

**RESILIÊNCIA ENERGÉTICA EM RESIDÊNCIAS DO RIO GRANDE  
DO SUL COM SISTEMA DE HIDROGÊNIO VERDE**

**Autor: Flávio Roberto Gava (flavio.gava@edu.pucrs.br)**

**Orientador: Prof. Jaime Felici Gomes (Jaime.gomes@pucrs.br)**

**Resumo**

A Em maio de 2024, o estado do Rio Grande do Sul foi severamente afetado por enchentes, destacando a vulnerabilidade das infraestruturas energéticas residenciais. Este trabalho investiga a viabilidade do uso de hidrogênio verde como solução de armazenamento de energia para residências equipadas com sistemas de energia solar fotovoltaica. A pesquisa calcula a demanda energética de uma residência típica da região e avalia a eficiência do sistema de armazenamento de hidrogênio, comparando-o com geradores a gasolina. O hidrogênio verde, produzido por eletrólise da água utilizando energia renovável, apresenta vantagens significativas, como alta densidade energética, ciclo de vida prolongado e menor impacto ambiental. Além disso, o estudo aborda as recomendações para armazenamento seguro de hidrogênio, considerando as especificidades climáticas e geográficas do Estado. Os resultados indicam que o hidrogênio verde é uma alternativa viável e sustentável para aumentar a resiliência energética das residências, contribuindo para a adaptação às mudanças climáticas, para a redução da dependência de redes centralizadas e assegurando a continuidade do fornecimento durante interrupções da rede, promovendo maior autonomia energética e sustentabilidade. O estudo também destaca a importância de integrar a engenharia civil na concepção de infraestruturas resilientes, considerando a análise da viabilidade técnica e econômica dessas soluções.

**Palavras-chave:** hidrogênio verde, armazenamento de energia residencial, resiliência energética, energia solar fotovoltaica, sustentabilidade.

**1 INTRODUÇÃO**

Em maio de 2024, o estado do Rio Grande do Sul foi impactado por enchentes severas, expondo a vulnerabilidade das infraestruturas energéticas residenciais locais. Muitas casas, equipadas com sistemas de energia solar capazes de gerar eletricidade própria, enfrentaram dificuldades energéticas devido à ausência de sistemas adequados de armazenamento de energia. As opções atuais, majoritariamente baseadas em baterias de lítio, são custosas, dificultando a sua aquisição

por parte da população, além dos desafios sobre a sua capacidade de armazenagem, longevidade e eficiência, especialmente quando comparadas ao sistema baseado em hidrogênio.

Por isso, investir em soluções de armazenamento de energia residencial que estejam alinhadas à realidade regional é crucial para fortalecer tanto a resiliência energética quanto a sustentabilidade. Soluções de armazenamento descentralizadas garantem não apenas a continuidade do fornecimento de energia durante eventos climáticos extremos, mas também promovem a adaptação às mudanças climáticas e reduzem a dependência de redes centralizadas.

O hidrogênio verde desponta como uma das alternativas mais sustentáveis para armazenamento e para a geração de energia, representando um pilar fundamental na transição energética. Ao contrário dos combustíveis fósseis, como carvão e petróleo, o hidrogênio gera apenas vapor de água como subproduto, sem poluição atmosférica. Ademais, oferece alta densidade energética, longo prazo de armazenamento, abundância, ciclo de vida prolongado e possibilidade de reciclagem, além de uma menor dependência de materiais críticos e menor risco de incêndio comparado às baterias de lítio.

Nesse contexto, este trabalho busca determinar o tamanho que um sistema de hidrogênio verde ocupa em uma edificação para armazenar a energia captada por painéis solares fotovoltaicos, armazená-lo na forma gasosa, e depois, através de uma célula de combustível, voltar a abastecer plenamente a própria residência com energia elétrica. Para isso, será calculada a demanda de energia elétrica de uma típica casa da região em questão. O espaço ocupado por sistemas já existentes no mercado e serão destacadas, ainda, as recomendações para armazenamento seguro de hidrogênio, conforme normas Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

O objetivo é demonstrar como a engenharia civil pode contribuir para o desenvolvimento de infraestruturas resilientes e adaptadas às mudanças climáticas. O estudo terá foco em residências com sistemas de energia solar no Rio Grande do Sul, considerando as condições climáticas e geográficas locais, e não abordará soluções para outros tipos de infraestrutura ou regiões fora do estado, embora seus resultados possam servir de base para outras localidades. O estudo se concentrará em tecnologias viáveis atualmente disponíveis no mercado.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

No cenário atual de mudanças climáticas e eventos extremos, como as enchentes de maio de 2024 no Rio Grande do Sul, a resiliência das infraestruturas energéticas se torna uma questão central. O crescimento da adoção de sistemas de energia solar em residências destaca uma importante transformação no setor energético, mas também revela a necessidade urgente de soluções eficientes para armazenamento de energia, especialmente em locais propensos a desastres naturais. A eficácia desses sistemas depende significativamente da capacidade de armazenamento, uma questão enfatizada por Souza (2023), que aponta a lacuna crítica na infraestrutura energética devido à falta de sistemas eficazes de armazenamento.

O conceito de resiliência energética é amplamente discutido na literatura contemporânea e se refere à capacidade de um sistema de energia de resistir, adaptar-se e recuperar-se de eventos adversos, mantendo um serviço contínuo e confiável. Silva (2022) destaca que a resiliência energética não é apenas uma questão técnica, mas também estratégica, pois envolve a segurança nacional e a sustentabilidade ambiental. Neste contexto, o armazenamento de energia surge como um elemento crucial, desempenhando um papel vital na manutenção da estabilidade da rede elétrica e na minimização dos impactos de falhas no fornecimento.

O hidrogênio verde, produzido a partir da eletrólise da água usando fontes de energia renováveis como a solar, surge como uma alternativa viável e sustentável para o armazenamento de energia. Santos e Oliveira (2021) destacam que o hidrogênio verde não apenas oferece uma solução livre de emissões, mas também possui potencial para transformar a matriz energética global, reduzindo significativamente a dependência de combustíveis fósseis. A capacidade de armazenamento a longo prazo e a densidade energética elevada fazem do hidrogênio uma opção atraente para integração em sistemas residenciais de energia fotovoltaica.

Um dos principais desafios na implementação de sistemas de hidrogênio verde é a adaptação da infraestrutura existente para acomodar novas tecnologias. Araújo (2024) argumenta que a engenharia civil desempenha um papel fundamental na criação de infraestruturas resilientes, que não apenas atendem às necessidades imediatas de armazenamento de hidrogênio, mas também se preparam para futuras demandas energéticas. Este processo envolve o uso de

materiais avançados e técnicas de construção inovadoras para garantir a segurança e a eficiência dos sistemas de armazenamento de hidrogênio.

Os sistemas descentralizados de armazenamento, que evitam a concentração de energia em grandes complexos, apresentam vantagens significativas em termos de segurança e eficiência. Lima et al. (2023) sugerem que a descentralização do armazenamento de energia pode aumentar a resiliência da rede elétrica, permitindo uma resposta mais ágil a eventos adversos e facilitando a adaptação às mudanças climáticas. Este modelo também promove a autonomia energética, reduzindo a dependência de redes centrais e permitindo que comunidades locais gerenciem melhor seus recursos energéticos.

As condições climáticas e geográficas do Rio Grande do Sul representam um fator determinante na implementação de sistemas de energia solar e armazenamento de hidrogênio. Ferreira (2023) observa que a variabilidade climática da região afeta diretamente a eficiência de geração e armazenamento de energia. Portanto, qualquer solução proposta deve ser adaptada às características específicas da região, aproveitando ao máximo os recursos naturais disponíveis. O presente estudo visa determinar o tamanho ideal de um sistema de hidrogênio verde em uma residência, levando em consideração a demanda energética típica e as condições locais do Rio Grande do Sul. Costa e Ribeiro (2022) enfatizam a importância de uma análise rigorosa da viabilidade técnica e econômica dessas soluções, para garantir que sejam não apenas teoricamente sólidas, mas também praticáveis no contexto local.

Além de contribuir para a resiliência energética, o uso de hidrogênio verde em residências pode ter impactos significativos na redução das emissões de gases de efeito estufa. Ao substituir geradores a gasolina, que são frequentemente usados em situações de emergência, por sistemas de hidrogênio, é possível diminuir a pegada de carbono das residências, contribuindo para os esforços globais de mitigação das mudanças climáticas.

Em conclusão, a implementação de sistemas de armazenamento de energia baseados em hidrogênio verde representa uma oportunidade estratégica para o Rio Grande do Sul, promovendo não apenas a resiliência e a autonomia energética, mas também a sustentabilidade ambiental. O desenvolvimento dessas soluções requer uma abordagem multidisciplinar, envolvendo engenharia, economia e ciência ambiental, para garantir que os sistemas propostos

atendam às necessidades atuais e futuras da região. Este capítulo teórico busca fornecer uma base sólida para o estudo das possibilidades de integração de hidrogênio verde em infraestruturas residenciais, destacando a importância de considerar tanto os desafios locais quanto os avanços tecnológicos globais.

### **3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

A pesquisa proposta é fundamentada nas diretrizes do livro "Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação" de Silva e Menezes e visa desenvolver soluções práticas para os desafios energéticos enfrentados no estado do Rio Grande do Sul.

Com uma abordagem qualitativa, a pesquisa é caracterizada como aplicada, dado que busca uma solução prática para o armazenamento de energia. O objetivo é explicativo, explorando como os sistemas de hidrogênio podem melhorar a resiliência energética das residências, especificamente no contexto do Rio Grande do Sul. O procedimento metodológico incluirá uma revisão bibliográfica sobre as tecnologias de armazenamento de energia, garantindo que as soluções propostas estejam baseadas em tecnologias viáveis e disponíveis no mercado atual.

Serão calculadas as demandas energéticas de uma residência típica da região, além da eficiência de um sistema hipotético baseado no armazenamento de energia por hidrogênio em forma gasosa. Também será calculado o espaço necessário para acomodar o sistema de armazenamento de hidrogênio, composta por cilindros e geralmente instalado na parte externa de uma casa, demandando um espaço especialmente planejado para ele. É a parte de maior volume de todo o sistema de conversão de energia. Além disso, serão feitas considerações relevantes sobre o armazenamento de hidrogênio recomendadas por normas da ABNT. Dessa forma, será possível determinar uma área hipotética necessária para a implementação de um sistema de armazenamento de energia em uma residência comum no estado do Rio Grande do Sul.

A validade dos resultados será assegurada por meio da comparação com os poucos equipamentos disponíveis no mercado externo do Brasil. Desta forma, a pesquisa não só propõe uma solução mais adequada a realidade do estado, mas também alinha técnicas de engenharia civil com as necessidades emergentes de adaptação climática, contribuindo para a construção

de infraestruturas mais resilientes e sustentáveis no Rio Grande do Sul, com potencial para aplicação em outras localidades que enfrentam desafios semelhantes.

#### **4 DEMANDA RESIDENCIAL DE ENERGIA ELÉTRICA**

Para estimar o consumo médio de energia elétrica de uma residência típica no Rio Grande do Sul, precisamos considerar alguns fatores principais, como o clima, o tamanho da residência, os eletrodomésticos usados e os hábitos de consumo dos moradores. O Rio Grande do Sul tem clima subtropical, o que significa que há grandes variações de temperatura ao longo do ano. Isso afeta o uso de aquecedores no inverno e ventiladores ou ar-condicionado no verão. Uma hipotética casa padrão de cerca de 100 metros quadrados. Nela, encontramos geralmente equipamentos como geladeira, televisão, máquina de lavar roupas, aquecedor elétrico e chuveiro elétrico, que são grandes consumidores de energia.

Considerando um cenário típico, podemos estimar que uma residência média tenha cerca de 10 lâmpadas LED, uma geladeira, uma televisão, uma máquina de lavar, um chuveiro elétrico, e possivelmente um ar-condicionado. As lâmpadas LED, embora eficientes, somam cerca de 15 kWh por mês se usadas por cinco horas diárias. A geladeira consome aproximadamente 30 kWh mensais. A televisão, utilizada quatro horas por dia, adiciona cerca de 24 kWh por mês ao total de consumo. A máquina de lavar, usada três vezes por semana, tem um consumo de cerca de 5 kWh mensais. O chuveiro elétrico, por ser um dos maiores consumidores, chega a 82,5 kWh se usado por 30 minutos diariamente. O ar-condicionado, durante o verão, pode consumir cerca de 26 kWh mensais. O aquecedor de ambiente, assim como o chuveiro elétrico que é um dos maiores consumidores, utilizado somente durante o inverno pode consumir cerca de 100 kWh estando ligado 12 horas por dia, somente durante 3 meses no ano (o valor de consumo total anual é dividido por 12 meses). Outros aparelhos, como micro-ondas e computadores, adicionam em média 20 kWh ao mês.

Somando tudo, temos um consumo aproximado de 302,5 kWh por mês. Este cálculo é uma média que pode variar conforme os hábitos de uso e o número de aparelhos, mas que fornece uma média para ser utilizadas nos cálculos de área estimada para a instalação de um sistema de armazenagem de energia por hidrogênio verde.

## **5 COMPONENTES DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO**

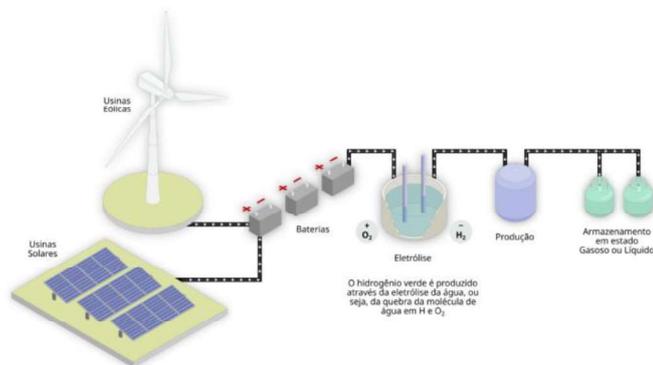
O hidrogênio verde tem emergido como uma solução promissora e sustentável para a matriz energética global, sendo produzido por meio de fontes renováveis. Um dos métodos mais eficazes para sua produção é através da eletrólise da água, utilizando energia solar. O processo inicia-se com a captação da energia solar. Painéis fotovoltaicos são instalados para absorver a luz do sol e convertê-la em eletricidade. Esses painéis são compostos por células solares que, através do efeito fotovoltaico, geram corrente elétrica direta (DC). Essa eletricidade é então convertida em corrente alternada (AC) através de inversores, preparando-a para o próximo estágio: a eletrólise.

A eletrólise é o processo pelo qual a corrente elétrica é passada por água ( $H_2O$ ) para separar as moléculas em hidrogênio ( $H_2$ ) e oxigênio ( $O_2$ ). O equipamento usado, conhecido como eletrolisador, é composto por dois eletrodos imersos em um eletrólito, que conduz eletricidade. Quando a corrente elétrica proveniente dos painéis solares passa por esse sistema, a água se decompõe, liberando hidrogênio gasoso no cátodo e oxigênio no ânodo. Esse hidrogênio é considerado "verde" por ser produzido inteiramente por energia renovável.

Após a produção, o hidrogênio precisa ser purificado e comprimido para garantir sua eficácia e segurança no armazenamento. Sistemas de purificação removem impurezas, enquanto compressores aumentam a pressão do hidrogênio para que ele possa ser armazenado eficientemente. O processo de compressão geralmente eleva a pressão para níveis entre 350 e 700 bar, dependendo das necessidades de armazenamento e transporte.

Finalmente, o hidrogênio é armazenado na forma gasosa em cilindros de alta pressão ou tanques especializados. Esses tanques são projetados para suportar altas pressões e garantir a segurança e estabilidade do gás. O armazenamento eficiente é crucial para facilitar a posterior distribuição e utilização do hidrogênio como combustível ou em processos industriais.

Figura 1: Esquema de Processo de Armazenamento de Hidrogênio Verde



(fonte: ATLAS SOLARIMÉTRICO DA PARAÍBA, 2024)

### 5.1 Eletrolisador

O eletrolisador é um componente crucial no sistema de armazenamento de energia com hidrogênio verde. Sua principal função é produzir hidrogênio através do processo de eletrólise da água. Este processo utiliza energia elétrica, idealmente proveniente de fontes renováveis como solar ou eólica, para dividir a água (H<sub>2</sub>O) em oxigênio (O<sub>2</sub>) e hidrogênio (H<sub>2</sub>). Essa conversão é fundamental para a criação de hidrogênio "verde", que é uma forma sustentável de combustível.

Os eletrolisadores variam significativamente em tamanho e espaço necessário para sua instalação. Pequenos sistemas, com capacidades de alguns quilowatts, são adequados para aplicações residenciais ou de pesquisa, enquanto instalações de larga escala, que operam em megawatts, são empregadas em contextos industriais e de grande demanda energética. Quanto à eficiência, os eletrolisadores modernos operam tipicamente entre 60% e 80%, com tecnologias distintas influenciando a eficiência total: a tecnologia de membrana de troca de prótons (PEM) é conhecida por sua resposta rápida e alta pureza de hidrogênio, enquanto os eletrolisadores alcalinos são frequentemente mais econômicos e a tecnologia de óxido sólido (SOEC) oferece alta eficiência térmica.

### 5.2 Tanques de Armazenamento de Hidrogênio

Os tanques de armazenamento desempenham um papel vital na retenção do hidrogênio produzido, permitindo seu uso posterior conforme a demanda energética. Esses tanques devem ser projetados para suportar altas pressões, comumente variando entre 200 e 700 bar,

especialmente quando se trata de armazenamento de hidrogênio gasoso comprimido. Alternativamente, o hidrogênio pode ser armazenado em forma líquida, o que exige temperaturas extremamente baixas, implicando na necessidade de tanques criogênicos. A escolha entre armazenamento gasoso ou líquido depende de fatores como espaço disponível, custo e a quantidade de hidrogênio a ser armazenada, já que o volume necessário aumenta proporcionalmente à quantidade de hidrogênio.

### **5.3 Célula de Combustível**

As células de combustível são essenciais para converter o hidrogênio armazenado de volta em eletricidade, completando o ciclo de transformação de energia. Este processo é caracterizado por sua alta eficiência e baixa emissão de poluentes, já que a única emissão significativa é vapor de água. A eficiência das células de combustível geralmente varia entre 40% e 60%, dependendo da tecnologia utilizada e das condições operacionais. Elas são projetadas para diversas escalas de potência: em aplicações residenciais, podem ser relativamente compactas, enquanto, para usos industriais, a configuração pode ser significativamente maior, exigindo mais espaço físico.

### **5.4 Sistemas de Controle e Balanceamento de Planta**

Para garantir a operação segura e eficiente de todo o sistema, são necessários complexos sistemas de controle e balanceamento de planta. Esses sistemas incluem componentes como compressores para pressurizar o hidrogênio, sistemas de refrigeração ou isolamento para manter as temperaturas operacionais adequadas, inversores para converter a corrente elétrica gerada em corrente alternada (CA) ou corrente contínua (CC) conforme necessário, e diversos sensores e controladores para monitorar e ajustar o desempenho do sistema em tempo real. Um controle eficaz assegura que os diferentes componentes trabalhem em harmonia, maximizando a eficiência geral e garantindo a segurança das operações.

## **6 EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA À HIDROGÊNIO**

A conversão de hidrogênio em energia elétrica através de células a combustível é uma tecnologia essencial para o futuro energético sustentável, destacando-se pela capacidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa enquanto oferece uma alternativa eficiente aos combustíveis fósseis. O hidrogênio, armazenado na forma gasosa, é utilizado nestas células

para gerar eletricidade a partir de uma reação eletroquímica com oxigênio, produzindo apenas água como subproduto.

A eficiência das células a combustível depende de fatores como a tecnologia utilizada e as condições operacionais. As Células a Combustível de Membrana de Troca de Protons (PEMFC) são amplamente utilizadas em aplicações veiculares, oferecendo eficiências que variam de 40% a 60%, podendo atingir até 80% quando o calor residual é aproveitado em sistemas de cogeração. As Células de Óxido Sólido (SOFC), adequadas para uso estacionário, apresentam uma eficiência elétrica de 50% a 60%, com potencial de superar 85% de eficiência total ao aproveitar o calor gerado. O armazenamento de hidrogênio na forma gasosa envolve sua compressão e estocagem sob alta pressão, garantindo um fornecimento constante e eficiente para as células a combustível.

Em comparação, apenas para apresentar uma referência de eficiência, os geradores a gasolina, que são utilizados para a geração de energia elétrica independente de redes elétricas de distribuidoras, apresentam eficiência significativamente menor, geralmente entre 20% e 30%. Isso se deve às perdas substanciais de energia na forma de calor devido à baixa eficiência de combustão e às perdas mecânicas inerentes aos motores de combustão interna. Além disso, os geradores a gasolina são fontes de poluição, emitindo CO<sub>2</sub> e outros gases nocivos.

As células a combustível de hidrogênio gasoso superam os geradores a gasolina em termos de eficiência e oferecem vantagens ambientais significativas, devido à operação praticamente livre de emissões de carbono.

## **6 CÁLCULO DA ÁREA DESTINADA AO SISTEMA DE HIDROGÊNIO**

O depósito de hidrogênio de um sistema de armazenamento de energia, geralmente é dividido em módulos interno e externo, devido as características do gás hidrogênio de periculosidade e por isso é importante a previsão de um espaço externo nas residências para a instalação de cilindros para a armazenamento do gás. Para calcular o tamanho do depósito de hidrogênio necessário para gerar energia elétrica em uma residência, considerando um consumo médio de 302,5 kWh por mês e uma eficiência do sistema de 50%, é necessário seguir os passos abaixo:

**6.1 Determinar a Energia Elétrica Necessária:** A eficiência de 50% significa que apenas metade da energia química do hidrogênio é convertida em energia elétrica útil. Portanto, precisamos considerar essa eficiência no cálculo do consumo total de energia a partir do hidrogênio.

$$\text{Energia Química Necessária} = \frac{\text{Energia Elétrica Consumida}}{\text{Eficiência}} = \frac{302,5 \text{ kWh}}{0,50} = 605 \text{ kWh} \quad (\text{equação 1})$$

**6.2 Converter kWh para MJ:** Sabendo que 1 kWh = 3,6 MJ, convertamos a energia necessária em megajoules (MJ).

$$605 \text{ kWh} \times 3,6 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} = 2.178 \text{ MJ} \quad (\text{equação 2})$$

**6.3 Calcular a quantidade de hidrogênio necessária:** O poder calorífico do hidrogênio é aproximadamente 120 MJ/kg. Assim, a quantidade de hidrogênio necessária é calculada dividindo a energia total pelos MJ por kg de hidrogênio.

$$\text{Massa de Hidrogênio Necessária} = \frac{2.178 \text{ MJ}}{120 \text{ MJ/kg}} \approx 18,15 \text{ kg} \quad (\text{equação 3})$$

**6.4 Calcular o volume de hidrogênio gasoso:** O hidrogênio na forma gasosa é geralmente armazenado em condições de alta pressão. Considerando que 1 kg de hidrogênio ocupa aproximadamente 11 m<sup>3</sup> em condições normais de temperatura e pressão (CNTP), podemos ajustar esse volume para condições de armazenamento realistas, como pressão de 200 bar, onde o volume seria significativamente reduzido.

CNTP (1 atm, 0°C): 1 kg de H<sub>2</sub> ≈ 11 m<sup>3</sup>

Alta Pressão (200 bar): Volume Reduzido por Fator de Compressão (aproximadamente 200 vezes)

$$\text{Volume a 200 bar} = \frac{18,15 \text{ kg} \times 11 \text{ m}^3/\text{kg}}{200} \approx 1 \text{ m}^3 \quad (\text{equação 4})$$

Portanto, para armazenar hidrogênio suficiente para gerar 302,5 kWh de energia elétrica por mês em uma residência com um sistema de eficiência de 50%, seria necessário um depósito com capacidade de aproximadamente um metro cúbico, que é um espaço mínimo quando comparado com uma série de baterias, a uma pressão de 200 bar que é equivalente a 20 MPa.

## **7 CONSIDERAÇÕES SOBRE A SEGURANÇA DE ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO**

Para garantir a utilização segura do hidrogênio como combustível, conforme as diretrizes da ABNT ISO/TR 15916, é essencial compreender suas propriedades únicas e adotar abordagens de engenharia eficazes para controlar os riscos associados ao seu uso. O hidrogênio é altamente inflamável e pode formar misturas explosivas em contato com o ar, com uma faixa de ignição entre 4% e 75%. Essa característica, combinada com sua capacidade de ignição espontânea devido a faíscas eletrostáticas ou outras fontes, torna imprescindível a implementação de medidas de segurança rigorosas. Além disso, como o hidrogênio pode deslocar o oxigênio, existe um risco de asfixia em ambientes confinados.

Devido à sua leveza e à pequena estrutura molecular, o hidrogênio gasoso apresenta desafios adicionais, pois permeia a maioria dos materiais e pode escapar facilmente por pequenas fissuras, dificultando a detecção de vazamentos sem a ajuda de tecnologias especializadas. Sua natureza incolor e inodora agrava esse problema. Quando liberado, o hidrogênio tende a subir rapidamente, podendo se acumular em áreas confinadas e elevadas, o que exige um planejamento cuidadoso do local de instalação dos sistemas de armazenamento.

O armazenamento pode ser realizado de duas formas principais: comprimido, em estado gasoso, ou super-resfriado, em estado líquido. Para pequenas e médias quantidades, o hidrogênio é comprimido e armazenado em recipientes de alta pressão, como aqueles feitos de alumínio e aço, que suportam até 40 Mpa, em sua forma gasosa. Em aplicações veiculares, os sistemas de armazenamento devem suportar até 35 MPa. Esses recipientes precisam ser fabricados de acordo com normas específicas para vasos de pressão. Já o armazenamento na forma líquida requer um isolamento térmico eficaz para evitar a evaporação, uma vez que o hidrogênio deve ser mantido a temperaturas criogênicas de 20 K. Nesse caso, inviabilizaria o uso doméstico devido ao aumento de custos para o resfriamento, além de necessitar um sistema mais complexo para possibilitar a conversão em eletricidade.

Os sistemas de armazenamento incluem não apenas os recipientes, mas também tubulações, controladores de fluxo e sistemas de alívio de pressão. As tubulações, frequentemente feitas de aço inoxidável, devem ser adequadas para a passagem de hidrogênio durante toda a vida útil do sistema, preferindo-se juntas soldadas para minimizar vazamentos. Instalações para armazenamento de grandes volumes de hidrogênio são idealmente localizadas ao ar livre ou em locais especialmente projetados para mitigar riscos de incêndio ou explosão.

A localização das instalações deve ser cuidadosamente escolhida para garantir sua distância segura de áreas habitadas e outras estruturas, minimizando o impacto de possíveis incidentes. As distâncias de separação são determinadas pela quantidade de hidrogênio armazenada, sendo que, quanto maior a quantidade, maiores são as distâncias de separação recomendadas. Em algumas situações, pequenas quantidades de hidrogênio podem ser armazenadas em edifícios, mas é sempre recomendado o armazenamento ao ar livre.

Além dessas medidas, é crucial incorporar detectores de hidrogênio nos sistemas para monitorar possíveis vazamentos. A ventilação adequada, a utilização de materiais de construção não combustíveis, a ausência de fontes de ignição e a presença de sistemas de alívio de pressão são elementos fundamentais para garantir a segurança. Dessa forma, ao seguir práticas rigorosas de engenharia e as diretrizes estabelecidas, o hidrogênio pode ser uma fonte de energia segura e eficiente.

## **8 EQUIPAMENTOS DISPONÍVEIS NO MERCADO**

Em uma busca por empresas que dispõem de equipamentos que se propõem ao mesmo objetivo do sistema de armazenamento de energia por hidrogênio verde, poucas empresas foram encontradas e todas se encontram fora do Brasil. Dentre as empresas que oferecem essas inovações, destacam-se a Home Power Solutions (HPS) da Alemanha e a Hybitat da Itália.

A HPS desenvolveu o sistema Picea que é dividido em dois módulos: um interno e outro externo à casa, conforme as figuras 2 e 3. Elas integram a geração de energia solar, o armazenamento de hidrogênio e a geração de energia elétrica. O módulo interno ocupa 1,62 m<sup>2</sup>, combinando um eletrolisador, uma célula de combustível, uma bateria e um sistema de gestão de calor, oferecendo uma solução eficiente para maximizar o uso de energia solar (Home Power

Solutions, 2024). O espaço utilizado é comparável ao de um grande eletrodoméstico, sendo adequado para instalação em salas técnicas ou garagens. Com uma expectativa de vida útil de cerca de 20 anos, o sistema é projetado para garantir durabilidade e eficiência energética por um longo período. O módulo externo, dependendo da demanda, possui de uma a cinco unidades de armazenamento de hidrogênio em cilindros. O tamanho do tanque de armazenamento é adaptado individualmente para que as necessidades pessoais de eletricidade possam ser atendidas de forma completamente independente, chegando a ocupar uma área de dois 2 m<sup>2</sup>.

Figura 2: Equipamento Picea, desenvolvido pela HPS, módulo interno



(fonte HPS, 2024)

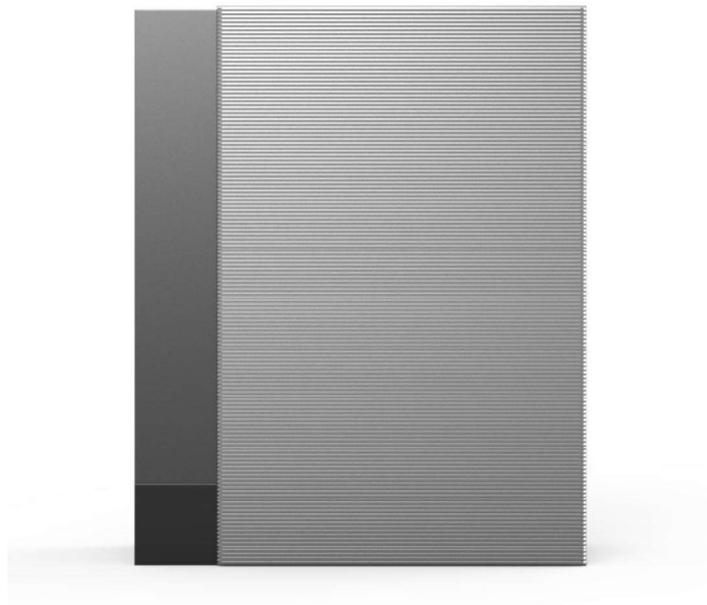
Figura 3: Equipamento Picea, desenvolvido pela HPS, módulo externo



(fonte HPS, 2024)

A Hybitat, também foca em soluções modulares de armazenamento de energia baseadas em hidrogênio verde, visando aumentar a independência energética de maneira sustentável (Hybitat, 2024). A tecnologia utilizada permite a produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis, proporcionando flexibilidade para uso em diversos tipos de edifícios. O seu módulo interno, conforme as características técnicas fornecidas pela fabricante (anexo 1), ocupa 0,54 m<sup>2</sup>, enquanto sua unidade externa de armazenamento ocupa de 0,15 m<sup>2</sup> cada módulo. Permite sua adaptação a ambientes internos, externos ou mistos, atendendo a diversas necessidades de espaço. Este sistema é desenvolvido para operar por longos períodos, maximizando a eficiência e o retorno sobre o investimento.

Figura 4: Equipamento Hybitat



(fonte Hybitat, 2024)

Em suma, essas empresas estão na vanguarda do desenvolvimento de soluções de armazenamento de energia com hidrogênio verde, promovendo a sustentabilidade e a eficiência energética em residências e pequenas empresas. As tecnologias oferecidas não apenas reduzem a dependência de fontes de energia tradicionais, mas também contribuem para a redução dos custos de energia, promovendo o uso de fontes renováveis.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este estudo investigou a viabilidade do uso de hidrogênio verde como solução de armazenamento de energia para residências no Rio Grande do Sul, especialmente aquelas equipadas com sistemas de energia solar fotovoltaica.

Os resultados indicam que o hidrogênio verde, produzido por eletrólise da água utilizando energia renovável, apresenta várias vantagens significativas. Entre elas, destacam-se a alta densidade energética, o ciclo de vida prolongado e o menor impacto ambiental em comparação com as baterias de lítio e os geradores a gasolina. Além disso, o hidrogênio verde não gera poluição atmosférica, pois seu único subproduto é vapor de água. Essas características tornam o hidrogênio verde uma alternativa viável e sustentável para aumentar a resiliência energética das residências, contribuindo para a adaptação às mudanças climáticas e a redução da dependência de redes centralizadas.

A implementação de sistemas descentralizados de armazenamento de energia usando hidrogênio verde pode assegurar a continuidade do fornecimento durante interrupções da rede, promovendo maior autonomia energética e sustentabilidade. No entanto, a adoção dessa tecnologia requer uma análise cuidadosa das especificidades climáticas e geográficas do Rio Grande do Sul, bem como das condições econômicas e técnicas locais. A engenharia civil desempenha um papel crucial na concepção de infraestruturas resilientes e adaptadas às condições locais, integrando sistemas de armazenamento de hidrogênio com as infraestruturas existentes.

O estudo também abordou as recomendações para o armazenamento seguro de hidrogênio, considerando suas propriedades únicas e os riscos associados ao seu uso. O hidrogênio é altamente inflamável e pode formar misturas explosivas em contato com o ar, exigindo medidas rigorosas de segurança. A leveza e a pequena estrutura molecular do hidrogênio gasoso apresentam desafios adicionais, como a facilidade de escape por pequenas fissuras e a dificuldade de detecção de vazamentos sem tecnologias especializadas. Portanto, é essencial adotar abordagens de engenharia eficazes para controlar esses riscos, garantindo a segurança das operações.

A pesquisa identificou algumas empresas que oferecem soluções de armazenamento de energia utilizando hidrogênio verde, como a Home Power Solutions e a Hybitat. Essas empresas estão na vanguarda do desenvolvimento de tecnologias que promovem a sustentabilidade e a eficiência energética em residências e pequenas empresas. As soluções oferecidas variam desde sistemas integrados de geração e armazenamento de energia solar até tecnologias modulares que podem ser adaptadas a diferentes tipos de ambientes. No entanto, todas as empresas identificadas estão localizadas fora do Brasil, o que pode representar um desafio adicional para a implementação dessas tecnologias no contexto local.

A análise da demanda energética de uma residência típica no Rio Grande do Sul revelou um consumo médio de 302,5 kWh por mês. Esse valor foi utilizado para calcular o tamanho ideal de um depósito de hidrogênio verde necessário para armazenar a energia captada por painéis solares fotovoltaicos. Considerando uma eficiência do sistema de 50%, foi determinado que seria necessário um depósito com capacidade de aproximadamente um metro cúbico a uma pressão de 200 bar ou 20 MPa. Esse cálculo fornece uma base prática para o desenvolvimento de soluções de armazenamento de energia por hidrogênio verde para residências na região.

Em termos de eficiência, as células a combustível de hidrogênio gasoso superam os geradores a gasolina, oferecendo vantagens ambientais significativas devido à operação praticamente livre de emissões de carbono. Embora o armazenamento de hidrogênio na forma gasosa exija infraestrutura especial para compressão e segurança, é amplamente considerado prático, especialmente em aplicações que requerem mobilidade e reabastecimento rápido. Com o avanço das tecnologias de células a combustível e dos métodos de armazenamento e distribuição de hidrogênio, espera-se que essa solução se torne cada vez mais viável no contexto energético global.

Com o resultado obtido através do cálculo da área necessária para a instalação do sistema de armazenamento de energia, é possível comparar com o volume demandado pelos equipamentos de algumas poucas empresas estrangeiras que ofertam tal sistema. Conforme os cálculos, somando as áreas necessárias para o conjunto de dispositivos, tanto de armazenagem, conversão de energia e instrumentos de controle, elas são compatíveis umas com as outras. Assim, é possível calcular a área externa destinada a um depósito de hidrogênio com segurança através dos cálculos apresentados.

Em conclusão, o hidrogênio verde representa uma alternativa promissora para o armazenamento de energia em residências no Rio Grande do Sul, oferecendo uma solução sustentável e eficiente para aumentar a resiliência energética e promover a adaptação às mudanças climáticas. A integração de sistemas de armazenamento de hidrogênio com infraestruturas existentes, aliada a uma análise rigorosa da viabilidade técnica e econômica, é essencial para o sucesso dessa tecnologia. A engenharia civil tem um papel fundamental nesse processo, contribuindo para a criação de infraestruturas resilientes e adaptadas às necessidades locais. O desenvolvimento de soluções práticas e sustentáveis para o armazenamento de energia por hidrogênio verde pode servir de base para outras localidades que enfrentam desafios semelhantes, promovendo a sustentabilidade e a eficiência energética em uma escala mais ampla.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, M. **Resiliência e Sustentabilidade em Infraestruturas Energéticas**. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2024.
- COSTA, L.; RIBEIRO, J. **Sustentabilidade e Autonomia Energética: Uma Perspectiva Local**. São Paulo: Editora Acadêmica, 2022.
- FERREIRA, A. M. **Desafios Energéticos no Cenário Regional**. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 15, n. 2, p. 112-130, 2023.
- LIMA, P. et al. **Tecnologias de Armazenamento e o Futuro da Energia Limpa**. *Revista Brasileira de Energia Sustentável*, v. 12, n. 1, p. 55-78, 2023.
- SANTOS, R.; OLIVEIRA, F. **O Papel do Hidrogênio na Transição Energética**. Rio de Janeiro: Editora Energi, 2021.
- SILVA, C. R. **Gestão de Recursos Energéticos e Emergências Climáticas**. Salvador: Editora Climática, 2022.
- SOUZA, T. **Inovação e Sustentabilidade na Energia Solar Residencial**. Florianópolis: Editora Sustentável, 2023.
- SILVA E. L.; MENEZES E. M.. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. Edição. Local de publicação: Editora, Ano de publicação.
- ABNT ISO/TR 15916:2020. **Segurança no manuseio e no armazenamento de hidrogênio: Especificações Técnicas**. São Paulo: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020.
- MENCH, M. M. **Fuel Cell Engines**. Wiley, 2008.
- BARBIR, F. **PEM Fuel Cells: Theory and Practice**. Academic Press, 2012.
- LARMINIE, J.; DICKS, A. **Fuel Cell Systems Explained**. Wiley, 2003.
- HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. McGraw-Hill Education, 1988.
- HOME POWER SOLUTIONS**. Disponível em: [www.homepowersolutions.de](http://www.homepowersolutions.de). Acesso em: 20 nov. 2024.
- HYBITAT**. Disponível em: [hybitat.tech](http://hybitat.tech). Acesso em: 20 nov. 2024.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY**. *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities*. Paris: IEA, 2019. Disponível em: [www.iea.org](http://www.iea.org). Acesso em: 20 nov. 2024.
- UNITED STATES. Department of Energy. Hydrogen and Fuel Cells Program: Hydrogen Storage**. Washington, D.C.: U.S. DOE, 2020. Disponível em: [www.energy.gov](http://www.energy.gov). Acesso em: 20 nov. 2024.
- FUEL CELL & HYDROGEN ENERGY ASSOCIATION**. *Fuel Cell Basics*. 2020. Disponível em: [www.fchea.org](http://www.fchea.org). Acesso em: 20 nov. 2024.

# ANEXO 1 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS HYBITAT



**Join the hydrogen revolution**

Let the future happen with the greenest energy storage technology.

**Be part of the energy change.**

Achieve energy independence and cost savings in:

- Residential buildings
- Micro businesses
- Public buildings & infrastructures

**Energy transition context: the use of electricity and the production of energy from renewable sources is on the rise, but so is the need to make it available at all times, even beyond the hours when it is produced.**

Hybitat revolutionizes this dynamic introducing an innovative energy production and storage system based on green hydrogen. It allows users to store and utilize energy whenever it is needed, freeing them from suppliers and price fluctuations.

Unlike other technologies, the storage of hydrogen generated from water and powered by renewable sources makes Hybitat the winning choice in the sustainability challenge.



Hydrogen storage for a sustainable future.

HQ via San Martino 12, 20122, Milano  
info@hybitat.tech  
www.hybitat.tech

**Detached homes, apartment buildings, and businesses. They can all benefit from Hybitat energy storage.**

Hybitat units are scaled to the typical requirements of a home. Multiple systems can be installed in a modular way, as storage and/or power demand increases.

Power input	2.4 + 4.8 kW
Power output	2.5 + 8 kW
Output voltage	230V AC
Electrical configuration	monophasic
Net H2 storage	40kWh
Core module dimensions	900 x 600 x 1600mm <small>depth x width x height</small>
Core module max weight	300 kg
Storage module dimensions	250 x 600 x 1600mm <small>depth x width x height</small>
Storage module max weight	350 kg
Installation layout	indoor / outdoor

Hybitat uses a technology that allows high energy storage at low pressure. The result is a compact, affordable system that translates into lower costs, better return on investment, and greater energy independence.

**Hybitat puts the focus on freedom.** Choose from a variety of finishes and customize the system to integrate it perfectly with the environment.



Discover the wide range of different materials and colors and customize the panels of the system to suit all types of needs and tastes.

Choose whether to cover it with a finish that would emphasize its design, or to blend it completely into the surrounding environment by applying the same finish as the context in which it will be integrated.

**The choice is yours.** Hybitat provides standard modules that can be adapted to suit all types of buildings.

<p><b>STANDARD</b></p> <p><b>For private houses</b></p> <p>1 core unit 1 storage unit</p>	
<p><b>GREATER AUTONOMY</b></p> <p><b>For apartment buildings</b></p> <p>1+ core unit 2+ storage unit</p>	
<p><b>MORE POWER</b></p> <p><b>For large buildings</b> SMEs, public sector</p> <p>2+ core unit 2+ storage units</p>	

Modularity and configuration flexibility are the key elements for integrating the system into any space and adapting it to any needs.

The Hybitat system can be configured in many different ways that meet power and capacity requirements through the pairing of multiple storage or core modules.

Both storage and core modules can be configured indoors, outdoors, or mixed, adapting to any space requirements.