

GIOVANA CRISTINA DOS SANTOS MUCHATI

SÍNTESE DE ZEÓLITAS USANDO VIDRO RECUPERADO DE PAINÉIS SOLARES E
SUA APLICAÇÃO COMO ADITIVO EM NOVOS PAINÉIS

Rosana

2026

GIOVANA CRISTINA DOS SANTOS MUCHATI

SÍNTESE DE ZEÓLITAS USANDO VIDRO RECUPERADO DE PAINÉIS SOLARES E
SUA APLICAÇÃO COMO ADITIVO EM NOVOS PAINÉIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Faculdade de Engenharia e Ciências - Câmpus de Rosana, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr./Me. Iago William Zapelini.

Rosana

2026

GIOVANA CRISTINA DOS SANTOS MUCHATI

SÍNTESE DE ZEÓLITAS USANDO VIDRO RECUPERADO DE PAINÉIS SOLARES E
SUA APLICAÇÃO COMO ADITIVO EM NOVOS PAINÉIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia de Energia da
Faculdade de Engenharia e Ciências - Câmpus
de Rosana, Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos
requisitos para obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia de Energia.

Rosana, ____/____/____.

Componentes da Banca Examinadora:

Presidente e Orientador: Prof. Dr. Iago William Zapelini, FEC Unesp Rosana

Membro Titular: Prof. Dr. Leonardo Lataro Paim, FEC Unesp Rosana

Membro Titular: Dra. Laura Lorena da Silva, DEQ UFSCar

Dedico este trabalho à minha família, aos meus amigos e a Deus, que estiveram presentes em cada etapa desta caminhada, oferecendo apoio, força e motivação para que este sonho se tornasse realidade.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais por sempre me incentivarem nos estudos e por nunca me deixarem desistir do sonho de ingressar em uma universidade pública. Agradeço também à FAPESP pelo apoio e pela concessão da bolsa (processo nº 2024/22150-9), que foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha irmã, deixo um agradecimento especial por sempre estar ao meu lado, me encorajando e auxiliando em todos os momentos, desde antes da minha aprovação na universidade. Sei que minha decisão de me mudar e ficar a tantas horas de distância da nossa família não foi fácil para você, e sou profundamente grata por todo o amor, compreensão e cuidado que recebi durante essa jornada.

Agradeço também a todos os amigos que fizeram parte desses quatro anos e que tornaram a experiência de morar longe de casa mais leve, feliz e inesquecível. Em especial, agradeço à Sabrina, que me acolheu com tanto carinho e me apresentou aquele que se tornou meu lar durante a graduação: a República Americana. Ao seu lado, vivi alguns dos melhores momentos dessa fase da minha vida. Estendo esse agradecimento a todas as meninas que compartilharam essa trajetória conosco, contribuindo para que a república se tornasse uma verdadeira família.

Agradeço também ao Victor, pelos conselhos, pela paciência e pelas palavras de incentivo durante a elaboração deste trabalho. Sua presença e suas contribuições foram muito importantes ao longo desse processo.

Aos meus amigos de turma, Isadora, Gustavo, Gabrielli e Muriel, agradeço a parceria, companheirismo e amizade ao longo da graduação. Compartilhamos desafios, provas, trabalhos, conquistas e momentos que certamente levarei para a vida toda.

Agradeço também aos colaboradores da UNESP, Bruno e Marco, que me orientaram e estiveram sempre dispostos a ajudar desde o meu primeiro dia na universidade. A dedicação e a disponibilidade de vocês foram essenciais ao longo dessa caminhada.

Ao meu orientador, expresso minha sincera gratidão por acreditar em mim e no potencial deste trabalho desde a nossa primeira conversa. Obrigada pela orientação, confiança, ensinamentos e motivação durante todo o desenvolvimento deste projeto.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para minha formação acadêmica, profissional e pessoal. Cada conselho, ensinamento e gesto de carinho foi fundamental para que este momento se tornasse possível.

RESUMO

Com a disseminação e a consolidação da energia solar fotovoltaica, grandes quantidades de painéis solares começam a ser fabricados e substituídos devido à queda de desempenho, falhas ou defeitos de fabricação. Em razão disso, é gerado um resíduo ambiental que, assim como a tecnologia de geração solar, cresce significativamente nos últimos anos. Cerca de 70% da composição desses painéis é um vidro de altíssima qualidade, o qual pode ser quimicamente reciclado para gerar materiais à base de silício com alto valor agregado. Devido à sua alta capacidade de adsorção de água, esses materiais podem ser aplicados como uma camada aditiva em novos módulos fotovoltaicos, visando promover o resfriamento evaporativo do sistema e, consequentemente, o aumento da eficiência elétrica do painel. Nesse contexto, a presente pesquisa teve como objetivo recuperar quimicamente o silício contido em painéis inutilizados, sintetizando zeólitas a partir desse recuperado, tornando -se possível estabelecer uma rota de economia circular para o material reaproveitado. A composição do vidro utilizado apresentou predominância de silício (61,4%), Ca (22,3%), Na (11,2%) e Al (2,7%), elementos considerados no processo de síntese. A partir do material recuperado, foi possível obter a zeólita do tipo LTA com elevado grau de cristalinidade, confirmando através de experimentos, como a difração de raios X, a ausência de fase amorfa residual com apenas uma leve contaminação da zeólita faujasita. Além disso, a microscopia eletrônica de varredura mostrou a formação de cristais com morfologia cúbica típica da estrutura, enquanto a razão Si/Al média obtida por EDS foi de 1,1 evidenciando a estrutura altamente aluminosa e compatível com o resultado previsto. Logo após a síntese, a zeólita apresentou volume de microporos de $0,20 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ e capacidade de adsorção de água de 29,1%, com parte da água dessorvida a baixa temperatura, 9,2% a 74,8 °C, responsável pelo potencial de resfriamento evaporativo do material. Assim como, os testes em módulos fotovoltaicos foram possíveis demonstrar um aumento de aproximadamente de 2,5% na energia gerada ao longo de 30 minutos como consequência da redução de até 5% das perdas de potência. Dessa forma, os resultados demonstraram a viabilidade da síntese de zeólita LTA a partir do vidro reciclado de painéis solares, conferindo-lhe uma nova aplicabilidade, reduzindo suas perdas e aumentando a eficiência de novos painéis.

Palavras-chave: Zeólitas. Reciclagem de silício. Economia circular. Energia fotovoltaica. Painéis solares.

ABSTRACT

With the widespread adoption and consolidation of solar photovoltaic energy, large quantities of solar panels are being manufactured and replaced due to performance degradation, failures, or manufacturing defects. Consequently, an environmental waste is generated which, much like the solar generation technology itself, has grown significantly in recent years. About 70% of these panels' composition consists of high-quality glass, which can be chemically recycled to produce high-value-added silicon-based materials. Due to their high water adsorption capacity, these materials can be applied as an additive layer in new photovoltaic modules to promote evaporative cooling of the system and, consequently, increase the panel's electrical efficiency. In this context, the present research aimed to chemically recover silicon from discarded panels, synthesizing zeolites from this recovered material, thus establishing a circular economy route for the reused material. The composition of the glass used showed a predominance of silicon (61.4%), Ca (22.3%), Na (11.2%), and Al (2.7%), elements considered in the synthesis process. From the recovered material, it was possible to obtain LTA-type zeolite with a high degree of crystallinity, confirming through experiments, such as X-ray diffraction, the lack of residual amorphous phase with only a slight contamination of the faujasite zeolite. Furthermore, scanning electron microscopy showed the formation of crystals with a cubic morphology typical of the structure, while the average Si/Al ratio obtained by EDS was 1.1, evidencing the highly aluminous structure and compatible with the predicted result. Immediately after synthesis, the zeolite exhibited a micropore volume of $0.20 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ and a water adsorption capacity of 29.1%, with some of the water desorbed at low temperatures (9.2% at 74.8°C), responsible for the material's evaporative cooling potential. Similarly, tests on photovoltaic modules demonstrated an increase of approximately 2.5% in energy generated over 30 minutes as a consequence of a reduction of up to 5% in power losses. Thus, the results demonstrated the viability of synthesizing LTA zeolite from recycled solar panel glass, giving it a new application, reducing losses and increasing the efficiency of new panels.

Keywords: Zeolites. Silicon recycling. Circular economy. Photovoltaic energy. Solar panels.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estimativa da geração de painéis solares fotovoltaicos descartados até 2050.....	16
Figura 2 – Resumo gráfico da proposta apresentada.....	16
Figura 3 – Resumo gráfico da proposta apresentada.....	18
Figura 4 – Esquema da neutralização de cargas na rede zeolítica.....	19
Figura 5 – Diagrama esquemático da estrutura LTA.....	20
Figura 6 – (a) Vidro tal como recuperado do painel solar; (b) vidro moído; (c) silicato de sódio obtido a partir da fusão alcalina do vidro moído.....	25
Figura 7 – (a) Esquema do experimento realizado para o teste de desempenho do módulo fotovoltaico construído com a zeólita preparada; (b) minicélula fotovoltaica usada na confecção do módulo miniatura.....	27
Figura 8 – Difratoograma de raios-X da zeólita LTA obtida a partir do vidro de painel solar, WGZ (a) e do vidro moído (b).....	28
Figura 9 – Difratoograma de raios-X da zeólita LTA obtida a partir do vidro de painel solar.....	29
Figura 10 – Pontos selecionados para coleta de espectro EDS da amostra WGZ (esquerda) e espectro característico obtido para essa amostra (direita).....	30
Figura 11 – Isoterma de adsorção de CO ₂ obtida a 0 °C sobre a amostra WGZ sintetizada.....	31
Figura 12 – (a) Termograma da amostra WGZ obtido em atmosfera de ar sintético e derivada da curva TG com relação à temperatura (b).....	32
Figura 13 – Testes de desempenho em escala de bancada dos módulos solares confeccionados com e sem zeólita como camada refrigerante.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físico-químicas da zeólita preparada (WGZ).....	30
Tabela 2 – Parâmetros de desempenho do módulo fotovoltaico construído com e sem camada evaporativa de zeólita.....	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAN — Cancrinita

CO₂ — Dióxido de Carbono

DRX — Difração de Raios X

EDS — Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Energia

FAU — Faujasita

FEC — Faculdade de Engenharia e Ciências

FRX — Fluorescência de Raios X

GIS — Zeólita P

H₂O — Água

IQ-UNESP — Instituto de Química da Universidade Estadual Paulista

JCPDS-ICDD — Joint Committee on Powder Diffraction Standards – International
Centre for Diffraction Data

LCE — Laboratório de Caracterização Estrutural

LTA —Linde Type A

MEV — Microscopia Eletrônica de Varredura

Na-LTA — Zeólita A na forma sódica

OSDA — Organic Structural Directing Agent

PVT — Photovoltaic-Thermal

SOD —Sodalita

TG — Termogravimetria

UNESP — Universidade Estadual Paulista

WGZ — Waste Glass Zeolite

XRD — X-Ray Diffraction

LISTA DE SÍMBOLOS

Elemento opcional. Elaborada de acordo com a ordem apresentada no texto, com o devido significado.

°C — Graus Celsius

λ — Comprimento de onda da radiação Cu K α

θ — Ângulo de difração

2θ — Ângulo de difração em dobro

% — Porcentagem

% Água — Percentual de água adsorvida

cm² — Centímetro quadrado

cm³.g⁻¹ — Volume de microporos por unidade de massa

g — Grama

h — Hora

kV — Quilovolt

mL.min⁻¹ — Mililitro por minuto

min — Minuto

mW — Miliwatt

mW.cm⁻² — Miliwatt por centímetro quadrado

mWh — Miliwatt-hora

nm — Nanômetro

P(t) — Potência gerada pelo módulo em função do tempo

P_{ini} — Potência inicial do módulo fotovoltaico

P/P_{ini}|_{min} — Menor razão entre a potência instantânea e a potência inicial

T_{des} — Temperatura característica de dessorção da água

t — Tempo

V_{micro} — Volume de microporos

κ_{deact} — Constante de desativação do módulo fotovoltaico

α — Alfa

Cu K α — Radiação característica do cobre

Al₂O₃ — Óxido de alumínio

CaCl₂ — Cloreto de cálcio

CO₂ — Dióxido de carbono

H₂O — Água

NaOH — Hidróxido de sódio

N₂ — Nitrogênio molecular

Na⁺ — Cátion sódio

Ca²⁺ — Cátion cálcio

Si — Silício

Al — Alumínio

Na — Sódio

Ca — Cálcio

Si/Al — Razão silício/alumínio

Na/Al — Razão sódio/alumínio

Ca/Al — Razão cálcio/alumínio

E30 min — Energia gerada após 30 minutos de operação 1 sol — Intensidade de radiação equivalente à irradiância solar padrão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS GERAIS	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS TÉRMICOS.....	17
2.2 ECONOMIA CIRCULAR NO REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS FOTOVOLTAICOS.....	19
2.3 HIDROFILICIDADE EM ZEÓLITAS E A ESTRUTURA LTA	20
3. MATERIAIS, MÉTODOS E FORMA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS	22
3.1 EXTRAÇÃO DO SILICATO DE SÓDIO A PARTIR DO VIDRO RESIDUAL.....	22
3.2 SÍNTESE DA ZEÓLITA UTILIZANDO O EXTRATO SILÍCICO	23
3.3 CARACTERIZAÇÃO DA ZEÓLITA PREPARADA.....	24
3.4 EXPERIMENTOS DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DE NOVO MÓDULO SOLAR EM ESCALA DE BANCADA.....	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1 CARACTERÍSTICAS DA ZEÓLITA SINTETIZADA A PARTIR DO VIDRO	27
4.2 CAPACIDADE DE ADSORÇÃO E DESSORÇÃO DE ÁGUA	30
4.3 DESEMPENHO DO RESFRIAMENTO EVAPORATIVO NO MÓDULO SOLAR....	31
5. CONCLUSÃO.....	33
6. REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia solar fotovoltaica é um exemplo clássico e eficiente de produção limpa de energia. Esse método de conversão energética baseia-se no efeito fotovoltaico gerado pela interação da radiação solar com um semicondutor silício dopado e confeccionado na forma de uma junção p-n chamada de célula solar, a qual é exposta a grande irradiância de maneira a se obter a maior quantidade de energia elétrica possível (Rachid et al., 2023).

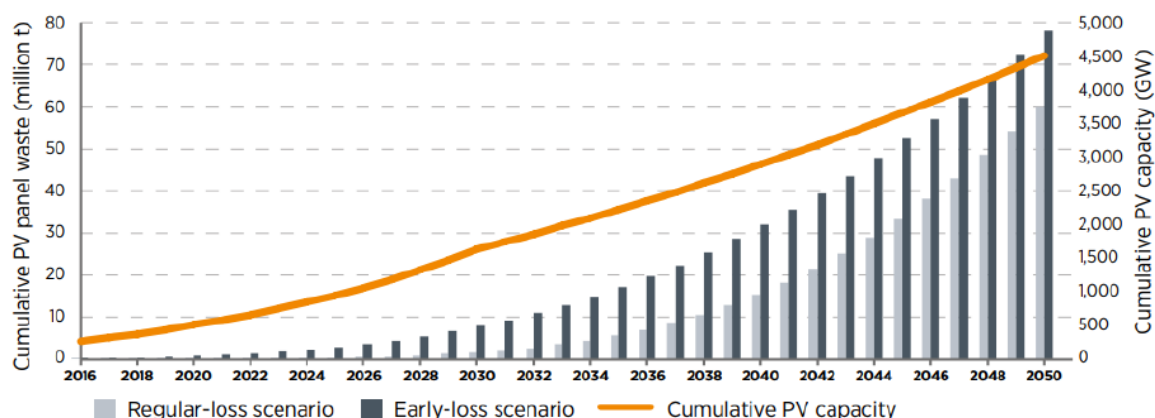
Esses módulos semicondutores são normalmente protegidos por uma camada de vidro de altíssima qualidade, a qual tem a finalidade de evitar intempéries que podem ser causadas pela exposição dos painéis ao vento, humidade, material particulado etc., sendo também a propriedade antirreflexiva um requisito operacional. Essa camada vítrea corresponde a cerca de 70% da composição total de um painel solar fotovoltaico (De Sousa et al., 2023).

Devido à grande disseminação e consolidação da energia solar fotovoltaica, o número de painéis solares instalados em plantas industriais e residências vem aumentando expressivamente nos últimos anos, conforme evidenciado pela rápida evolução da capacidade de geração solar fotovoltaica instalada (Figura 1). Apesar do grande benefício ambiental em termos do processo de geração energética, deve-se considerar que, após um determinado período, os sistemas fotovoltaicos perdem sua eficiência ou mesmo são passíveis de falha mecânica devido à impacto, abrasão etc., que pode ocorrer nos processos produtivos, de transporte ou instalação dos módulos.

Nesse contexto, um grande número de painéis inutilizáveis para geração de energia está sendo gerado e seu número tende a crescer, sendo esse resíduo um problema ambiental que merece atenção (Preet; Smith, 2024). De fato, o Brasil lidera o *ranking* latino-americano na geração de resíduo de painéis fotovoltaicos, sendo a estimativa para o ano de 2050 de 0,75 milhões de toneladas de resíduo devido à perda precoce dos módulos fotovoltaicos (Gonçalves, 2023), conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Estimativa da geração de painéis solares fotovoltaicos descartados até 2050.

<https://www.portalsolar.com.br/noticias/operacao-e-expansao/oem/energia-solar-supera-35-gw-de-capacidade-instalada-no-brasil>



Fonte: International Energy Agency.

A reciclagem dos painéis fotovoltaicos é uma estratégia para sua reutilização e redução do impacto ambiental causado pelo depósito de materiais advindos desses equipamentos. Por exemplo, o uso do vidro protetor dos painéis pode ser utilizado para se preparar materiais com maior valor agregado, que poderiam ser inclusive utilizados na confecção de novos painéis, conforme será explorado neste trabalho, resultando na economia circular do insumo.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo deste projeto é promover uma rota circular do uso do silício utilizado nos vidros de painéis solares, através do reaproveitamento de vidros de descarte de painéis usados para a síntese de materiais que funcionem como aditivos e melhoradores do desempenho de novas células. Para isso, são alguns objetivos específicos deste projeto:

- Obter um extrato silícico a partir de vidro descartado de painéis fotovoltaicos usados;
- Utilizar o extrato obtido para preparar zeólitas com estrutura LTA;
- Utilizar a zeólita obtida do vidro reciclado para confeccionar células solares novas com desempenho aumentado devido ao resfriamento evaporativo provocado pela camada aditiva de zeólita úmida.

Um resumo gráfico desta proposta é então apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Resumo gráfico da proposta apresentada.



Fonte: Autor.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS TÉRMICOS

Durante a irradiação de uma célula fotovoltaica com energia solar, a maior parte da radiação não é convertida em energia elétrica, sendo convertida em carga de calor sobre o módulo, aumentando a resistência elétrica do sistema, diminuindo sua eficiência (Diwania et al., 2020). Nesse sentido, o resfriamento do módulo é requisito para manutenção do seu desempenho; essa estratégia é chamada de regulação térmica de painéis fotovoltaicos (*Photovoltaic-thermal*, PVT) (Tiwari et al., 2023). Trata-se de um método híbrido de conversão energética em que a conversão fotovoltaica e heliotérmica operam de maneira combinada, sendo esta última usada para aumento da eficiência do módulo que pode chegar em até 15% devido a redução da temperatura. Relatos da literatura indicam que um aumento de 1 °C na

temperatura do módulo fotovoltaico pode reduzir em até 0,5% sua capacidade de produção de energia (Tiwari et al., 2023).

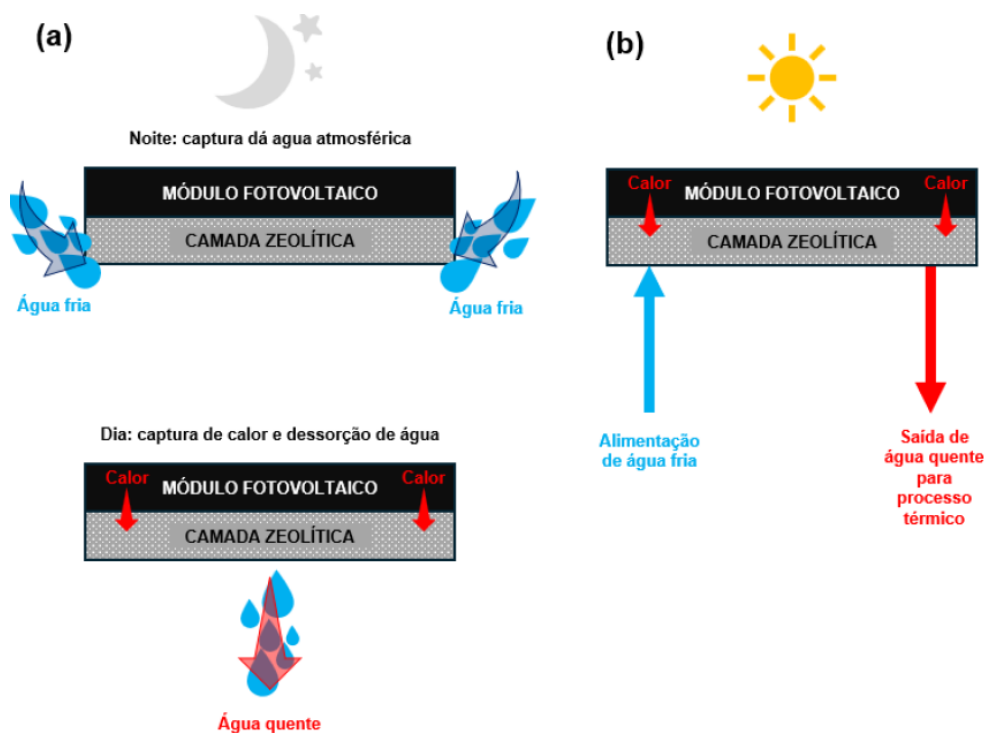
Um sistema PVT consiste em resfriar os módulos fotovoltaicos por uma ação externa. A maneira mais intuitiva é através da refrigeração por convecção forçada de ar (vento) (Mittelman et al., 2009). Entretanto, neste caso, o calor removido pelo fluido refrigerante não é aproveitado. Uma forma mais engenhosa de se realizar a construção de um sistema PVT é pela integração de materiais que tenham capacidade de armazenamento térmico de energia, dentre os quais se destaca a água (Abdallah et al., 2019). Se um fluxo de água fria for inserido na parte inferior do módulo fotovoltaico, pode-se recolher o calor excessivo do painel pela troca térmica com a água, resultando no resfriamento necessário para a manutenção do seu desempenho (Kandilli, 2019).

Mais recentemente, esse método foi aprimorado com base no uso de um sistema utilizado em regulação térmica de ambientes: o resfriamento evaporativo usando zeólitas (Abdallah et al., 2019), que possui a vantagem de se utilizar um material altamente hidrofílico para capturar a água, e em seguida realizar a dessorção da água pela interação com a radiação térmica solar, promovendo uma regulação do resfriamento por meio da interação do par fluido-sólido.

Uma ilustração é dada na Figura 3^a. a zeólita, um material altamente hidrofílico pode capturar a água do ar atmosférico durante a noite; neste processo, seus microporos serão preenchidos com umidade do ar. Essa água confinada no sistema poroso será removida por evaporação provocada pelo calor proveniente da radiação solar durante o dia, a água será removida do painel fotovoltaico por condução, promovendo seu resfriamento. Note que neste caso um produto valioso é gerado no processo: água quente.

Neste contexto, pode-se incorporar um sistema de fluxo de água externo à camada refrigerante contendo zeólita, alimentando-a com água fria de um processo externo, a qual é inserida nos microporos da zeólita devido à alta hidrofilicidade dos mesmos, e seguidamente dessorvida devido ao calor proveniente da camada superior aquecida (Figura 3b), saindo como água quente que pode ser utilizada para fins de aquecimento no processo externo. Neste caso, além do aumento da eficiência da etapa fotovoltaica de conversão da energia solar, realiza-se concomitantemente a sua conversão em energia térmica útil por meio da água quente, implicando numa eficiência ainda maior do processo de utilização da energia solar (Tiwari et al., 2023; Abdallah et al., 2019).

Figura 3 - Resumo gráfico da proposta apresentada II.



Fonte: Autor.

2.2 ECONOMIA CIRCULAR NO REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS FOTOVOLTAICOS

Desde a Revolução Industrial, o modelo econômico dominante baseou-se no fluxo linear de extração, processamento e transformação de matéria-prima em bens, seguido pelo consumo e descarte desses materiais (Berardi; dias, 2018). Esse modelo intensificou o uso de recursos naturais e contribuiu significativamente para o aumento da geração de resíduos e dos impactos ambientais relacionados às atividades industriais e tecnológicas.

Sob esse viés, surge a economia circular como uma alternativa ao modelo linear tradicional, tendo como objetivo otimização dos materiais, ampliando a vida útil dos produtos e ativos durante e após o seu uso, reduzindo o uso de insumos e recursos não renováveis e optando pela utilização de recursos renováveis. Além disso, esse modelo propõe a maior circulação de resíduos e subprodutos através da reutilização, seja na mesma cadeia produtiva ou para o reaproveitamento em outras indústrias (Luz, 2017).

Nesse cenário, temos os módulos fotovoltaicos com uma capacidade instalada que ultrapassa a faixa dos 35 GW no território brasileiro onde 24 GW representa a capacidade

instalada de geração distribuída, sendo liderada pela classe de consumo residencial, representando 11,8 GW, em sequência as classes comercial, rural e industrial, com 6,9 GW, 3,5 GW e 1,7 GW, respectivamente (Casarin, 2023). Diante desta crescente geração, o descarte dos módulos fotovoltaicos acaba não sendo proporcional a sua instalação, onde as políticas públicas referentes ao seu descarte são prematuras. Nessa perspectiva, é importante mencionar que o descarte indevido dos módulos fotovoltaicos pode levar a contaminação do solo e dos lençóis freáticos, como também a morte da fauna e flora por toxicidade, visto que são os metais causadores do maior impacto ambiental (Silva; Varella, 2025).

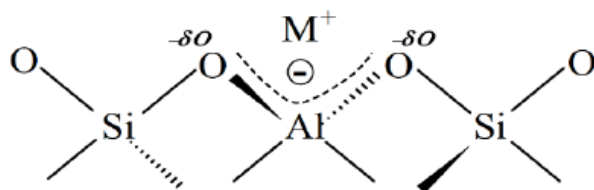
Diante do exposto, a reciclagem de módulos fotovoltaicos surge como uma alternativa sustentável baseada nos princípios da economia circular. Nesse contexto, o reaproveitamento do vidro presente nos painéis solares para a síntese de zeólitas representa uma estratégia promissora de valorização de resíduos, permitindo a obtenção de um material de alto valor agregado com potencial aplicação em novos módulos fotovoltaicos, contribuindo simultaneamente para a redução de impactos ambientais e para o aumento da eficiência energética do sistema.

2.3 HIDROFILICIDADE EM ZEÓLITAS E A ESTRUTURA LTA

Zeólitas são aluminossilicatos microporosos de estrutura cristalina constituídos de tetraedros de silício (SiO_4) e alumínio (AlO_4) ligados por um oxigênio em comum. Sendo o alumínio um elemento trivalente, ao incorporá-lo na estrutura em coordenação tetraédrica, forma-se um ânion aluminato (Figura 4) cuja carga é neutralizada por cátions de compensação (M^+). Usualmente, zeólitas são preparadas em sua forma sódica ($\text{M}^+ = \text{Na}^+$).

Dada essa característica de composição, as zeólitas são materiais altamente hidrofílicos, uma vez que as moléculas de água, polares, podem interagir fortemente com os centros de carga gerados ao redor dos alumínio da rede. Como resultado, estruturas com menor razão Si/Al , isto é, com maior quantidade de alumínio na rede, terão maior afinidade por água.

Figura 4 - Esquema da neutralização de cargas na rede zeolítica.

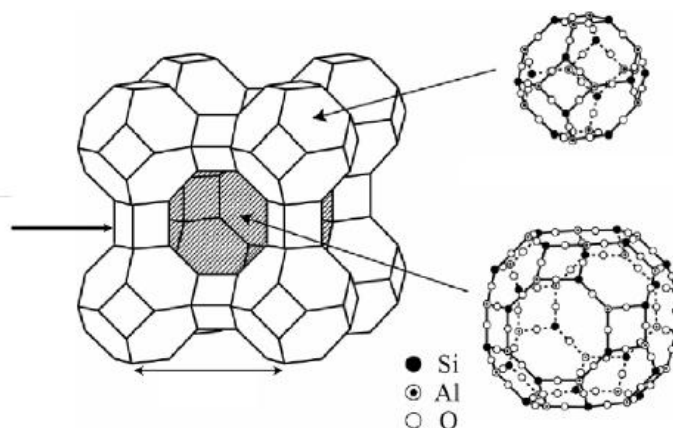


Fonte: Martins e Cardoso (2006, p. 360).

Devido à flexibilidade das ligações T-O-T, a interconexão dessas unidades gera uma rede polimérica contendo poros na dimensão de microporos (menores que 2 nm) que podem assumir diferentes configurações, conferindo elevada área superficial e a capacidade de peneiramento molecular às zeólitas (Teresa; Gutiérrez, 2004). Essas estruturas possuem poros compatíveis com muitas moléculas processadas pela indústria, capacidade de troca iônica dos cátions de compensação, de adsorção e alta estabilidade térmica (Teresa; Gutiérrez, 2004). A zeólitas do grupo de estrutura LTA (Linde Type A), também chamadas de zeólita A, possuem normalmente razão Si/Al igual a 1 (a menor possível de acordo com a regra de Lowestein). Usualmente sua síntese produz zeólitas na forma sódica, porém outras formas podem ser produzidas por troca catiônica (Breck, 1975).

Sua estrutura cristalina pode ser descrita pela junção de dois poliedros: um de arranjo cúbico simples formado pela junção de dois anéis de 4 membros (4MR, sendo 4 tetraedros TO4) e outro composto por um octaedro composto de 24 membros TO4 chamado de cavidade sodalita, conforme ilustrado na Figura 5. A união das cavidades sodalitas pelas faces quadradas através dos anéis duplos de quatro membros gera uma cavidade α , com diâmetro interno igual a 1,23 nm, cujo acesso é limitado por 8 átomos de oxigênio, resultando em uma abertura livre de 0,4 nm (quando na forma sódica).

Figura 5 - Diagrama esquemático da estrutura LTA. Adaptada.



Fonte: Adaptado de Nakano e Nozue (2007).

A abertura efetiva do microporo da zeólita A é definida de acordo com o cátion de compensação, sendo a zeólita 3A a forma potássica (diâmetro do poro de aproximadamente 0,3 nm), a zeólita 4A a forma sódica (diâmetro do poro de aproximadamente 0,4 nm) e a zeólita 5A a forma cálcica (diâmetro do poro de aproximadamente 0,5 nm) (Breck, 1975). Por possuir uma alta fração de alumínio de rede, a concentração de cátions na estrutura da zeólita A é elevada, tornando essa zeólita bastante hidrofílica. Devido a essa característica uma das principais aplicações da zeólita A é a secagem de gases (Shirazian; Ashrafizadeh, 2015), sendo a propriedade altamente hidrofílica fundamental na aplicação desta proposta.

Deve-se destacar que essa zeólita pode ser preparada sem o uso de direcionadores orgânicos de estrutura (*organic structural directing agent, OSDA*), o que permite sua seleção como candidata em aplicações envolvendo reciclagem e economia circular. Esse tipo de material já foi preparado com o uso de diversos resíduos, incluindo o resíduo de painéis fotovoltaicos (Lin; Lee; Lin, 2022). Apesar disso, a proposta difere-se na obtenção dessa zeólita com resíduo de painéis solares e sua reaplicação como aditivos na confecção de novos painéis.

3. MATERIAIS, MÉTODOS E FORMA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

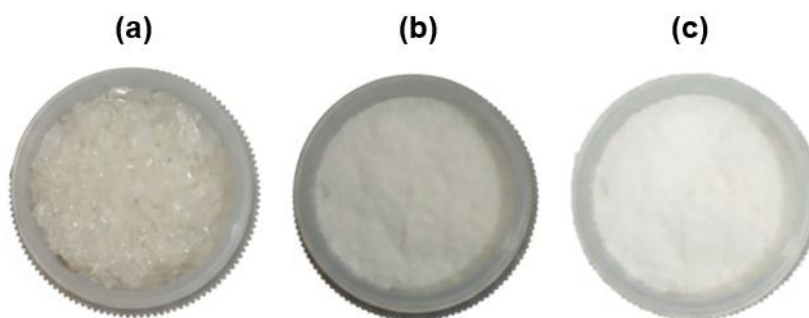
3.1 EXTRAÇÃO DO SILICATO DE SÓDIO A PARTIR DO VIDRO RESIDUAL

Um painel fotovoltaico inutilizado foi utilizado para obtenção do vidro de recobrimento. Esse vidro foi moído para se reduzir o tamanho de partículas e aumentar a eficiência da etapa de extração química do silício. A extração realizada partiu com base no método descrito por

Lin e colaboradores (2022), que consiste na dissolução do vidro em meio alcalino utilizando hidróxido de sódio.

A fusão alcalina foi utilizada para converter o vidro recuperado de painéis solares (Figura 6a) em silicato de sódio. Para esse fim, 10 g de vidro finamente moído (Figura 6b) foram colocados em um cadinho de porcelana juntamente com 12,5 g de pastilhas de hidróxido de sódio (Sigma-Aldrich, 98% em massa). A mistura foi aquecida em um forno mufla até 650 °C e mantida nessa temperatura por 1 h. Ao final, obteve-se um sólido branco, que foi moído em almofariz (Figura 6c) e armazenado até sua utilização na síntese da zeólita.

Figura 6 - (a) Vidro tal como recuperado do painel solar; (b) vidro moído; (c) silicato de sódio obtido a partir da fusão alcalina do vidro moído.

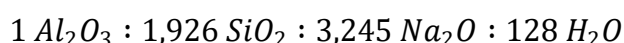


Fonte: Autor.

A composição final do silicato, em termos das quantidades de Si, Al e Na, foi estimada com base na conservação de massa desses elementos, por meio de um balanço de massa entre a quantidade de vidro adicionada, cuja composição havia sido previamente determinada por fluorescência de raios X (FRX), e a quantidade de NaOH adicionada.

3.2 SÍNTESE DA ZEÓLITA UTILIZANDO O EXTRATO SILÍCICO

A síntese da zeólita LTA foi realizada seguindo a metodologia proposta por Y.-W. Lin, W.-H. Lee e K.-L. Lin (2025), cuja composição molar da mistura reacional foi igual a:



Para isso, 0,42 g do pó de silicato de sódio do resíduo moído foram dissolvidos em 13,65 g de água deionizada em um béquer de polipropileno por 1 h, sob agitação à temperatura ambiente. Em um segundo béquer, 2,28 g de aluminato de sódio (Sigma Aldrich, 50–56% em massa de Al_2O_3) também foram dissolvidos em 13,65 g de água deionizada sob as mesmas

condições. Após a completa dissolução dos precursores de silício e alumínio, a solução de aluminato foi adicionada gota a gota à solução de silicato. A mistura resultante foi então mantida sob agitação por mais 30 minutos antes de ser transferida para uma autoclave de aço inoxidável revestida com Teflon.

A cristalização hidrotérmica estática foi conduzida sob pressão autógena em estufa a 100 °C por 48 h (Lee; Lin; Lin, 2023). O sólido obtido foi recuperado por centrifugação e lavado sucessivamente com água deionizada até que o sobrenadante atingisse pH 8. Em seguida, o sólido foi seco a 100 °C por 12h. O produto final foi denominado WGZ (*waste glass zeolite*).

3.3 CARACTERIZAÇÃO DA ZEÓLITA PREPARADA

A difratometria de raios-X foi primordial para confirmar o sucesso das sínteses através da comparação com os difratogramas disponíveis em bancos de dados (JCPDS-ICDD), essencialmente para se identificar a evolução de possíveis contaminantes ou fases cristalinas concorrentes, além da presença de material não cristalizado remanescente no sólido.

Os sólidos foram caracterizados por difração de raios X (DRX), realizada em um difratômetro Rigaku Miniflex 600 com filtro de Ni, utilizando radiação Cu K α ($\lambda = 0,1542$ nm), velocidade do goniômetro de 10°.min⁻¹ e varredura no intervalo de ângulo 2 θ de 5° a 50°. A análise dos difratogramas também visou identificar a possível contaminação do sólido com outras estruturas cúbicas, essencialmente a zeólita de topologia SOD (Lee; Lin; Lin, 2023), de modo a garantir que o material preparado obtivesse a maior pureza possível da fase LTA.

A propriedade porosa da zeólita preparada é também um parâmetro de sua qualidade e que influi diretamente na sua capacidade de capturar água. Neste caso, tratando-se da estrutura LTA, a técnica clássica de análise textural é a fisissorção de CO₂, uma vez que, devido à presença de cátions sódio na boca dos poros, não é possível a difusão do N₂ para dentro das cavidades. As isotermas de fisissorção de CO₂ foram obtidas a 0 °C em um analisador ASAP 2020, sendo o volume de microporos calculado pelo método de Dubinin-Radushkevich (Ghezini; Sassi; Bengueddach, 2008). Antes da análise, a amostra foi desidratada sob vácuo a 350 °C durante 12 h.

A facilidade de dessorção de água foi avaliada em termos da temperatura do evento de saída da umidade, observada pela derivada das curvas de termogravimetria, o que já foi utilizado como parâmetro de desempenho em armazenadores térmicos baseados em zeólitas (Ristić al., 2018). O desempenho do material obtido do vidro reciclado foi comparado com a zeólita 4A comercial (Sigma-Aldrich).

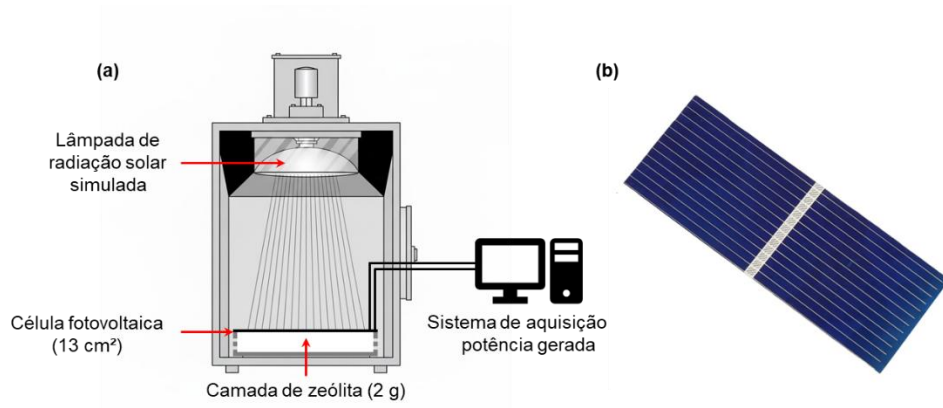
A curva de termogravimetria (TG) foi obtida em uma termobalança TA Instruments SDT-Q600, sob atmosfera oxidante (ar sintético) com vazão de 30 mL.min⁻¹, na faixa de temperatura de 30 °C a 850 °C, com rampa de aquecimento de 10 °C.min⁻¹. Antes da análise, a amostra foi umidificada em um recipiente contendo umidade relativa controlada pelo equilíbrio com uma solução saturada de cloreto de cálcio.

As imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos sólidos e as medidas de espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS) foram obtidas em um microscópio XL 30 FEG operando a 15 kV. Os pós foram diretamente depositados sobre uma fita de carbono e metalizados com ouro.

3.4 EXPERIMENTOS DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DE NOVO MÓDULO SOLAR EM ESCALA DE BANCADA

O efeito da adição de uma camada zeolítica refrigerante no desempenho de um módulo fotovoltaico foi avaliado em um simulador solar Oriel Sol3A, com lâmpada irradiando 100 mW. cm⁻² (1 sol). O simulador, esquematizado na Figura 7a é instalado dentro de uma sala com ambiente climatizado (26 ± 2 °C) e permanece em uma câmara escura durante o funcionamento. O módulo fotovoltaico em miniatura (13 cm²) foi confeccionado utilizando-se uma célula silícica (Figura 7b), suportando-a em uma moldura contendo vãos de respiro, sendo ela confeccionada em uma impressora 3D disponível no FABLAB (laboratório maker focado em inovação, prototipagem e fabricação digital aberto) na Unesp de Rosana preenchida por uma camada de zeólita de aproximadamente 2 g, em pó, a qual esteve em contato direto com a parte inferior da célula para a transferência de calor por condução (Figura 2a). Conectores foram soldados à célula para acoplamento ao sistema de aquisição que mediu a potência gerada pela célula durante a irradiação por 30 min.

Figura 7 - (a) Esquema do experimento realizado para o teste de desempenho do módulo fotovoltaico construído com a zeólita preparada. (b) Minicélula fotovoltaica usada na confecção do módulo miniatura.



Fonte: Autor.

A estabilidade da geração de potência em função do tempo de um módulo com e sem zeólita foi modelada usando uma função decaimento descrita pela Equação 1:

$$\frac{P(t)}{P_{ini}} = \frac{P}{P_{ini}} \Big|_{min} + \frac{(1 - \frac{P}{P_{ini}} \Big|_{min})}{1 + t^{-\kappa_{deact}}} \quad (1)$$

Onde $P(t)$ é a potência gerada pelo módulo, em mW, em função do tempo t , em min, P_{ini} é a potência medida no início do experimento ($t=0$), $\frac{P}{P_{ini}} \Big|_{min}$ é a menor razão $\frac{P(t)}{P_{ini}}$, estimada para um longo tempo de exposição ($t \rightarrow \infty$) e κ_{deact} é a constante de desativação do módulo, em termos da redução de potência em função da exposição à radiação solar.

A energia gerada após 30 min de operação, E_{30min} em mW.h, foi estimada pela integração da função $P(t)$ no tempo, como apresentado na Equação 2:

$$E_{30min} = P_{ini} \int_0^{30} \left(\frac{P}{P_{ini}} \Big|_{min} + \frac{(1 - \frac{P}{P_{ini}} \Big|_{min})}{1 + t^{-\kappa_{deact}}} \right) dt \quad (2)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

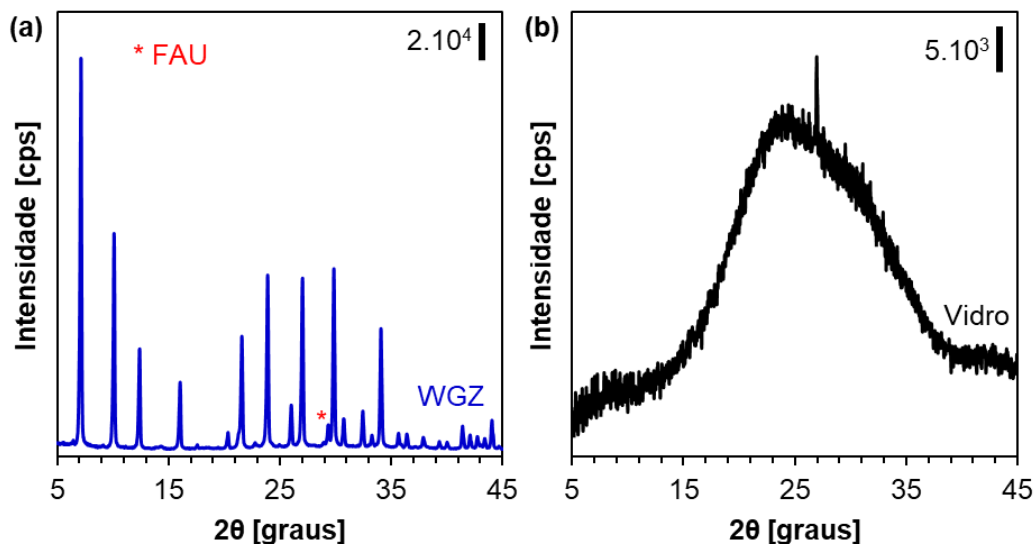
4.1 CARACTERÍSTICAS DA ZEÓLITA SINTETIZADA A PARTIR DO VIDRO

A composição mássica do vidro foi determinada por FRX. Conforme esperado, a maior parte do material é formada por átomos de silício (61,4%). Quantidades importantes de Ca (22,3%) e Na (11,2%) foram encontradas, o que deve ser tomado em conta ao se determinar o cátion de compensação da zeólita final. Como uma grande quantidade de NaOH foi adicionada para a fusão alcalina do vidro, estimou-se que a fração de cálcio na amostra final fosse menos importante, o que de fato se confirmou pelas análises de EDS, conforme discutido mais adiante. Além disso, 2,7% de Al foi encontrado no vidro, o que foi considerado no cálculo da composição da mistura reacional a ser preparada com o silicato obtido pela fusão alcalina do vidro.

O difratograma de raios-X da amostra WGZ é mostrado na Figura 8.a, onde todos os picos característicos da estrutura LTA estão presentes. Não se observa a presença de material amorfo residual, uma vez que a linha de base é plana na região entre 20 e 30° 2 θ , onde tipicamente se forma um sinal alargado na linha de base quando há sólido não cristalizado remanescente na amostra (Zapelini; Cardoso, 2021), como é o caso do vidro moído, que é composto de uma sílica amorfa (Figura 8.b).

Uma observação importante é que a amostra WGZ apresenta um pico adicional em seu difratograma, indicado pela estrela vermelha, que pode ser atribuído a uma contaminação mínima com zeólita FAU (Faujasita). A formação de fases concorrentes tem sido frequentemente observada em estudos que relatam a síntese de zeólitas utilizando fontes de silício derivadas de resíduos (Lee et al., 2023), sendo que, em alguns casos, a intensidade da contaminação pode ser bastante elevada, especialmente com a formação das zeólitas SOD (sodalita), CAN (cancrinita) e GIS (zeólita P).

Figura 8 - Difratoograma de raios-X da zeólita LTA obtida a partir do vidro de painel solar, WGZ (a) e do vidro moído (b).

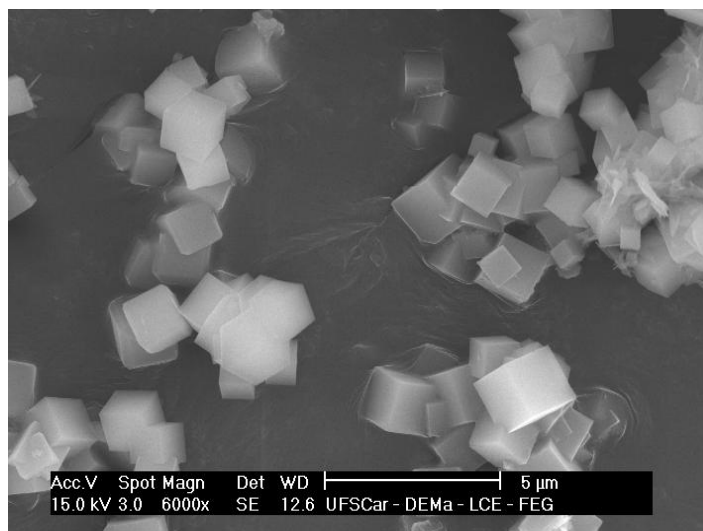


Fonte: Autor.

Através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi possível observar a formação de partículas de hábito cúbico com tamanho na ordem de micrometros (Figura 9), o que é típico da estrutura LTA (Zapelini; Cardoso, 2021; Verboekend et al., 2012), mais uma vez confirmando o sucesso da síntese realizada. A razão Si/Al da amostra foi determinada por EDS (Figura 10), realizado em diferentes regiões do sólido, resultando num valor médio de 1,1, o que também está de acordo com o esperado.

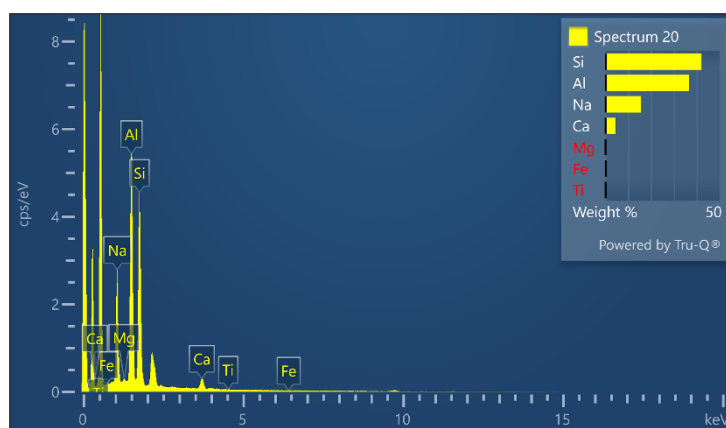
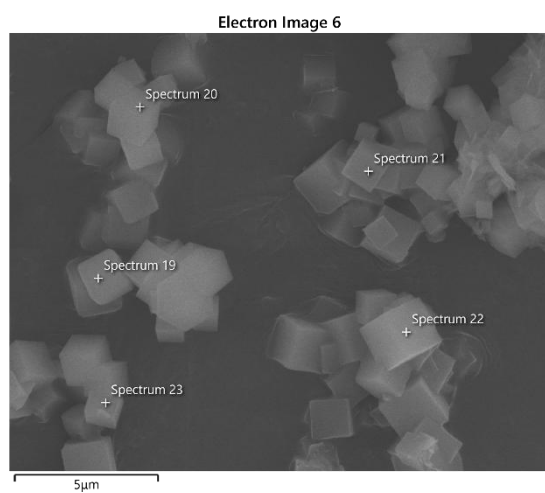
Esse resultado confirma que o material apresenta uma grande fração de alumínio, próxima à máxima possível, que é igual a 1 de acordo com a regra de Löwenstein. Além disso, devido à grande quantidade de cálcio encontrada tanto no vidro recuperado quanto no silicato preparado por sua fusão, verificou-se a razão Na/Al e Ca/Al por EDS, as quais resultaram em 0,080 e 0,04, respectivamente (Tabela 1), indicando que os alumínios na rede da zeólita são majoritariamente compensados por cátions Na^+ , permitindo caracterizar a zeólita preparada como Na-LTA (zeólita 4A).

Figura 9 - Difratoograma de raios-X da zeólita LTA obtida a partir do vidro de painel solar.



Fonte: Autor.

Figura 10 - Pontos selecionados para coleta de espectro EDS da amostra WGZ (esquerda) e espectro característico obtido para essa amostra (direita).



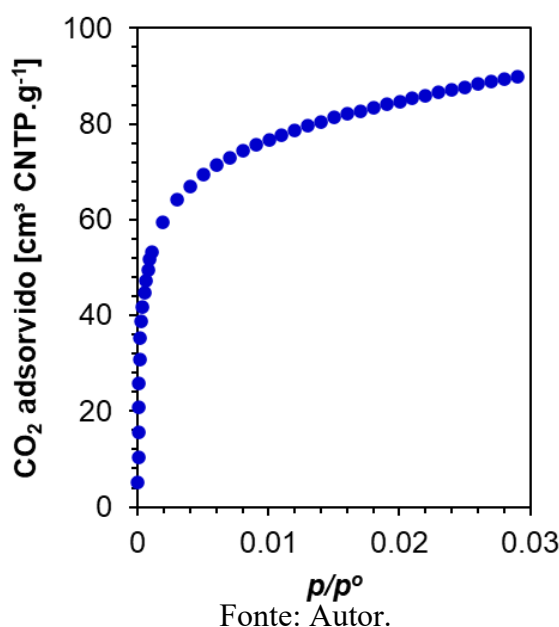
Fonte: Autor.

Tabela 1 - Propriedades físico-químicas da zeólita preparada (WGZ).

V_{micro} [cm ³ .g ⁻¹]	% Água	T _{des} [°C]	Si/Al	Na/Al	Ca/Al
0,20	29,1	144,2	1,1	0,80	0,04

Como WGZ é um material cristalino com topologia predominantemente de zeólita LTA, a isoterma de adsorção de CO₂ obtida a 0 °C foi utilizada para investigar sua microporosidade. Essa abordagem é empregada em substituição às isotermas clássicas de fisissorção de N₂, uma vez que, a -196 °C, o N₂ não consegue acessar os poros da zeólita LTA na forma sódica (Zapelini; Cardoso, 2021). O volume de microporos da WGZ foi estimado em 0,20 cm³.g⁻¹ (Tabela 1), sendo o valor esperado para essa estrutura. Assim, confirmou-se que a amostra WGZ é um sólido microporoso e mais uma vez confirmou-se o sucesso da síntese realizada com base na obtenção de parâmetros esperados para a zeólita em questão.

Figura 11 - Isotherma de adsorção de CO₂ obtida a 0 °C sobre a amostra WGZ sintetizada.

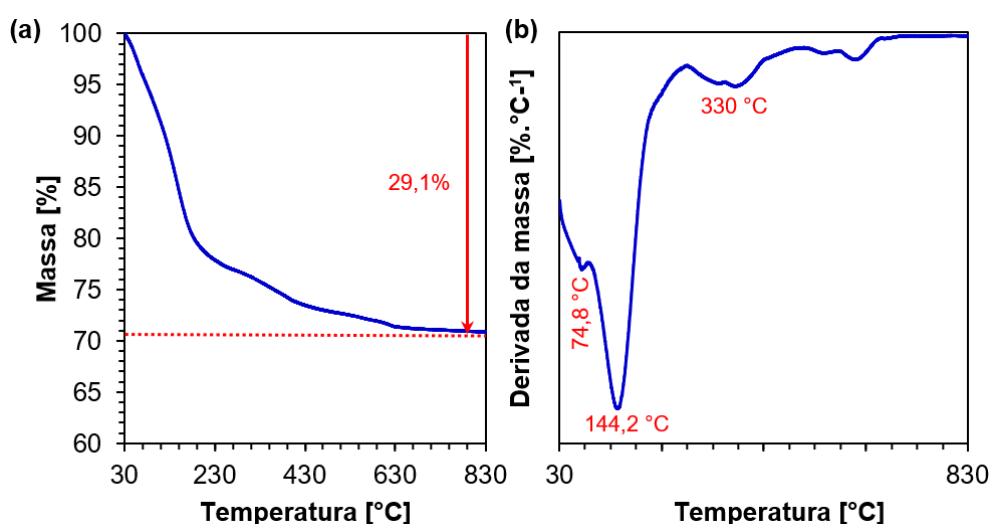


4.2 CAPACIDADE DE ADSORÇÃO E DESSORÇÃO DE ÁGUA

A hidrofiliicidade da amostra preparada é a propriedade mais importante para determinar sua capacidade de remover calor do módulo solar. Assim, a curva termogravimétrica da zeólita hidratada foi obtida para determinar a quantidade de água adsorvida (Figura 12a). A perda de massa total da amostra de referência é de 29,1% (Tabela 1 e Figura 12a), sendo que a maior fração desorve a 144,2 °C (Figura 12b), aqui designada como T_{des} (Tabela 1). Essa temperatura, que é superior ao ponto de ebulição normal da água (100 °C), resulta da interação entre as moléculas de água e os microporos polares da zeólita contendo os cátions Na⁺, o que dificulta sua desorção.

Essa interação torna-se ainda mais pronunciada com os cátions presentes no interior das cavidades alfa da zeólita; nesse caso, as moléculas de água só podem desorver a uma temperatura ainda mais elevada, o que resulta no pico de desorção observado a 330 °C na Figura 12b. No entanto, há também uma fração de água que desorve a uma temperatura de 74,8 °C, a qual corresponde a 9,2% da fração total de água desorvida. Considerando as temperaturas de operação que os módulos solares podem atingir (Mittelman et al., 2009), é essa fração de água que será responsável pelo resfriamento evaporativo do dispositivo durante a operação.

Figura 12 - (a) Termograma da amostra WGZ obtido em atmosfera de ar sintético e derivada da curva TG com relação à temperatura (b).

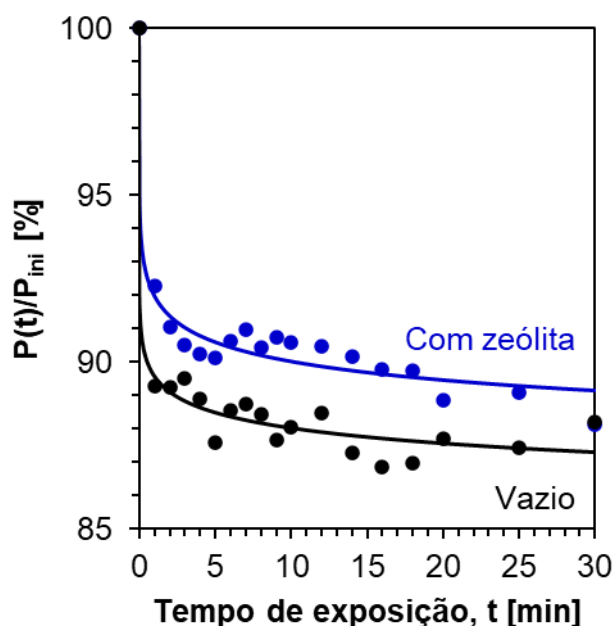


Fonte: Autor.

4.3 DESEMPENHO DO RESFRIAMENTO EVAPORATIVO NO MÓDULO SOLAR

Em síntese, a zeólita preparada foi utilizada para resfriar um módulo fotovoltaico em miniatura. A potência medida em função do tempo do módulo contendo a camada zeolítica foi comparada com a potência de um módulo sem camada zeolítica (vazio). Conforme mostrado na Figura 13, ambos módulos sofrem uma perda de potência, a qual é bastante pronunciada nos primeiros minutos de irradiação. Resultados similares já foram relatados (Abdallah et al., 2019), o que é atribuído ao efeito de aquecimento do módulo em contato com a radiação solar. Até o momento, não foi possível comprovar esse efeito devido à impossibilidade de medição de temperatura no módulo, o que pretendo explorar futuramente com novas análises e pesquisas.

Figura 13 - Testes de desempenho em escala de bancada dos módulos solares confeccionados com e sem zeólita como camada refrigerante.



Fonte: Autor.

O efeito de melhoria ao incorporar uma camada de zeólita na parte inferior da zeólita foi confirmado: a perda de potência do módulo contendo zeólita foi menor em cerca de 5% (Figura 13 e Tabela 2). Esse desempenho aprimorado resultou numa fração de 2,5% de aumento na energia gerada nos 30 minutos de experimento.

Tabela 2 - Parâmetros de desempenho do módulo fotovoltaico construído com e sem camada evaporativa de zeólita.

Módulo	$\frac{P}{P_{ini}} _{min}$	κ_{deact}	$E_{30 min}$
Vazio	$79.2 \pm 0.7 \%$	7.60	1.60 mWh
Zeólita	$84.0 \pm 0.7 \%$	4.55	1.64 mWh

Portanto, a aplicação da zeólita preparada com vidro de painel solar permitiu construir um novo módulo fotovoltaico com potência estacionária maior e menor constante de desativação associada ao aquecimento. Tais resultados confirmam o potencial do material como camada refrigerante, demonstrando a viabilidade da proposta desenvolvida e o cumprimento dos objetivos estabelecidos no trabalho.

5. CONCLUSÃO

O crescimento da energia solar fotovoltaica trouxe consigo diversos desafios, entre eles estão o gerenciamento consciente da energia gerada, os resíduos provenientes dos módulos em fim de vida útil e a necessidade de desenvolvimento de tecnologias mais eficientes para minimizar as perdas de desempenho causadas pelo aquecimento dos painéis solares. Diante disso, o presente trabalho buscou desenvolver alternativas de reaproveitamento desses resíduos, utilizando o vidro recuperado de painéis descartados como matéria-prima para a síntese de zeólitas aplicadas em novos módulos fotovoltaicos, promovendo simultaneamente a valorização de resíduos, a melhoria do desempenho energético do sistema e o estabelecimento de uma rota eficiente de economia circular para os módulos fotovoltaicos.

A partir da coleta e do reaproveitamento do vidro proveniente do módulo solar inutilizável para a síntese foi possível obter o silicato de sódio, um dos principais componentes para a síntese da zeólita tipo A (LTA). Em síntese, a partir dos resultados determinados pelo balanço de massa entre a quantidade de vidro adicionada, determinada pelo FRX e a quantidade de NaOH como descrita no projeto, demonstraram a viabilidade da reutilização do resíduo fotovoltaico de altíssima qualidade como uma fonte de silício para a produção de um material com potencial de aumentar a eficiência de novos módulos fotovoltaicos. Dessa forma, a proposta desenvolvida contribui para a redução do descarte inadequado desses equipamentos e para a adoção de práticas mais sustentáveis no setor energético.

Ademais, as análises de caracterização realizadas por difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia de raios X por dispersão de energia (MEV-EDS), fisissorção de CO₂ e termogravimetria foram fundamentais para validar a síntese da zeólita obtida. A análise por DRX permitiu confirmar a formação predominante da estrutura cristalina LTA, característica da zeólita desejada. Além disso, as imagens obtidas por MEV evidenciaram a formação de partículas com morfologia cúbica típica desse material, enquanto as análises por EDS confirmaram a composição química esperada e a razão Si/Al próxima à característica da zeólita Na-LTA. A fisissorção de CO₂ possibilitou avaliar a microporosidade do sólido sintetizado, comprovando sua elevada área microporosa e sua adequação para processos de adsorção. Em suma, os ensaios de termogravimetria demonstraram a elevada capacidade de adsorção e dessorção de água do material, evidenciando sua alta hidrofilicidade e seu potencial para aplicações envolvendo resfriamento evaporativo.

Além de confirmar o sucesso da síntese realizada, os resultados experimentais demonstraram que a aplicação da camada zeolítica no módulo fotovoltaico contribuiu para a

redução dos efeitos do aquecimento durante a operação do sistema. O módulo contendo zeólita apresentou maior estabilidade de potência, chegando a $84,0 \pm 0,7\%$ em comparação com $79,2 \pm 0,7\%$ do módulo sem a camada refrigerante, assim como uma redução de aproximadamente 5% nas perdas de potência e proporcionar um aumento de cerca de 2,5% na energia gerada, evidenciando o potencial da zeólita sintetizada.

Dessa forma, o presente trabalho demonstrou que o reaproveitamento do vidro de painéis solares constitui uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente sustentável. Além de contribuir para a reciclagem de resíduos fotovoltaicos, a proposta apresentou potencial para aumento da eficiência energética em novos módulos, reforçando a importância da economia circular como estratégia para o desenvolvimento sustentável do setor fotovoltaico.

Por fim, como perspectiva futura, a realização de estudos em escala ampliada é fundamental, incluindo o monitoramento direto da temperatura dos módulos, a avaliação da durabilidade da camada zeolítica em condições reais de operação e a otimização das propriedades da zeólita sintetizada, visando maximizar o desempenho térmico e energético do sistema fotovoltaico.

6. REFERÊNCIAS

ABDALLAH, S. R.; SAIDANI-SCOTT, H.; BENEDI, J. Experimental study for thermal regulation of photovoltaic panels using saturated zeolite with water. **Solar Energy**, v. 188, p. 464-474, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.039>.

BERARDI, P.; DIAS, J. M. O mercado da economia circular: como os negócios estão sendo afetados pelo modelo que substitui o linear e como serão ainda mais a médio e longo prazos. **GV Executivo**, v. 17, n. 5, p. 34-37, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.12660/gvexec.v17n5.2018.77340>.

BRECK, D. W. Zeolite molecular sieves: structure, chemistry and use. **Anal Chim Acta**, 1975. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0003-2670\(01\)85391-5](https://doi.org/10.1016/s0003-2670(01)85391-5).

CASARIN, R. Energia solar supera 35 GW de capacidade instalada no Brasil. **Portal Solar**, 17 nov. 2023. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/operacao-e-expansao/oem/energia-solar-supera-35-gw-de-capacidade-instalada-no-brasil>. Acesso em: 25 fev. 2026.

DE SOUSA, N. M.; OLIVEIRA, C. B.; CUNHA, D. Photovoltaic electronic waste in Brazil: circular economy challenges, potential and obstacles. **Social Sciences & Humanities Open**, v. 7, n. 1, 100456, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2023.100456>.

DIWANIA, S.; AGRAWAL, S.; SIDDIQUI, A. S.; SINGH, S. Photovoltaic-Thermal (PV/T) technology: a comprehensive review on applications and its advancement. **International Journal of Energy and Environmental Engineering**, v. 11, n. 1, p. 33-54, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40095-019-00327-y>.

GHEZINI, R.; SASSI, M.; BENGUEDDACH, A. Adsorption of carbon dioxide at high pressure over H-ZSM-5 type zeolite. Micropore volume determinations by using the Dubinin Raduskevich equation and the "t-plot" method. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 113, n. 1-3, p. 370-377, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2007.11.034>.

GONÇALVES. O destino dos painéis solares ao fim da vida útil. **Revista Pesquisa FAPESP**, 2023. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/o-destino-dos-paineis-solares-ao-fim-da-vida-util/>. Acesso em: dez. 2025.

IEA-PVPS. **End-of-life management of photovoltaic panels: trends in PV module recycling technologies by Task 12**. [S. l.: s. n., s. d.]. Disponível em: <https://iea-pvps.org/key-topics/endof-life-management-of-photovoltaic-panels-trends-in-pv-module-recycling-technologies-by-task-12/>. Acesso em: dez. 2025.

KANDILLI, C. Energy, exergy, and economical analyses of a photovoltaic thermal system integrated with the natural zeolites for heat management. **Int J Energy Res**, v. 43, n. 9, p. 4670- 4685, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/er.4605>.

LEE, W.-H.; LIN, Y.-W.; LIN, K.-L. Optimization of synthesis parameters for the preparation of zeolite by reusing industrialwaste as raw material: sandblasting waste and solar panel waste glass. **Solid State Sci**, v. 143, 107277, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2023.107277>.

LIN, Y.-W.; LEE, W.-H.; LIN, K.-L. A novel approach for preparing ecological zeolite material from solar panel waste lase and sandblasting waste: microscopic characteristics and humidity control performance. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 19, p. 4128-4140, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.153>.

LUZ, B. Economia circular Holanda-Brasil: da teoria à prática. 1. ed. **Rio de Janeiro: Exchange 4 Change Brasil**, 2017. Disponível em: ISBN 978-85-93703-00-3.

MARTINS, L.; CARDOSO, D. Aplicação catalítica de peneiras moleculares básicas micro e mesoporosas. **Química Nova**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 358-364, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.2174/157017806776611962>. Acesso em: 29 abr. 2026.

MITTELMAN, G.; ALSHARE, A.; DAVIDSON, J. H. A model and heat transfer correlation for rooftop integrated photovoltaics with a passive air cooling channel. **Solar Energy**, v. 83, n. 8, p. 1150-1160, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.01.015>.

NAKANO, T.; NOZUE, Y. Orbital degeneracy and magnetic properties of potassium clusters incorporated into nanoporous crystals of zeolite A. **Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering**, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.3233/jcm-2007-75-610>.

PREET, S.; SMITH, S. T. A comprehensive review on the recycling technology of silicon based photovoltaic solar panels: challenges and future outlook. **J Clean Prod**, v. 448, 141661, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141661>.

RACHID, A.; GOREN, A.; BECERRA, V.; RADULOVIC, J.; KHANNA, S. **Fundamentals of solar energy**. [S. l.: s. n.], p. 1-15, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-20830-0_1.

RISTIĆ, A.; FISCHER, F.; HAUER, A.; ZABUKOVEC LOGAR, N. Improved performance of binder-free zeolite Y for low-temperature sorption heat storage. **J Mater Chem A Mater**, v. 6, n. 24, p. 11521-11530, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C8TA00827B>.

SHIRAZIAN, S.; ASHRAFIZADEH, S. N. LTA and ion-exchanged LTA zeolite membranes for dehydration of natural gas. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.06.034>.

SILVA, E.; VARELLA, F. Descarte de módulos fotovoltaicos no Brasil: logística reversa e crescimento do setor. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. **Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica**, v. 7, n. 2, p. 1–11, 2025. DOI: <https://doi.org/10.21708/issn27635325.v7n2.a14203.2025>.

TERESA, M.; GUTIÉRREZ, O. Zeolitas características y propiedades. [S. l.]: **Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares**, 2004. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/434082125/Las-Zeolitas-f>. Acesso em: dez. 2025.

TIWARI, A. K.; CHATTERJEE, K.; AGRAWAL, S.; SINGH, G. K. A comprehensive review of photovoltaic-thermal (PVT) technology: performance evaluation and contemporary development. **Energy Reports**, v. 10, p. 2655-2679, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.09.043>.

VERBOEKEND, D., KELLER, T.C., MITCHELL, S. AND PÉREZ-RAMÍREZ, J. Hierarchical FAU- and LTA-Type Zeolites by Post-Synthetic Design: A New Generation of Highly Efficient Base Catalysts. **Adv. Funct. Mater.**, **23**: 1923-1934; (2013) <https://doi.org/10.1002/adfm.201202320>.

ZAPELINI, I. W.; CARDOSO, D. Amine-grafted Na-LTA zeolite precursors as basic catalysts for Knoevenagel condensation. **Microporous and Mesoporous Materials**, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111270>.

YA-WEN LIN; WEI-HAO LEE; KAE-LONG LIN. Developing ecological-zeolites from industrial waste glass and sandblasting waste for humidity control. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, Volume 176, 2025, 106314, ISSN 1876-1070, <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2025.106314>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876107025003657>)

M942s Muchati, Giovana Cristina dos Santos
Síntese de zeólitas usando vidro recuperado de painéis solares e sua aplicação como aditivo em novos painéis / Giovana Cristina dos Santos Muchati. -- Rosana, 2026
37 f. : tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Energia) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana
Orientador: Iago William Zapelini

1. Zeólitas. 2. Reciclagem de silício. 3. Economia circular. 4. Energia fotovoltaica. 5. Painéis solares. I. Título.