriormente, procedeu-se à etapa de peneiramento. Para tanto, utilizou-se uma peneira vibratória modelo AGMAGB, operando com uma frequência máxima de 3600 vibrações por minuto e equipada com temporizador. Um teste preliminar foi conduzido a fim de determinar a distribuição do material entre as diferentes granulometrias. Com base nos resultados obtidos, estabeleceu-se a utilização de peneiras de diferentes malhas: 3/8”, 7, 14, 65, 170 e fundo. Cada peneira teve a função de classificar a massa de resíduos conforme o tamanho de grão, permitindo a caracterização granulométrica do material moído.

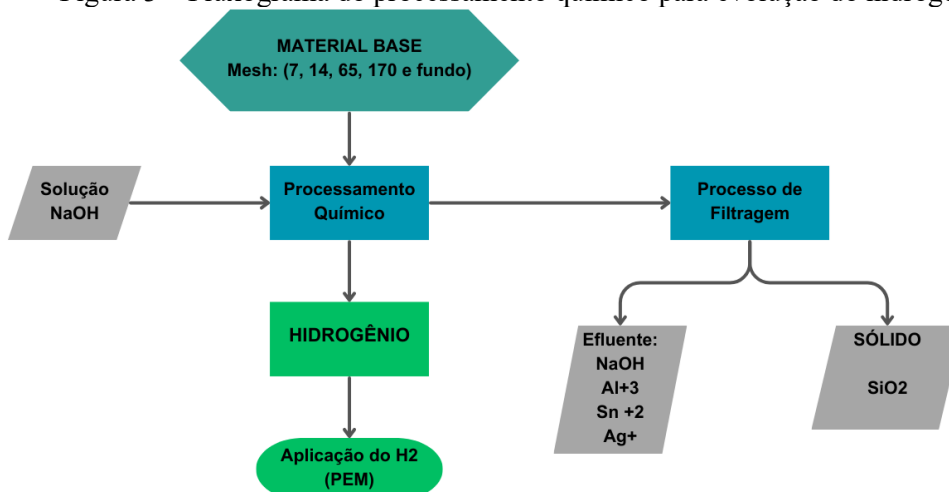
O produto obtido no processo de peneiramento, que contém alto teor de vidro e polímero, passará por uma etapa de separação. Esta etapa consiste na utilização do método de decantação. Utilizando um Becker de 500 ml, água destilada e massa de células fotovoltaicas moídas de diferentes tamanhos de malha (7, 14 e 65). Inicia-se o processo de separação do vidro e do polímero. Assim, devido à diferença de densidade entre os elementos presentes no conjunto em análise, os sedimentos vítreos e o polímero aparecem como sobrenadante. Dessa forma, obtém-se uma separação eficaz desses componentes.

Será aplicada uma técnica de fluorescência de raios X (XRF), com o objetivo de determinar a quantidade e os tipos de elementos químicos presentes em amostras de resíduos fotovoltaicos.

2.2 Processamento químico para produção de hidrogênio

Após o processo de reciclagem as partículas fragmentadas do módulo laminados são denominadas de material base que na sequência foram utilizadas para produção de hidrogênio pela reação com hidróxido de sódio. A figura 3 apresenta um fluxograma do processamento químico para produção do hidrogênio.

Figura 3 – Fluxograma do processamento químico para evolução do hidrogênio



Fonte: Autores, 2025

O material contendo silício, alumínio e prata, previamente separado, foi processado com solução de hidróxido de sódio (NaOH) para gerar hidrogênio. A reação entre os resíduos moídos de módulos fotovoltaicos e a solução alcalina liberou o gás. Após a geração do hidrogênio, realizou-se a filtragem para separar o efluente líquido da lama residual sólida, composta por silício, óxido de silício e prata. O efluente contém NaOH e elementos em forma iônica. O hidrogênio gerado poderá ser utilizado futuramente em aplicações experimentais, como testes com células a combustível em ambiente laboratorial, visando aproveitamento energético sustentável. A tabela 1 apresenta um roteiro dos experimentos realizados.

Tabela 1 – Roteiro dos procedimentos experimentais

Ensaio	Mesh	pH	Massa(g)	Moagem adicional	Vidro
Exp 1	7 - Pós uso	14	5,0	Sem	Sem
Exp 2	14 - Pós uso	14	5,0	Sem	Sem
Exp 3	65 - Pós uso	14	5,0	Sem	Com
Exp 4	65 - Pós uso	14	5,0	Sem	Sem
Exp 5	65 - Pós uso	14	2,0 ¹	Com	Sem
Exp 6	170 - Pós uso	14	5,0	Sem	Sem
Exp 7	170 - Pós uso – réplica	14	5,0	Sem	Sem
Exp 8	Fundo - pós uso	14	2,0 ¹	Sem	Sem

Nota¹: Material com granulometria mais fina aumentando a área superficial, utilizou uma massa reduzida pois, teve uma elevada cinética de reação.

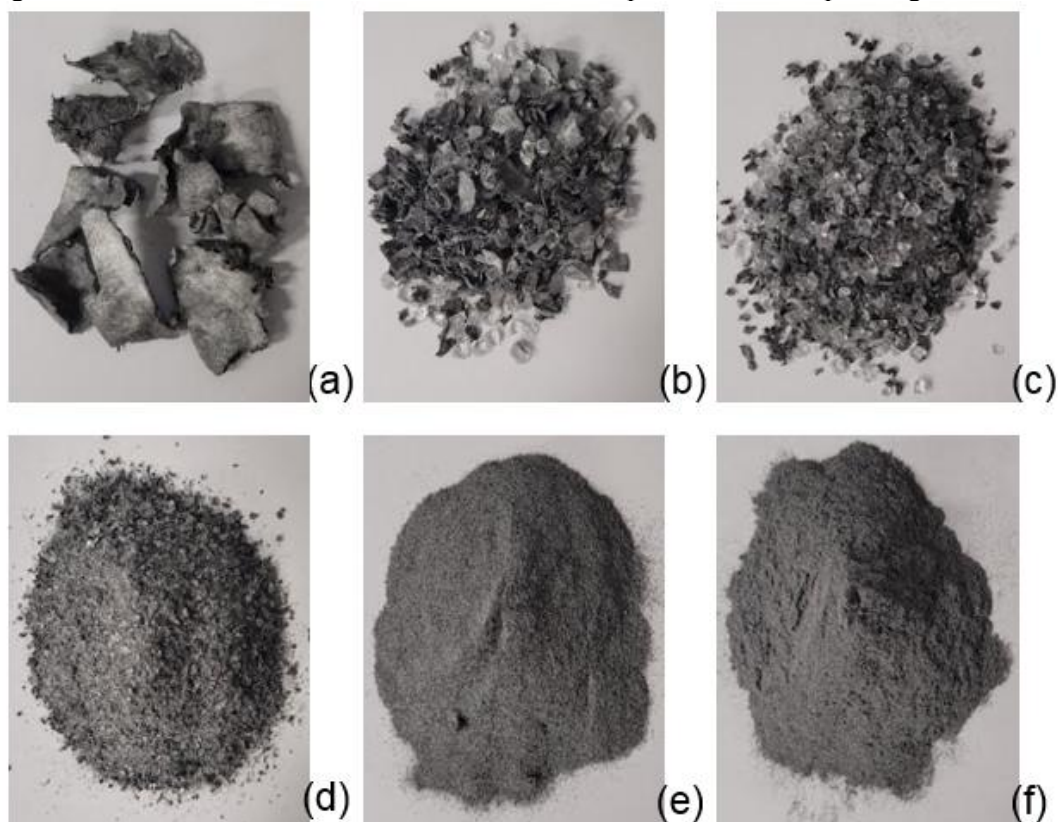
Fonte: Autores, 2025

Iniciou-se os procedimentos experimentais do processo químico, cujo objetivo foi analisar o comportamento reacional de diferentes granulometrias de resíduos de módulos fotovoltaicos frente a uma solução alcalina de hidróxido de sódio (NaOH) a 1 mol/L (pH 14), sob temperatura controlada de 50 °C e volume fixo de 100 mL. As amostras foram distribuídas em cinco faixas granulométricas (malhas 7, 14, 65, 170 e fundo), com variações na massa e em tratamentos prévios como moagem e remoção de vidro. Foram realizados oito experimentos para avaliar a influência da granulometria, da massa do resíduo, da presença de vidro e da moagem adicional na cinética de geração de hidrogênio. Notadamente, as amostras mais finas (malha 65 com moagem e fundo) tiveram massa reduzida intencionalmente, devido à sua maior área superficial, o que acelera a reação. A moagem adicional foi aplicada à amostra da malha 65 utilizando um moinho de tungstênio, com o intuito de alcançar granulometria mais fina (nível fundo) e, assim, aumentar a área de contato reativa. A remoção do vidro em algumas amostras visou aprimorar a pureza do resíduo sólido, focando na recuperação eficiente de elementos valiosos como silício e prata. Os dados obtidos nessa etapa exploratória permitiram identificar as condições mais favoráveis à geração de hidrogênio, possibilitando comparações entre diferentes configurações testadas.

III. RESULTADOS

Após o processo de reciclagem, obteve-se a massa total do material, a qual foi utilizada para a etapa subsequente de caracterização por FRX e processamento químico para produção de hidrogênio. A Figura 4 apresenta o aspecto físico do material base.

Figura 4 – Resíduo do módulo fotovoltaico em estudo para diferentes tipos de granulometria



Fonte: Autores, 2025

Os tamanhos correspondem às malhas ilustradas na figura 3: (a) Mesh 3/8: Malha de abertura maior, onde foram retidos apenas pedaços grandes de polímero, provenientes principalmente do *backsheet* (TEDLAR); (b) Mesh 7: Apresenta grãos menores que o anterior, com alta concentração de fragmentos de vidro e da camada protetora TEDLAR; (c) Mesh 14: Os pedaços de vidro e polímero são significativamente menores, embora ainda não haja presença relevante de material da célula fotovoltaica; (d) Mesh 65: Grãos com tamanho mais atrativo para separação, contendo baixa presença de vidro, pequena quantidade de polímero e uma proporção representativa de células fotovoltaicas; (e) Mesh 170 e (f) Fundo (resíduo abaixo da menor peneira): Granulometria fina, com alta concentração de material das células fotovoltaicas, presença quase nula de polímero e vidro.

3.1 Caracterização do material base para o processamento químico

Os resíduos oriundos do módulo laminado apresentaram teores relevantes de silício (Si), alumínio (Al) e estanho (Sn), sendo estes os principais elementos reativos no processo de geração de hidrogênio em meio alcalino. As diferentes faixas de granulometria apresentaram variações significativas na composição e na área superficial disponível para reação, influenciando diretamente a eficiência do processo. Os resultados dessa caracterização foram essenciais para a escolha das amostras utilizadas nos testes experimentais. A tabela 2 apresenta os elementos químicos presentes nas amostras submetidas à técnica de fluorescência de raios-X (FRX), após a etapa de decantação e antes do processamento químico.

Tabela 2 – Resultado de FRX do material base pós-consumo por mesh

Amostras	Elementos Químicos									P.F.	Total
FV – Mesh: 3/8	SiO ₂ 14,5%	Na ₂ O 1,9%	Al ₂ O ₃ 2,4%	Fe ₂ O ₃ 0,9%	CaO 0,7%	TiO ₂ 0,5%	MgO 0,4%	SO ₃ 0,3%	BaO 0,2%	78,07%	99,87% ¹
FV – Mesh: 7	SiO ₂ 13,3%	Na ₂ O 3,7%	Al ₂ O ₃ 2,8%	Fe ₂ O ₃ 1,3%	Cl 1,0%	TiO ₂ 0,8%	CaO 0,8%	SO ₃ 0,7%	MgO 0,4%	74,60%	99,4% ¹
FV – Mesh: 14	SiO ₂ 14,5%	Na ₂ O 2,8%	Al ₂ O ₃ 2,5%	Fe ₂ O ₃ 1,6%	CaO 0,7%	Cl 0,5%	MgO 0,3%	TiO ₂ 0,3%	SO ₃ 0,2%	76,27%	99,67% ¹
FV – Mesh: 65	SiO ₂ 11,8%	Na ₂ O 6,9%	Cl 2,7%	Al ₂ O ₃ 2,0%	Fe ₂ O ₃ 1,5%	CaO 0,6%	MgO 0,3%	TiO ₂ 0,2%	BaO 0,1%	73,74%	99,84% ¹
FV – Mesh: 170	SiO ₂ 70,1%	Na ₂ O 8,5%	CaO 6,8%	Fe ₂ O ₃ 6,0%	Al ₂ O ₃ 4,4%	MgO 1,9%	SnO ₂ 0,5%	SO ₃ 0,3%	Ag ₂ O 0,2%	0,76%	99,46% ¹
FV – Mesh: Fundo	SiO ₂ 68,6%	Na ₂ O 8,7%	Fe ₂ O ₃ 8,0%	CaO 6,6%	Al ₂ O ₃ 3,8%	MgO 1,8%	SnO ₂ 1,3%	Ag ₂ O 0,6%	SO ₃ 0,2%	0,6%	99,6% ¹

Fonte: Autores, 2025

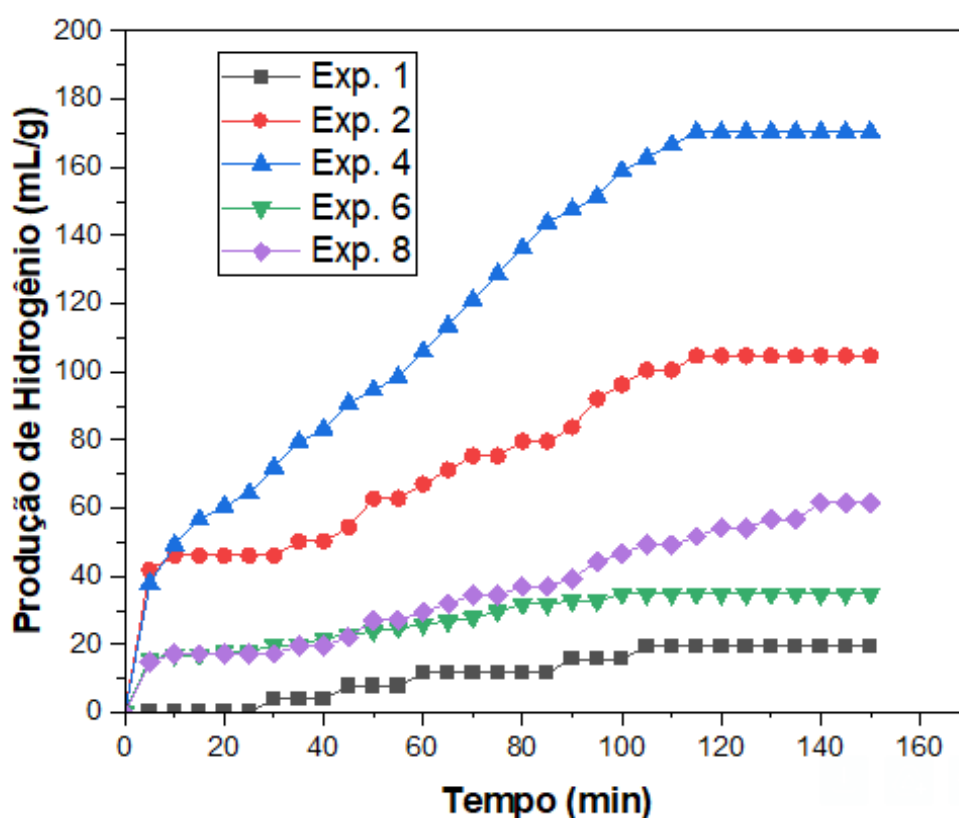
Os elementos químicos identificados em cada fração granulométrica (Mesh) estão organizados por ordem decrescente de concentração. O silício e a prata apresentaram concentrações mais elevadas nas frações mais finas do material, resultado direto do processo de moagem e peneiramento, que fragmenta essas substâncias condutoras e semicondutoras, tornando-as mais presentes nas partículas com menor diâmetro. O alumínio, por sua vez, mostrou uma distribuição relativamente uniforme entre as diferentes malhas, o que pode ser explicado pela presença de uma camada posterior de alumínio junto ao filme de TEDLAR, típico das células solares, que se fragmenta de maneira semelhante durante o processo. Uma observação relevante foi a relação entre o estanho e a prata, ambos presentes no elemento *tabwire* (fio de solda) das células fotovoltaicas, que utiliza uma liga de estanho como meio de conexão entre os componentes. Isso explica sua co-ocorrência nas frações mais finas do material reciclado.

Nas frações de granulometria mais grossa (Malhas 3/8 até 65), foi identificada a presença de resíduos poliméricos, especialmente o EVA, utilizado como encapsulante nas células. Isso foi confirmado visualmente pela observação de fragmentos do polímero e quimicamente pelo elevado teor de perda ao fogo (P.F.), indicador clássico de material orgânico volátil. As malhas 3/8 a 65 possuem baixo teor de silício. O silício que compõe a célula fotovoltaica é frágil e por isso facilmente moído à malha 170 e fundo.

3.2 – Produção de hidrogênio a partir do material reciclado

A figura 5 apresenta a evolução da geração do gás hidrogênio de acordo com cada granulometria do material reciclado nas malhas #7, #14, #65, #170 e fração de fundo, com impurezas removidas previamente por processos de separação física.

Figura 5 – Evolução de geração do gás hidrogênio por granulometria, pH 14



Legenda: Exp 1: malha 7. Exp. 2: malha 14. Exp. 4: malha 65 sem vidro e inteiro. Exp. 6: malha 170. Exp. 8: fundo. Todos em pH 14.

Fonte: Autores, (2025)

Observa-se a cinética do processo químico pela relação do volume de hidrogênio gerado com o tempo, considerando uma massa de resíduo de módulo fotovoltaico. A massa utilizada em cada experimento encontra-se descrita na TABELA 2, que apresenta o roteiro dos experimentos. Os resultados mostraram uma clara influência da granulometria na eficiência de geração de gás hidrogênio, evidenciando que a área superficial disponível para reação desempenha papel determinante na cinética e no rendimento total da reação com solução alcalina.

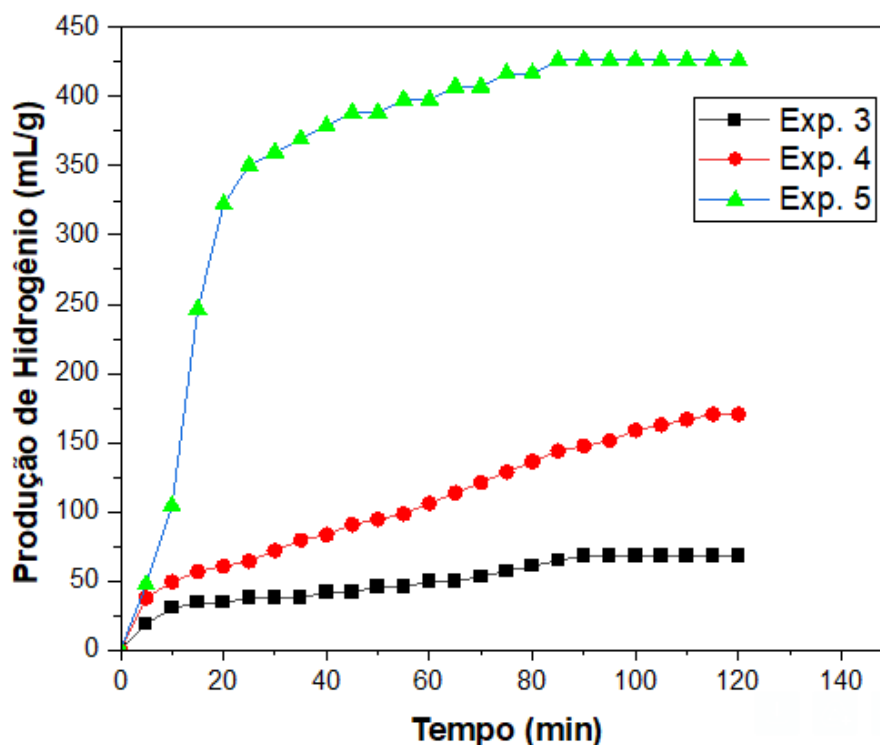
A fração com granulometria intermediária malha 65, Exp. 4 foi a que apresentou a maior produção acumulada de hidrogênio, atingindo aproximadamente 180 mL/g ao final do experimento. Esse desempenho superior está associado à maior área de contato com o reagente, sem comprometer a acessibilidade da solução ao interior das partículas. Por outro lado, a fração de granulometria mais grossa malha 7, Exp. 1 exibiu o menor rendimento aproximadamente 35 mL/g, o que pode ser atribuído à reduzida área superficial disponível para a reação, limitando a dissolução dos componentes metálicos presentes.

A amostra com granulometria malha 14, Exp. 2 apresentou desempenho intermediário gerando aproximadamente 102 mL/g, confirmando uma relação crescente entre redução granulométrica e aumento da produção de H_2 , até certo limite. No entanto, a fração muito fina composta pela malha 170, Exp. 6 teve menor rendimento quando comparado com malha 65, possivelmente devido à aglomeração das partículas ou formação de barreiras físicas que dificultam a penetração da solução alcalina. A fração de fundo Exp. 8, composta por partículas ultrafinas e heterogêneas, obteve produção

próxima a 90 mL/g, desempenho moderado que pode estar relacionado à presença de material parcialmente inerte ou já passivado.

Esses resultados indicam que existe uma faixa ótima de granulometria para maximizar a produção de hidrogênio. Nestes resultados, a malha 65 demonstrou ser a mais eficaz. A análise evidencia a importância do controle da granulometria no processamento de resíduos fotovoltaicos para fins de valorização energética via reação alcalina. A figura 6 apresenta uma comparação de geração do gás hidrogênio para diferentes condições de processamento da malha 65.

Figura 6 – Comparações de geração do gás hidrogênio no mesh 65 no pH 14



Legenda: Exp. 3 Mesh 65, com vidro. Exp. 4, Mesh 65, sem vidro. Exp. 5 Mesh 65 com moagem adicional.

Fonte: Autores, (2025)

Os resultados demonstraram que a modificação na preparação das amostras teve influência direta sobre a cinética de reação e, consequentemente, sobre o volume de hidrogênio produzido. O experimento 4, correspondente ao mesh 65 sem vidro e sem polímeros, apresentou uma produção média de hidrogênio de 165 mL/g, indicando que a remoção do vidro melhora consideravelmente a eficiência do processo. Isso pode ser atribuído à eliminação de uma barreira inerte que, de outra forma, limitaria o contato do reagente NaOH com os elementos ativos, como silício e alumínio.

No experimento 5, no qual o resíduo de mesh 65 foi moído após a remoção do vidro, observou-se um desempenho significativamente superior, com um pico de produção de 425 mL/g. O aumento da eficiência nesse caso está associado à redução no tamanho das partículas, que promove uma maior área superficial de reação, favorecendo a cinética do processo químico e maximizando a liberação de gás hidrogênio. Por outro lado, o experimento 3 realizado com o resíduo de mesh 65 na forma íntegra e contendo vidro apresentou o menor desempenho entre os três, com produção de apenas 63 mL/g de

hidrogênio. A presença do vidro atua como barreira física, dificultando a penetração do reagente até os componentes ativos e limitando significativamente a reação.

Os resultados obtidos neste estudo corroboram com achados prévios da literatura internacional quanto ao comportamento reacional de metais como silício e alumínio em meio alcalino. Hu et al. (2022) observaram que a lixiviação de resíduos de módulos fotovoltaicos à base de silício em solução de NaOH a 70 °C promove a liberação de gás hidrogênio, embora com rendimento limitado devido à presença de camadas passivadoras e materiais inertes. Em contraste, os experimentos aqui relatados demonstraram que a remoção física do vidro e a moagem adicional das partículas maximizam a área superficial disponível para reação, resultando em produções de até 425 mL/g, valor significativamente superior aos reportados em estudos anteriores com sistemas não otimizados.

Além disso, estudos como o de Liu et al. (2013) destacam o uso de partículas de alumínio revestidas com carbono para intensificar a produção de hidrogênio em solução alcalina. Embora o presente trabalho não tenha utilizado catalisadores, os resultados sugerem que ajustes físicos no pré-tratamento do resíduo podem exercer efeito análogo à catalisação heterogênea, ao facilitar a exposição dos metais ativos à solução reacional.

Outro aspecto relevante é a influência da granulometria. Conforme Owen e Ma (2021), a fragmentação eficiente dos resíduos de painéis solares aumenta a eficiência da lixiviação química, pois evita a retenção de polímeros e barreiras difusivas. Neste estudo, essa tendência foi confirmada, com a malha 65 apresentando melhor desempenho quando comparada às frações muito finas (malha 170 e fundo), que possivelmente sofreram aglomeração ou passivação superficial durante o ensaio.

Esses achados reforçam a importância de um controle adequado da preparação física dos resíduos antes da etapa química, aspecto ainda pouco abordado em artigos nacionais. A otimização das etapas de moagem, separação e peneiramento pode ser, portanto, um diferencial estratégico para escalar processos de geração de hidrogênio a partir de resíduos fotovoltaicos no contexto brasileiro.

IV. CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou a viabilidade técnica da produção de hidrogênio por meio do reaproveitamento de resíduos de módulos fotovoltaicos pós-consumo tratados com solução alcalina de hidróxido de sódio. A abordagem proposta contemplou a separação física dos componentes do painel, a preparação granulométrica do material base e a aplicação de reações químicas controladas, permitindo avaliar de forma sistemática a influência de variáveis operacionais sobre a eficiência do processo.

Os resultados experimentais revelaram que a granulometria do material reciclado desempenha papel decisivo na taxa e no volume de produção de hidrogênio. A fração intermediária (malha 65) foi a que apresentou melhor desempenho, com destaque para o experimento que combinou moagem adicional e remoção de vidro, alcançando um volume de até 425 mL/g de H₂, valor superior aos observados para granulometrias muito grossas ou extremamente finas. Tal desempenho pode ser atribuído à maior área superficial específica e à redução de barreiras físicas que limitariam o contato entre os reagentes. A eliminação do vidro, em particular, mostrou-se fundamental para evitar passivação e garantir acesso direto da solução alcalina aos elementos reativos como silício e alumínio.

Com base nos achados, conclui-se que há um potencial significativo para o uso de resíduos fotovoltaicos como fonte de hidrogênio, contribuindo para soluções sustentáveis de reaproveitamento de materiais eletrônicos e energéticos. Para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação do gás hidrogênio em células à combustão, aprimorando o uso

e disponibilidade do vetor energético de alta densidade que o hidrogênio fornece. Essas estratégias poderão consolidar a viabilidade do método em escala piloto e, futuramente, em aplicações industriais.

V. REFERÊNCIAS

GANTI , PK; NAIK, H.; BARADA, MK **Análise de impacto ambiental e aprimoramento de fatores que afetam a utilização de energia fotovoltaica (PV) na indústria de mineração por meio da otimização de busca de pardais com base na abordagem de árvore de decisão de aumento de gradiente.** Departamento de Engenharia de Mineração, Instituto Nacional de Tecnologia Rourkela, Rourkela, Sundargarh , Odisha, Índia, 2022.

GAURAV S. VIKAS C. PARVEEN K. PREETIKA S. ANMOL S. **Recuperação de nanopartículas de sílica de módulos fotovoltaicos .** UIET, Universidade Panjab, Chandigarh 160014, Índia. Laboratório de Bionanotecnologia (Divisão:H-1), CSIR-CSIO, Chandigarh 160030, Índia. 2021.

IRENA. **End-of-life management: Solar photovoltaic panels.** International Renewable Energy Agency, 2016.

FARAGGI, Rafael; et al. **Emerging trends in circular economy approaches to photovoltaic panel recycling.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 180, 2023.

HU, Yu; YAN, Hongjian; LIU, Kewei; CAO, Hongmei; LI, Wei. **Hydrogen production from silicon-based PV module waste in alkaline medium.** *Journal of Cleaner Production*, 2022.

LIU, X.; WANG, D.; XU, L. et al. **Carbon-coated Al particles for enhanced hydrogen production in NaOH solution.** *Journal of Power Sources*, v. 239, p. 224–231, 2013.

OWEN, Wang; MA, Xiaotu. **Inovando a reciclagem de painéis solares à base de silício com um processo de lixiviação alcalina ecologicamente correto.** *Green Chemistry Letters and Reviews*, 2021.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná (PGMEC-UFPR) pelo apoio institucional ao desenvolvimento da pesquisa. Agradecem também ao Laboratório de Eletroquímica Aplicada (GEA/UFPR) pela infraestrutura experimental disponibilizada, bem como aos pesquisadores e colaboradores envolvidos diretamente no projeto, cuja contribuição foi essencial para a execução dos experimentos e análise dos resultados.

VII. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído no artigo.