

ARTIGO DE REVISÃO

Hidrogênio natural: convertendo o conhecimento exploratório de óleo e gás para a diversificação energética

Natural hydrogen: leveraging oil and gas exploration expertise for energy diversification

¹Marielli Wesz Vogado , ²Alexandre de Andrade Ferreira , ²Fabricio da Silva Ogorodnik , ²Erica Tavares de Moraes , ²Fernando Jorge Pedrosa Maia Junior 

¹Petrobras, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, marielli@petrobras.com.br (Autor correspondente)

²Petrobras, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

RESUMO

O hidrogênio natural tem se destacado globalmente como um recurso natural promissor na transição energética. Diante das mudanças climáticas e da urgência em diversificar as fontes de energia para reduzir as emissões de gases poluentes, o hidrogênio surge como uma alternativa viável devido à sua alta densidade energética em massa. Este trabalho foca na prospecção do hidrogênio de origem natural e objetiva revisar os principais conceitos e fundamentos relacionados a esse emergente recurso, estabelecendo correlações com o sistema petrolífero, no intuito de promover a transferência de conhecimento entre os dois sistemas. Além disso, propõem-se um fluxo de trabalho para a investigação do hidrogênio natural. Visa, ainda, disseminar conhecimento sobre o tema e contribuir para o avanço da compreensão desse recurso no país. A prospecção de hidrogênio se inicia com a interpretação de dados geoquímicos de superfície, dados sísmicos, de multifísica e de gama espectrometria existentes, e reconhecimento de depressões subcirculares, quando aplicável, a fim de selecionar os alvos a serem avaliados *in loco*. No campo, devem ser realizadas medições estáticas e dinâmicas das exsudações de hidrogênio. A identificação do sistema de hidrogênio ativo compreende o estudo dos mesmos elementos do sistema petrolífero, como geração, que é definida através da análise de dados e mapas geológicos, a fim de rastrear rochas e processos associados à geração de hidrogênio; migração, que visa compreender as rotas preferenciais percorridas pelo gás, caracterizadas pela interpretação do arcabouço estrutural, com especial atenção às falhas profundas; reservatório, que deve apresentar boas propriedades permo-porosas, com caracterização baseada em amostras de campo ou análogos; e a trapa, com reconhecimento sísmico da geometria e camadas selantes. Em suma, a aplicação de conhecimentos advindos da exploração de hidrocarbonetos pode facilitar o avanço nas técnicas de prospecção do hidrogênio, contribuindo para a elaboração de modelos mais precisos e específicos para este potencial recurso.

Palavras-chave: hidrogênio natural, hidrogênio geológico, prospecção de hidrogênio, diversificação energética, sistema de hidrogênio.

ABSTRACT

Natural hydrogen has emerged globally as a promising natural resource in the energy transition. In the face of climate change and the urgency to diversify energy sources to reduce pollutant emissions, hydrogen emerges as a viable alternative due to its high mass energy density. This work focuses on the prospecting of naturally occurring hydrogen and aims to review the main concepts and fundamentals related to this emerging resource, establishing correlations with the petroleum system to promote knowledge transfer between the two systems. Furthermore, it proposes a workflow to investigate natural hydrogen. Hydrogen prospecting begins with the interpretation of existing geochemical data, seismic data, multiphysics data, and gamma spectrometry, as well as the recognition of subcircular depressions, when applicable, to select targets for evaluation. In the field, static and dynamic measurements of hydrogen exudations should be conducted. The identification of the active hydrogen system involves studying the same elements as the petroleum system, such as generation, which is defined through data and geological maps analysis to trace the rocks and processes associated with hydrogen generation; migration, which aims to understand the preferential pathways taken by the gas, primarily characterized by the interpretation of the structural framework, with particular attention to deep faults; reservoir, which should exhibit good perm-porous properties, characterized based on field samples or analogs; and trap, with seismic recognition of the geometry and sealing layers. In summary, applying knowledge derived from hydrocarbon exploration can facilitate advancements in hydrogen prospecting techniques, contributing to the development of more precise and specific models for this potential resource.

Keywords: natural hydrogen, geological hydrogen, hydrogen prospecting, energy diversification, hydrogen system.

1. INTRODUÇÃO

O planeta Terra atravessa um momento de fortes alterações no setor de energia, em virtude das mudanças climáticas e da necessidade urgente de redução das emissões de gases poluentes visando à mitigação do aquecimento global. Nesse sentido, as companhias de petróleo, ainda que com o foco principal na recomposição de reservas, estão buscando diversificar seus negócios, incluindo em seus portfólios alternativas de energias de baixa emissão de carbono, utilizando a própria receita dos combustíveis fósseis para subsidiar, no médio e longo prazo, a transição energética justa (Brasil, 2024a).

No Brasil, a Petrobras assume o protagonismo nesse processo ao trabalhar pela redução de emissões sem abdicar de seu papel fundamental como fornecedora de energia primária no país, por entender que a segurança energética é uma premissa para a diversificação de seus negócios. Com base em seu Plano de Negócios 2025-2029, a empresa expande a sua atuação ao integrar energias renováveis em sua carteira de investimentos, enquanto explora soluções que minimizem impactos ambientais e sociais, em linha com as diretrizes energéticas brasileiras (Petrobras, 2025). Nesse contexto, as ações de descarbonização têm ganhado mais relevância, à medida que a redução progressiva da proporção de carbono nas fontes de energia tem se mostrado mais necessária.

De acordo com Rifkin (2012) e Castelvechhi (2022), cada uma das revoluções industriais foi impulsionada por um novo insumo energético principal, essencial para seus avanços tecnológicos e transformações sociais. A Primeira Revolução Industrial adotou o carvão mineral para máquinas a vapor, enquanto a Segunda incluiu o petróleo e gás aliados à eletricidade, impulsionando a indústria automobilística e a eletrificação. Já a Terceira admitiu a ascensão da energia nuclear e o início das renováveis junto da tecnologia da informação, ao passo que a Quarta foca na eficiência e expansão das renováveis com a inserção do hidrogênio. Logo, é possível admitir que essa busca por energia tem moldado a lógica do desenvolvimento social e, por isso, pauta as inovações tecnológicas.

Segundo Ortiz (2003), isso teria uma relação direta com a disponibilidade desses recursos, pois aumenta a sua utilidade econômica, a ponto de justificar os investimentos em tecnologia suficientes à viabilidade de seu aproveitamento econômico. É nesta conjuntura que o hidrogênio tem se mostrado um insumo energético promissor, tanto em função de características energéticas quanto em sua aplicabilidade em substituição a outras fontes fósseis. Isso implica que, segundo Rifkin (2003), o gás hidrogênio deve assumir maior protagonismo no

futuro, o que demanda um conhecimento maior a respeito da exploração do hidrogênio, sobretudo no Brasil.

O objetivo deste artigo é de revisar os principais conceitos e fundamentos teóricos acerca do hidrogênio natural, correlacionar os elementos do sistema petrolífero com aqueles do chamado "sistema de hidrogênio", apresentando exemplos da literatura, e propor um fluxo de trabalho para a definição de locação exploratória para investigação deste recurso natural. Além disso, este artigo visa ainda disseminar o conhecimento sobre o tema para a comunidade acadêmica e para a indústria do petróleo, de modo a contribuir com o avanço no entendimento do sistema de hidrogênio natural no país. O artigo discorre sobre os elementos do sistema de hidrogênio em duas seções principais com fins distintos: uma sobre o sistema de hidrogênio natural, que mostra um apanhado bibliográfico com exposição de pontos de vista diversos entre os autores abordados, e outra que discute cada elemento sob a ótica do fluxo de trabalho proposto adiante.

2. A EXPLORAÇÃO DO HIDROGÊNIO

2.1. Por que hidrogênio?

O hidrogênio foi descoberto em 1766 por Henry Cavendish, que identificou o gás ao produzir bolhas em uma reação entre ácidos e metais, tendo reconhecido sua característica altamente inflamável (Cavendish, 1766). O gás foi, no entanto, nomeado como "*hydrogène*" em 1783, que significa "gerador de água", por Antoine Lavoisier, tendo sido então reconhecido como um elemento químico (Lavoisier, 1789).

O hidrogênio é o elemento químico mais leve e abundante do universo, correspondendo a, aproximadamente, 90% em número de átomos e 75% em massa. O Sol é composto por 74% de hidrogênio e 24% de hélio, sendo o hidrogênio o principal combustível para as reações de fusão nuclear, que é a fonte de energia de praticamente todo o sistema solar (NASA, 2014). Essas características evidenciam seu grande potencial energético.

No seu estado natural e sob condições normais, o hidrogênio é um gás incolor, inodoro e insípido. Possui alta densidade energética em massa e seu uso como fonte renovável para a geração de energia elétrica e térmica vem sendo amplamente pesquisado, especialmente por ser uma fonte de baixa ou nenhuma emissão de poluentes (Vargas et al., 2006). Tal característica tem conferido ao gás hidrogênio o papel de principal candidato a sucessor dos combustíveis fósseis (Saliba-Silva e Linardi, 2008).

No que tange aos setores de aplicação, o hidrogênio é utilizado como matéria-prima para fins industriais, como refino do petróleo e produção de amônia, principalmente, na descarbonização de indústrias intensivas em carbono (p. ex., siderurgias, cimenteiras), além do uso como combustível para foguetes e na propulsão de cápsulas espaciais (IEA, 2019; EPE, 2022). Com pesquisa e desenvolvimento mais avançados, o hidrogênio pode ser utilizado diretamente para a geração de energia elétrica, aquecimento doméstico, no setor de transportes e para exportação (Lepecki, 2011; Albrecht et al., 2020). Seu uso para mobilidade é possível através da aplicação de Células a Combustível (FCEV - *Fuel Cell Electric Vehicle* - ou apenas FC), onde o hidrogênio reage com oxigênio para gerar energia, que, por sua vez, move os motores elétricos do veículo. O subproduto desta reação é apenas vapor de água. O hidrogênio pode também ser diretamente usado como combustível, sendo queimado num motor interno à combustão (IFPEN, 2022).

A molécula de hidrogênio, H₂ ou dihidrogênio, ocorre naturalmente no planeta Terra. No entanto, está majoritariamente ligada a outros elementos, formando hidrocarbonetos (p. ex., metano), água e biomassa. Para separá-la, é preciso realizar processos que usam energia, sendo, por isso, classificada como um vetor energético (Saliba-Silva e Linardi, 2008). Sua ocorrência na forma molecular é limitada ao hidrogênio natural. A separação do hidrogênio de outros compostos é obtida a partir de uma ampla gama de rotas de produção, sendo as mais comuns a reforma a vapor do metano e a eletrólise da água (Blay-Roger et al., 2024). De acordo com Prinzhofner et al. (2018), o hidrogênio de fonte natural é mais barato do que aquele produzido sinteticamente.

2.2. Hidrogênio natural

O hidrogênio natural ou geológico é encontrado sob a forma molecular (H₂) em reservas naturais. Tem sido amplamente classificado por diversos autores como um recurso de energia renovável (Zgonnik, 2020; Arrouvel e Prinzhofner, 2021; Rigollet e Prinzhofner, 2022; Wang et al., 2023; Hand, 2023; Prinzhofner e Cacas-Stentz, 2023; Gaucher et al., 2023), uma vez que alguns processos de geração são compatíveis com a escala de tempo humana.

Paralelamente, há pesquisadores que argumentam que o hidrogênio pode ser traçado e preservado (Holland et al., 2013; Heard et al., 2018; Warr et al., 2019), evidenciando suas possibilidades de armazenamento em sistemas geológicos. Outras nomenclaturas podem ser encontradas na literatura para se referir ao hidrogênio natural, a saber: hidrogênio geológico; hidrogênio branco, hidrogênio dourado e hidrogênio geogênico.

Os ambientes geológicos mais propícios a ocorrências de hidrogênio, baseados em evidências de campo, laboratório e teóricas, são o embasamento de áreas cratônicas, bacias de crosta hiper estiradas, ofiolitos, bacias ricas em potássio e cordilheiras meso-oceânicas. Contudo, o hidrogênio ocorre em uma grande variedade de ambientes geológicos (Smith et al., 2005, Zgonnik, 2020).

Embora a compreensão do sistema de hidrogênio esteja ainda em seus primórdios, o número de poços, as descobertas de potenciais depósitos e as companhias envolvidas estão crescendo rapidamente, como apresentado na Figura 1 (Zgonnik, 2020; Blay-Roger et al., 2024). Zgonnik (2020) ressalta que a alta densidade das ocorrências no Leste Europeu e norte da Ásia é devido ao fato de que pesquisadores dessas regiões buscaram por hidrogênio mais frequentemente e não porque essas regiões são mais ricas em hidrogênio.

O hidrogênio pode ocorrer na forma de gás livre, em inclusões ou dissolvido em aquíferos (Zgonnik, 2020). Enquanto diversos projetos de pesquisa surgem em todo o mundo, informações detalhadas sobre locações, custos, teores e volumes são mantidas em sigilo (Blay-Roger et al., 2024). Mosquera-Rivera et al. (2025) conduziram um estudo estatístico das ocorrências globais de hidrogênio natural, com teores acima de 10%, totalizando 411 pontos, sendo, deste total, 330 advindas do compilado de Zgonnik (2020), e concluem que este levantamento não representa o potencial global do recurso, dada a fase imatura da exploração. Os autores ainda apontam que há clara correlação das ocorrências de hidrogênio com a existência de zonas de falhas ativas e limites de províncias geológicas, sugerindo que a área de influência destas estruturas é da ordem de 40 a 60km de distância.

No Brasil, além da detecção de hidrogênio na Bacia do São Francisco, que consta na Figura 1, no Estado de Minas Gerais (Prinzhofner et al., 2019; Donzé et al., 2020; Moretti et al., 2021), outras ocorrências foram catalogadas em mapa divulgado pela EPE (2025). A porção baiana da Bacia do São Francisco foi alvo de investigação da Petrobras, com constatações de teores de hidrogênio exsudando em superfície (Petrobras, 2024). Há ocorrências de hidrogênio reportadas também na Faixa Ribeira, em Maricá - RJ (Prinzhofner et al., 2024); ao sul da Bacia do Paraná, nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul (Serrat et al., 2024); na Bacia do Parecis, em Mato Grosso, sendo as indicações ainda interpretativas e sem medições diretas (Loureiro et al., 2024); além de evidências na Faixa Araguaia em Tocantins e no noroeste da Província Borborema, no Ceará (EPE, 2025).

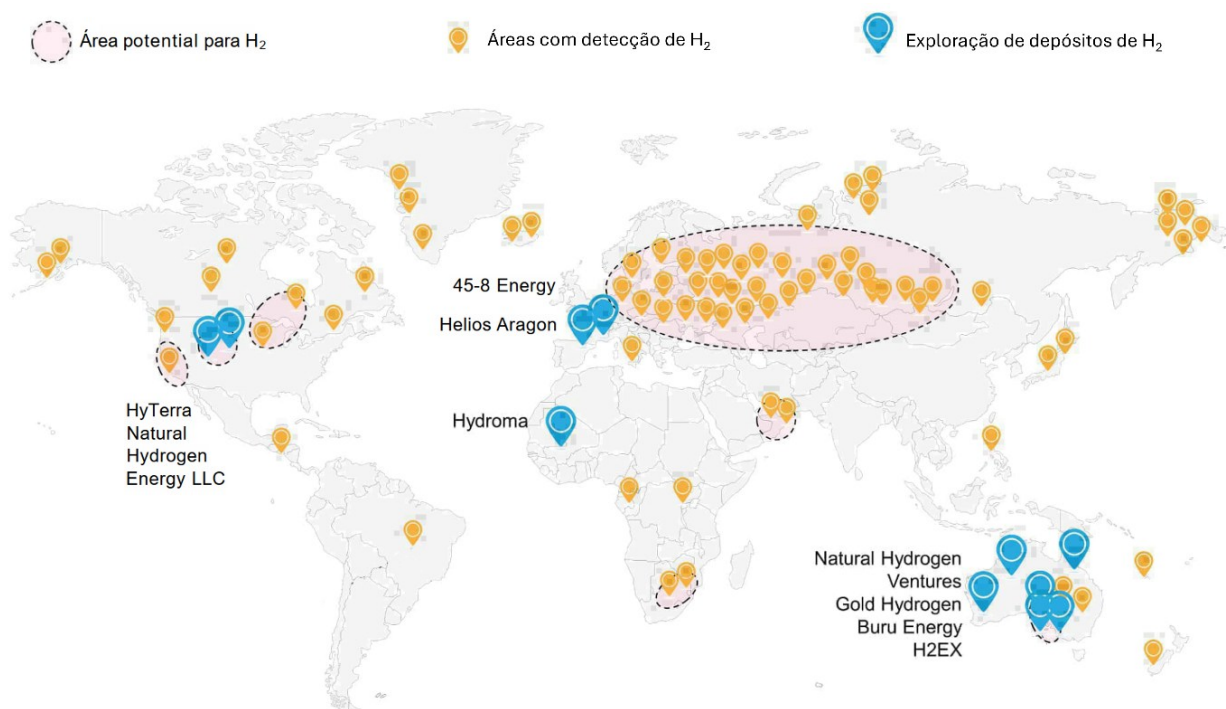


Figura 1. Mapa de localização das ocorrências de hidrogênio, destacando aquelas onde a exploração está em curso, com algumas das principais companhias envolvidas (Blay-Roger et al., 2024, baseado em Zgonnik, 2020).

O hidrogênio natural ocorre normalmente associado a metano, nitrogênio e hélio (Prinzhofer e Cacas-Stentz, 2023). Entretanto, algumas características são bastante particulares e conferem uma natureza muito específica ao sistema de hidrogênio. Ele é muito reativo e, havendo oxigênio disponível, reage com este, gerando água; é consumido por microorganismos, sendo para eles rica fonte de energia. Por seu caráter altamente difusivo, associado aos fatores mencionados, é improvável que seja retido em trapas por longos períodos de tempo (Epelle et al., 2022; Zgonnik, 2020).

O gás hidrogênio, por ser incolor, sem cheiro e não tóxico, pode ser facilmente negligenciado durante a perfuração de poços de petróleo. Por vezes, este pode ser identificado mais tarde do que outros gases: na Rússia, em Khibiny, o hidrogênio foi descoberto somente 20 anos após o início das pesquisas (Zgonnik, 2020). A detecção de hidrogênio em tempo real tem limitações pois o mesmo pode reagir com o fluido de perfuração e pode também ser gerado por metamorfismo de broca (Strapoć et al., 2022; Pengg et al., 2025).

2.3. A regulação do hidrogênio no Brasil e no mundo

A regulação é uma prática de intervenção estatal que visa melhorar o funcionamento do mercado e alcançar os objetivos sociais não contemplados pelo mesmo. Segundo Viscusi et al (2005), regular um setor ou uma indústria implica dizer que o seu desempenho é determinado tanto pelas forças de mercado quanto pelas

da relação e seus complexos processos administrativos. Logo, torna-se essencial que os setores produtivos com maturidade tecnológica em desenvolvimento sejam contemplados com políticas energéticas de fomento.

No contexto mundial, de acordo com Ball e Czado (2024), os instrumentos regulatórios sobre o hidrogênio natural ainda se mostram, em geral, incipientes. Austrália, França, Polônia e Colômbia saíram na frente com leis específicas, porém podem ser considerados como exceções. Nos EUA, por exemplo, a regulamentação difere em cada estado. Wyoming aplica as leis de petróleo e gás natural pré-existentes, enquanto o Texas foca na formulação de políticas por um conselho. Kansas e Nebraska, por sua vez, já tem atividades exploratórias em andamento, indicando um interesse prático no potencial do hidrogênio natural nesses estados, especialmente. Nenhum deles, entretanto, dispõem de um arcabouço legal específico e abrangente dedicado exclusivamente ao hidrogênio natural.

Analogamente, no Canadá a regulação deste recurso também ocorrerá, provavelmente, de forma fragmentada entre as províncias, à medida que o conhecimento do potencial geológico e a viabilidade técnico-econômica crescem (Generation Energy Council, 2018). No Mali, onde se encontra a principal descoberta global de hidrogênio, a exploração ocorre sem instrumento legal específico e sob permissão estatal. Esta situação representa uma lacuna regulatória que, ao contrário de jurisdições com quadros legais explícitos — como os Estados Unidos e a União Europeia — cria

incertezas para os investidores e restringe o desenvolvimento do setor (Abiri-Franklin et al., 2025).

Quanto ao contexto brasileiro, a construção de um marco legal para o hidrogênio de baixo carbono não ocorreu de forma linear. Isso porque a legislação prévia sobre temas de energia, embora não endereçasse diretamente o hidrogênio, estabeleceu as bases legais para a exploração de recursos naturais e a regulação do setor energético.

A Constituição Federal do Brasil, de 1988, ao definir a propriedade dos recursos minerais e a necessidade de proteção ambiental, estruturou um contexto para as futuras regulamentações. A Lei nº 9.478/1997 (Lei do Petróleo), com a criação da Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), instituiu um modelo regulatório aos hidrocarbonetos que, posteriormente, serviria de referência também para o hidrogênio.

Antes da criação da ANP já haviam sido publicadas algumas resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) sobre licenciamento ambiental, como a Resolução nº 001/1986, a Resolução nº 237/1997 e os padrões de qualidade ambiental, em função de outras atividades econômicas. Isso também serviu de base para direcionar o processo de licenciamento de projetos de hidrogênio.

Entretanto, o crescente interesse da sociedade pelas energias renováveis e a intensificação dos debates sobre descarbonização fortaleceram discussões sobre o hidrogênio no cenário político-energético brasileiro, sobretudo quando grupos de interesse variados passaram a se articular de forma mais efetiva para esse fim. Assim, iniciativas de pesquisa, desenvolvimento e inovação, conduzidas por universidades e outras instituições, propiciaram o reconhecimento do potencial do hidrogênio como um vetor e uma fonte energética significativos para o país, mas que esbarrou na presença de barreiras regulatórias para o seu desenvolvimento.

É neste contexto que o ano de 2024 representou uma mudança para o hidrogênio no país, com a aprovação de um conjunto de leis, normas e resoluções que estabeleceram as diretrizes para o desenvolvimento de uma economia do hidrogênio no Brasil com regras claras e definidas.

Primeiramente, a Lei nº 14.948/2024, mais conhecida como Marco legal do hidrogênio de baixo carbono, delineou princípios e incentivos para a produção e uso de hidrogênio com baixa intensidade de emissões, dentre os quais se destaca o hidrogênio natural, tendo em vista as potencialidades geológicas do país (Brasil, 2024b). Este mecanismo consolidou, deu força de lei e estabeleceu as diretrizes e instrumentos mais amplos para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2), instituído e regulamentado pela Resolução nº 6, de 23 de

junho de 2022, do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE).

Ademais, essa lei estabelece a criação do Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio (SBCH2), pilar essencial ao estabelecimento de um mercado de hidrogênio, considerando a sua baixa maturidade econômica. Com efeito, a lei reforçou a importância do papel do Governo Federal na coordenação da política do hidrogênio e sinaliza notoriamente ao mercado o seu interesse em investimentos no setor.

Assim, em agosto de 2024, a exploração do hidrogênio de baixo carbono, dentre os quais está incluído o hidrogênio natural, foi regulamentada pela Lei nº 14.948/2024. Este instrumento designou a ANP como a agência reguladora competente para toda a cadeia do hidrogênio, mais precisamente no Art. 13, no qual aponta que a exploração e produção de hidrogênio natural ou geológico no território nacional é regulada, autorizada e fiscalizada por esta autarquia.

Em seguida, conforme Brasil (2024c), a Lei nº 14.990/2024 foi promulgada com um duplo propósito: instituir o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC) e de alterar a Lei nº 14.948/2024. Isso instrumentalizou os incentivos à produção de hidrogênio de baixa emissão, dentro dos quais estão os manufaturados, pelo Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro).

Assim, verifica-se que a atuação da ANP será crucial na implementação do marco legal e seus desdobramentos. A Agência desenvolverá regulamentos infralegais detalhados à exploração e produção de hidrogênio natural, inspirando-se em sua experiência na regulação de petróleo e gás natural, sobretudo em segurança operacional das atividades do setor, como a Resolução ANP nº 46/2016, que institui o Sistema de Gerenciamento da Integridade de Poços (SGIP) (ANP, 2016). Cumpre ressaltar que a efetiva implementação das regulamentações pela ANP e dos demais órgãos competentes será fundamental para trazer segurança jurídica aos investidores dos mercados de hidrogênio no país, inclusive o hidrogênio natural, os quais embora sejam sim incipientes, mostram sinais de uma rápida estruturação regulatória face ao potencial energético brasileiro, especialmente em contexto de transição energética e da Quarta Revolução Industrial.

3. SISTEMA DE HIDROGÊNIO NATURAL

Os exploracionistas de petróleo, como também os pesquisadores da academia, são aqueles que estão buscando expandir os conhecimentos e melhor compreender os aspectos genéticos, de acumulação e

preservação do hidrogênio natural, além de propor os primeiros modelos de prospecção deste recurso. Talvez por isso a maioria dos artigos já publicados traga referências da indústria do petróleo, especialmente as analogias com o sistema petrolífero, como por exemplo os trabalhos de Prinzhofer e Cacas-Stentz (2023) e Tari (2025). Essa analogia também é adotada nesse trabalho,

especialmente pelo seu caráter didático. O conceito de sistema de hidrogênio natural que vem sendo construído, de fato, carrega semelhanças com o sistema petrolífero, entretanto é importante salientar e discutir as diferenças entre ambos. De um modo bastante geral, pode-se considerar os mesmos elementos nos dois casos, conforme a Figura 2:

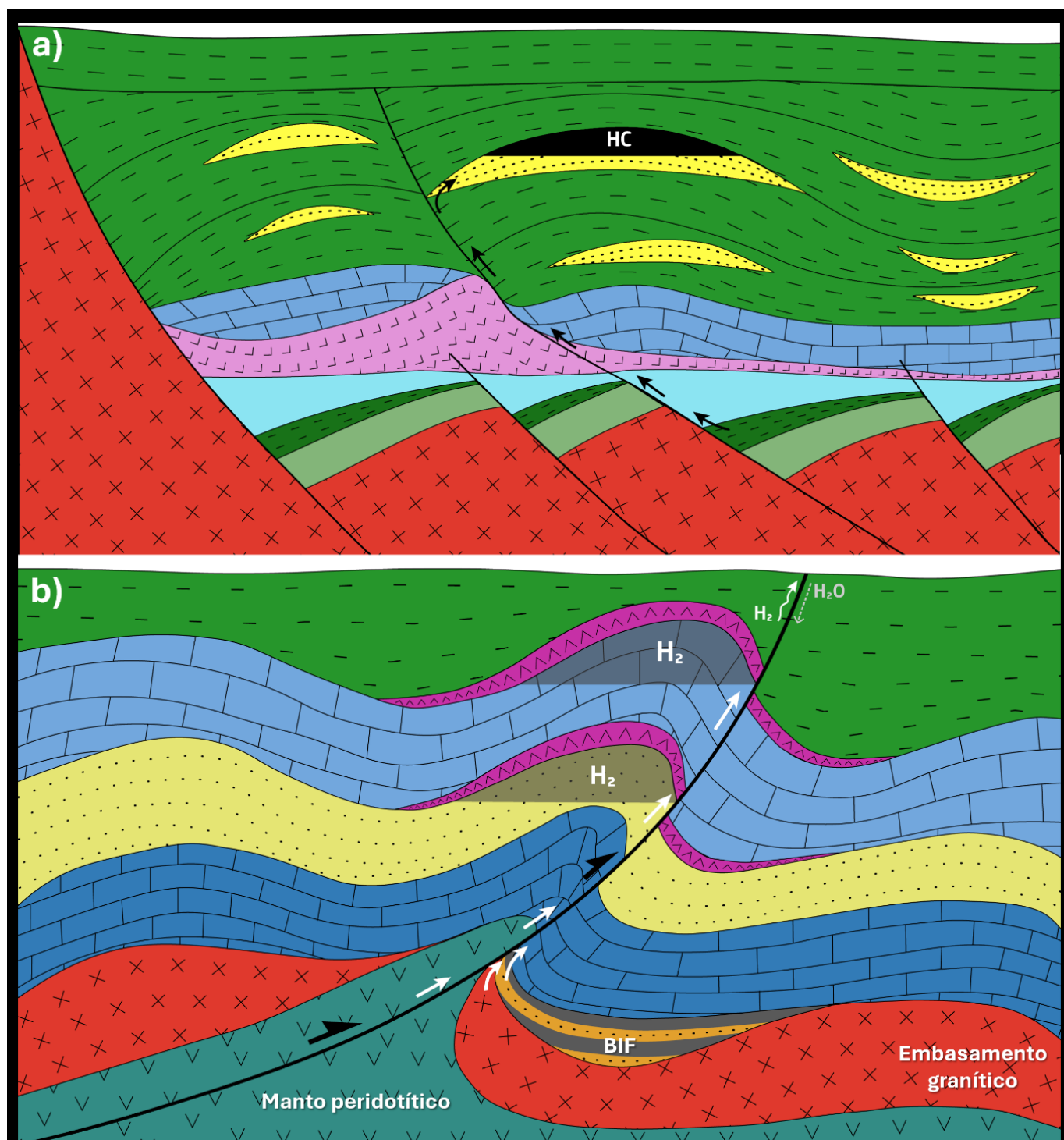


Figura 2. Modelo esquemático de comparação do sistema petrolífero (A) com o sistema de hidrogênio (B). Em b: o hidrogênio, gerado em profundidade por processos variados, aqui representados como serpentinização de peridotitos, oxidação de BIFs e radiólise de embasamento granítico, migra através de falhas até chegar às trapas, compostas por reservatórios areníticos e carbonáticos, seladas por diabásios.

- 1) Geração: Há diversos processos e rochas-fonte conhecidas, capazes de gerar hidrogênio.
- 2) Migração: As falhas são os principais caminhos de migração, mas há um papel subordinado da difusão.
- 3) Reservatório: Similarmente ao sistema petrolífero, é necessário um reservatório com permeabilidade e porosidade adequadas.
- 4) Trapa:
 - a. Geometria - a importância desse elemento não é objeto de concordância entre os pesquisadores. No entanto, a existência de geometria, e por conseguinte da trapa, beneficiaria efetivamente a economicidade.
 - b. Selo - Tampouco a opinião dos autores sobre a rocha selante é consensual. Fato é que a molécula de hidrogênio é muito pequena e altamente difusiva, necessitando de um selo bastante efetivo.
- 5) Sincronismo: Não há referências publicadas que tratam deste fator, mas acreditamos que ele tenha menor importância se o processo de geração de um dado sistema for contínuo. Desse modo, havendo os outros elementos a qualquer tempo, é possível ter um sistema ativo de hidrogênio natural.

As exalações de hidrogênio na superfície ocorrem numa ordem de magnitude em torno de cinco vezes maior que aquelas de hidrocarbonetos (Prinzhofer e Cacas-Stenz, 2023). Pelo mesmo motivo, o selo precisa ser bastante efetivo para ter a capacidade de reter o hidrogênio na trapa. Ainda assim, o tempo de residência é menor. Evidências e observações de campo apontam para um tempo de residência estimado entre 10 e 100 anos, o que implica dizer que a natureza tem capacidade de repor o hidrogênio produzido num tempo similar à escala humana. Logo, o sistema de hidrogênio seria renovável e dinâmico, embora seja pouco conhecido e necessite de ampla pesquisa para melhor compreensão (Prinzhofer e Cacas-Stenz, 2023).

A seguir, serão apresentados os elementos do sistema de hidrogênio em maior detalhe, fundamentados por exemplos da literatura.

3.1. Geração

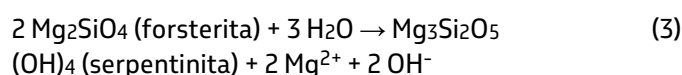
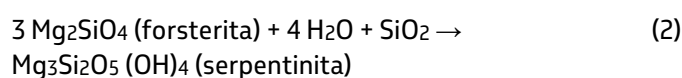
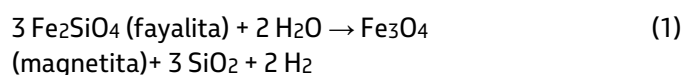
Diversos mecanismos geológicos têm sido propostos para explicar a gênese do hidrogênio natural. Em função de seu caráter muito difusivo, ele provavelmente não é gerado *in situ*. Sua grande reatividade e mobilidade indicam que as fontes de hidrogênio devem ser relativamente novas, ao menos no nível crustal (Molchanov, 1981; Voitov e Osika 1982 apud Zgonnik, 2020). As hipóteses para a origem do hidrogênio natural são expostas a seguir.

3.1.1. Fontes abióticas

3.1.1.1. Serpentinização

A serpentinização é um processo metamórfico no qual minerais de rochas ultramáficas, olivinas e piroxênios são oxidados, pela água, à serpentinita, produzindo hidrogênio sob condições de alta temperatura e pressão (Hahn-Weinheimer e Rost, 1961; Thayer, 1966; Covey, 1972 apud Moody, 1976). Os peridotitos são as principais rochas constituintes do manto, sendo compostos majoritariamente por minerais silicáticos de Mg e Fe²⁺ (Figura 3).

A olivina, (Mg,Fe)₂SiO₄, é uma solução sólida entre forsterita (Mg₂SiO₄) e fayalita (Fe₂SiO₄). O ferro da fayalita se encontra no estado de oxidação 2⁺, sendo oxidado pela água a Fe³⁺, liberando o H₂, conforme a reação abaixo (equação 1). A forsterita, por sua vez, reage com a sílica restante, originando serpentinita, Mg₃Si₂O₅(OH)₄, como mostra a equação 2. A forsterita pode também reagir com água para gerar serpentinita e hidróxidos de magnésio, aumentando o pH da solução, conforme a equação 3 (Mccollom e Bach, 2009):



A serpentinização geralmente resulta na formação de uma assembleia mineral composta por lisardita, crisotila, brucita, magnetita e antigorita (Moody, 1976). As expressões acima expressam uma simplificação dos processos que ocorrem em sistemas naturais.

A taxa de serpentinização é controlada por três variáveis: temperatura, pressão e razão água/rocha, em massa (Bernett, 1996). É reportado que a serpentinização é mais ativa na faixa de temperatura entre 200 e 310°C (Mccollom e Bach, 2009).

A serpentinização é considerada um dos principais processos responsáveis por algumas das mais altas concentrações de hidrogênio em exalações na superfície e em reservatórios em subsuperfície (Etiope et al., 2013 apud Milkov, 2022; Briere et al., 2017).

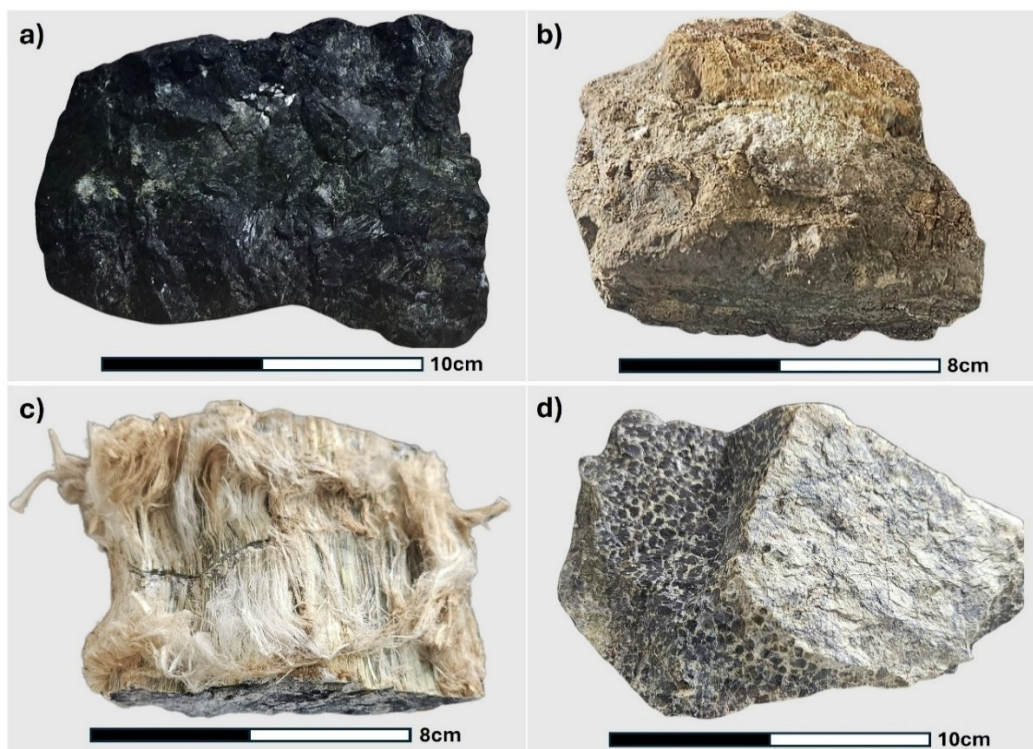


Figura 3. A. Piroxenito (tipo de peridotito rico em piroxênios), África do Sul. B. Serpentinito, idade pré-Cambriana, Paraíba do Sul - RJ. C. Crisotila, Quebec - Canadá. D. Dunito serpentinizado, de idade pré-Cambriana, Campo Formoso - BA.

3.1.1.2. Sistemas hidrotermais

Assim como a serpentinização, outras reações com oxidação de minerais ricos em ferro também produzem H_2 , como a alteração hidrotermal que ocorre sob condições ácidas, por meio da piritização (Figura 4),

exemplificada nas equações 4 e 5 (Klein et al; 2020; Arrouvel e Prinzhofer, 2021):

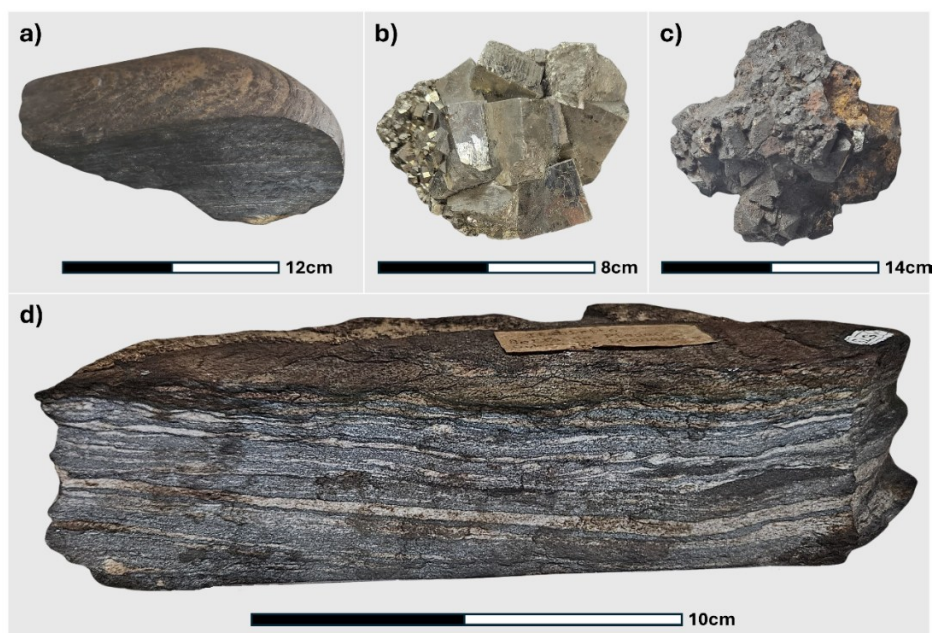
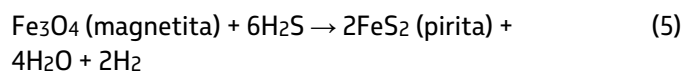
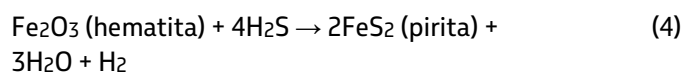
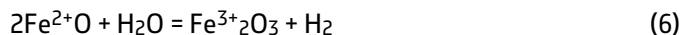


Figura 4. A. Hematita (em Itabirito), Sabará - MG. B. Pirita, Ilha de Elba - Itália. C. Magnetita, Ouro Preto - MG. D. Itabirito (BIF metamorfizado), Caeté - MG.

3.1.1.3. Oxidação do ferro de formações ferríferas bandadas (BIFs)

O intemperismo de BIFs (Figura 4D), em condições de temperatura e pressão amenas (abaixo de 50°C e 150 bar), através da circulação de água e oxidação do Fe^{2+} para Fe^{3+} , é capaz de gerar hidrogênio, independente do pH, conforme a reação 6, a seguir (Geymond et al., 2022):



Geymond et al. (2023) conduziram experimentos de reator com temperaturas entre 80 e 200°C, corroborando que a interação entre magnetita e água pode gerar hidrogênio em baixas temperaturas (próximas a temperatura ambiente) e propõem que as rochas ricas em magnetita sejam consideradas nas estratégias de exploração.

3.1.1.4. Radiólise

A radiólise da água também pode gerar hidrogênio, pois a energia do decaimento radioativo é forte o suficiente para romper as ligações da molécula de água, que é bastante estável. A crosta terrestre contém quantidades significativas de elementos radioativos, principalmente U, Th e K (Vernadsky, 1930; Vovk, 1982 apud Zgonnik, 2020), que, ao decaírem, geram radiação α , β e γ . Essa reação ocorre a qualquer condição de pressão e temperatura, onde a água seja estável, mesmo sendo gelo, vapor ou hidratos de sal (Klein et al., 2020).

As rochas graníticas apresentam uma composição mineralógica rica em elementos radioativos, como, por exemplo, o mineral apatita, que contém elevada concentração de urânio (Figura 5).

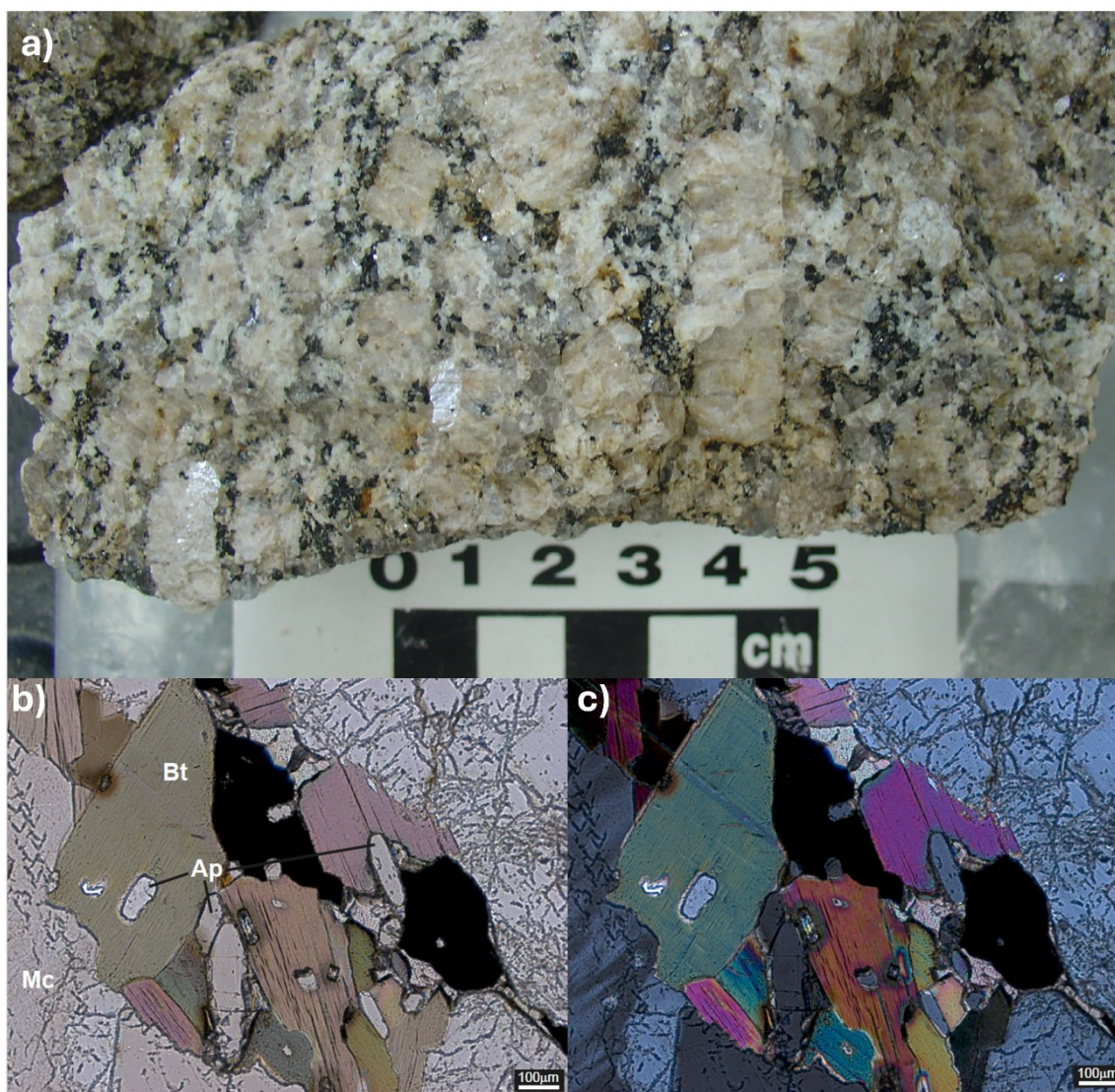
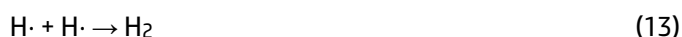
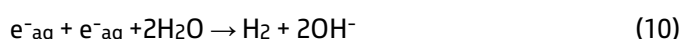
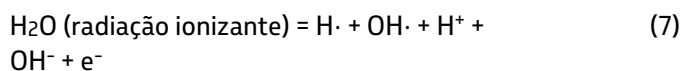


Figura 5. A. Amostra de granito, Serra do Frade - RJ. B. Fotomicrografia de granito com biotita, microclina e apatita - nicóis paralelos. C. Fotomicrografia de granito - nicóis cruzados.

A radiação ionizante, ao passar pela água, provoca excitação e ionização das moléculas, que leva a um aumento da sua reatividade e a formação de radicais livres, que se decompõem e se recombina conforme as reações 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13 (Pastina e LaVerne, 2001; Wang et al, 2019 apud Milkov, 2022):

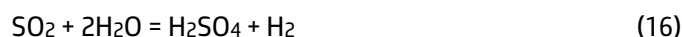


A maior parte da energia do decaimento radiogênico é absorvida pela matriz mineral e convertida em calor, enquanto uma pequena parte é absorvida pela água no poro. Portanto, a produção de H_2 é proporcional à porosidade da rocha preenchida com água (Lin et al., 2005b). Diversos estudos concluem que a geração de hidrogênio por esse processo seria limitada (Cidade, 1970; Savchenko, 1958 apud Zgonnik, 2020). Alguns estudos de radiólise da água no contexto de armazenamento de lixo nuclear mostraram que a produção de H_2 aumenta na presença de salmoura quando comparada à água pura, devido à reação dos íons dissolvidos (Cl^-) com os íons radicais ($\text{OH}\cdot$) formados a partir da quebra da molécula de água. A presença de certos minerais, como zeólitas, pode aumentar a produção de H_2 via radiólise, o que é importante para sistemas naturais e nos contextos de descontaminação radioativa da água (LaVerne e Tandon, 2005).

3.1.1.5. Fonte vulcânica

O hidrogênio é o terceiro gás mais prevalente em emanções vulcânicas, atrás de vapor d'água e CO_2 . Estudos de isótopos mostram que o hidrogênio liberado dos sistemas hidrotermais nas cordilheiras meso-oceânicas é de origem vulcânica (Apps e Van De Kamp, 1993). No entanto, outros autores consideram que são necessários mais estudos para se concluir sob a origem vulcânica do H_2 nos referidos ambientes (Lilley et al., 2003 apud Klein et al., 2020). A decomposição do H_2S na presença de água seria responsável pela geração de H_2 em

contextos de magmatismo/vulcanismo, conforme as equações 14, 15 e 16 (Evans et al., 1981; Gailard et al, 2011):



3.1.1.6. "Deep-seated" (manto/núcleo)

As observações dos mais variados trabalhos de que as concentrações de H_2 aumentam com a profundidade levaram alguns autores a concluir que a origem deste hidrogênio seria mantélica; as correlações positivas de concentrações de H_2 e He são argumentos a favor dessa hipótese (lyceb, 1997 apud Zgonnik, 2020), bem como baixos valores isotópicos do hidrogênio (menor concentração de deutério), similar aos valores primordiais do sistema solar (Ukhanov et al., 1987 apud Zgonnik, 2020); as condições redutoras do manto seriam favoráveis à geração de hidrogênio (Yang, 2016; Smith et al., 2016).

Smith et al. (2016) reportaram que a formação de diamantes, como o Cullinam, contém inclusões de uma fusão solidificada de ferro-níquel-carbono-enxofre, acompanhadas por metano e hidrogênio, confirmando a ocorrência de hidrogênio no manto. Outro estudo mostrou que o teor de H_2 é 140 vezes maior em diamantes formados a 400km de profundidade do que aqueles formados a 120km (Perchuk, 2000 apud Zgonnik, 2020).

Há ainda estudos que sugerem fonte de hidrogênio advinda do núcleo (Stevenson, 1977). O hidrogênio permite a resolução do problema de massa do núcleo, que deveria ser 10% mais leve se a composição fosse somente de ferro e níquel; hidretos de ferro são estáveis nas condições do núcleo e manto (Stevenson, 1977; Isaev, 2007). Vidavskiy e Rezaee (2022) revisitaram o conceito introduzido por Larin (1995) de "Terra primordialmente hidrídica" (em inglês: *Primordially Hydridic Earth - PHE*), segundo o qual, no momento da formação da Terra, o hidrogênio representava uma proporção significativa da composição química do planeta, estimada em 59% em número atômico ou 4,5% em massa (Larin, 1993). De acordo com Walshe (2005 apud Vidavskiy et al., 2024), o núcleo da Terra pode ser um "reservatório dominante de hidrogênio". Para Vidavskiy et al. (2024), essa proposição se correlaciona com o modelo PHE, postulando que diápiros enriquecidos em hidrogênio são formados na interface manto/núcleo (Figura 6), sendo posteriormente convertidos para a superfície através de zonas rifteadas, como as cordilheiras meso-oceânicas, por exemplo. Vidavskiy e Rezaee (2022) propõem estratégias de

exploração baseadas no conceito PHE, uma vez que o mesmo explica o hidrogênio de origem profunda, sem apresentar discrepâncias ou contradições óbvias.

O hidrogênio pode ser classificado em dois grupos: hidrogênio primário/primordial (armazenado no manto e no núcleo, o qual flui progressivamente em direção à superfície) e hidrogênio secundário (produzido no manto ou crosta por várias reações químicas) (Molchanov, 1981 apud Zgonnik, 2020).

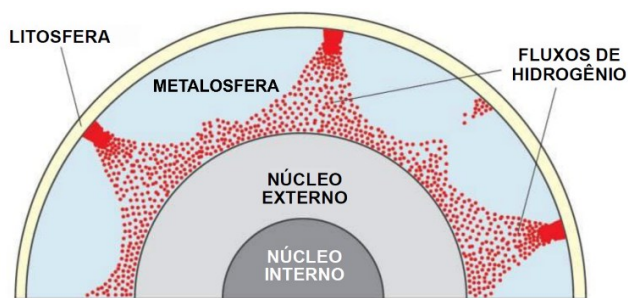


Figura 6. Fluxos de hidrogênio a partir do núcleo da Terra, composto de hidretos de metais (Vidavskiy et al., 2024, modificado de Larim, 1993).

3.1.1.7. Mecano-radicais

Outro mecanismo proposto é a geração de hidrogênio a partir da reação da água com rocha em zonas de falhas ativas, corroborada por experimentos onde a fricção é capaz de liberar o hidrogênio (Wakita et al., 1980). Outros estudos laboratoriais refutam essa teoria, postulando que o hidrogênio advindo de falhas ativas teria origem profunda (Sugisaki et al., 1983). Lefeuvre et al. (2025) realizaram experimentos em laboratório, simulando as condições de moagem em zonas de falhas durante terremotos, e concluíram que estes processos contribuem para a geração global de hidrogênio natural. Segundo os autores, o pH da solução, a razão água/rocha e a energia de moagem influenciam na produção de hidrogênio, sendo que pH mais ácido (entre 4 e 6), maior proporção de água e maior energia aplicada durante a moagem resultaram em maiores quantidades de hidrogênio.

3.1.1.8. Decomposição da amônia

O íon amônio, presente nas lâminas das argilas, ao ser decomposto, libera hidrogênio e nitrogênio (Dubessy et al., 1989, Li et al., 2009 apud Milkov, 2022).

3.1.1.9. Outras fontes

Além dos processos previamente descritos, outros mecanismos também contribuem para a geração de hidrogênio, tais como a decomposição do metano (Apps e Van De Kamp, 1993; Smith et al., 2005), hidratação da

biotita (Murray et al., 2022 apud Milkov, 2022; Briere et al., 2017), liberação de H₂ de inclusões fluidas etc. (Parnell e Blamey, 2017a apud Milkov, 2022).

3.1.2. Fontes bióticas

3.1.2.1. Atividade biológica

O hidrogênio também pode ser produzido biologicamente através dos processos de fermentação, degradação anaeróbica da matéria orgânica e por bactérias fixadoras de nitrogênio (Morita, 1999; Conrad, 1996). Para Morita (1999), a onipresença do hidrogênio na biosfera desde o início da vida, sua capacidade de penetrar na célula microbiana, sua baixa energia de ativação, sua capacidade de formar prótons e elétrons na presença de Fe²⁺ e seu papel em muitas reações bioquímicas tornam o hidrogênio fundamental para sobrevivência para células microbianas. No entanto, na natureza, juntamente com os microorganismos sintetizadores de H₂, coexistem também os que consomem H₂ (Nealson et al., 2005). De acordo com Gregory et al. (2019), a relação entre microorganismos que produzem e consomem hidrogênio é descrita como um processo sintrófico, onde a produção de hidrogênio durante a fermentação é rapidamente consumida, evitando a acumulação excessiva deste gás. No entanto, o estudo de Sanz et al. (2021) reporta que uma proporção significativa do hidrogênio detectado no Cinturão Ibérico de Pirita (*Iberian Pyrite Belt*) é produzida biologicamente.

3.1.2.2. Decomposição térmica da matéria orgânica

Alguns estudos mencionam que a decomposição da matéria orgânica pode ser uma possível fonte de hidrogênio. Experimentos mostram que até 10% de H₂ se forma durante a decomposição térmica do querogênio a 300°C (Bogomolov, 1976 apud Zgonnik, 2020; Briere et al., 2017). No entanto, nessa temperatura o hidrogênio formado seria imediatamente consumido em reações com oxigênio, caso disponível, para produzir água, que é termodinamicamente mais estável (Zgonnik, 2020). Hanson e Hanson (2023) apresentaram um modelo no qual processos termo-catalíticos complexos, que ocorrem durante a maturação da matéria orgânica, além de produzirem hidrocarbonetos, geram também grandes volumes de hidrogênio. O estudo destaca a importância dos reativos como argilas e carbono amorfo em diversas etapas, indicando que esses materiais catalisam reações que geram hidrogênio a temperaturas mais altas.

3.1.3. Exemplos da literatura para origem de hidrogênio natural:

- 1) Bacia do São Francisco, Brasil: Donzé et al. (2020) propõem geração de hidrogênio por radiólise e por serpentinização, com rochas fontes advindas do embasamento Arqueano a Paleoproterozóico, enriquecido em elementos radiogênicos, e com rochas máficas e ultramáficas. Freitas et al. (2024) sugerem que o hidrogênio gerado nessa bacia tenha também contribuição da oxidação de BIFs e kimberlitos.
- 2) Bacia de Taoudenni, Mali: assume-se a oxidação de rochas ricas em Fe^{+2} (BIF) e a redução da água como a principal origem do hidrogênio, sendo que os gases nobres têm assinatura crustal (Maiga et al., 2023).
- 3) Bacia de North Perth, oeste da Austrália: para o sistema de hidrogênio Moora-Pingarrega, Frery et al. (2023) propõem a oxidação de rochas arqueanas rasas, ricas em ferro, e a serpentinização de rochas máficas e ultramáficas cratônicas profundas. Já Vidavskiy et al. (2024) atribuem origem profunda para a geração do hidrogênio nessa região, proveniente da degaseificação do manto e núcleo (associado ao conceito PHE).
- 4) *Eastern Goldfields*, oeste da Austrália: hidrogênio gerado por serpentinização e radiólise (Boreham et al., 2021).
- 5) Bacia de Mauléon, Pirineus, França: hidrogênio gerado por serpentinização, associado a CO_2 , CH_4 e radônio (Rn) (Lefreuvre et al., 2022).
- 6) Sistema de *Rift Mid-Continet*, Kansas, EUA: Coveney et al. (1987) sugerem que o processo de serpentinização seja o responsável pela geração do hidrogênio na região; Guélard et al. (2017) corroboram essa origem, no entanto sugerem que também há contribuição de origem superficial, como fermentação biológica e processos relacionados a corrosão dos revestimentos de aço do poço.
- 7) Ofiolito Tekirova, Turquia: hidrogênio gerado por serpentinização, somando 9,9% do gás exalado e medido na superfície em Chimaera na Turquia, a famosa "Chama Eterna", associado a 87% de metano abiótico (Etiópe, 2023).
- 8) Ofiolitos, Albânia e Kosovo: A ocorrência de hidrogênio em fontes termais associadas a ofiolitos foi atribuída à origem por serpentinização (Lévy et al., 2023).

3.2. Migração

A mobilidade extremamente alta das moléculas de hidrogênio se deve à sua baixa massa molecular, que lhe confere propriedades difusivas, resultando em frequentes escapes (*seepages*) de gás na superfície (Maiga et al., 2024). Esse é um indicador de que a sua migração deve ser facilitada, inclusive com maior velocidade do que aquela com que migram os hidrocarbonetos. A migração do gás hidrogênio ocorre pelos mecanismos de difusão e advecção (Etiópe, 2023). A difusão corresponde ao transporte de fluidos por gradiente de concentração, de uma região mais concentrada para uma menos concentrada.

A advecção compreende a migração dirigida por gradiente de pressão e flutuabilidade, ou seja, aquela que ocorre por meio de falhas e fraturas. As falhas e fraturas representam um caminho natural para migração de fluidos e atuam como condutos preferenciais para migração vertical do gás hidrogênio (Johnsgard, 1988, *apud* Zgonnik, 2020). Diversos estudos associam a ocorrência de teores anômalos de hidrogênio com falhas e zonas fraturadas: Kansas, USA (Johnsgard, 1988 *apud* Zgonnik, 2020), Ucrânia e Bielorrússia (Shcherbakov e Kozlova, 1986 *apud* Zgonnik, 2020), região de Moscou, Rússia (Rogozhin et al., 2010 *apud* Zgonnik, 2020).

3.2.1. Exemplos da literatura para migração do hidrogênio natural:

- 1) Bacia do São Francisco, Brasil: migração do hidrogênio por difusão e advecção, por meio de falhas profundas rotacionadas (Prinzhofer et al., 2019; Donzé et al., 2020).
- 2) Bacia de *North Perth*, oeste da Austrália: migração através do complexo de falhas bacinais e do embasamento reativadas para o sistema de hidrogênio Moora-Pingarrega (Frery et al., 2023); para Vidavskiy et al. (2024), a migração do hidrogênio de origem profunda ocorre através da Falha Darling.
- 3) *Eastern Goldfields*, Oeste da Austrália: migração de hidrogênio por advecção e, secundariamente, por difusão (Boreham et al., 2021).
- 4) Bacia de Mauléon, Pirineus, França: migração de hidrogênio através do sistema de falhas de empurrão - *North Pirineum Frontal Thrust* (Lefreuvre et al., 2022), Figura 7.
- 5) Sistema de *Rift Mid-Continet*, Kansas, EUA: falhas profundas e sistemas de fraturas atuam como caminhos de migração para o hidrogênio gerado em profundidade (Coveney et al., 1987).

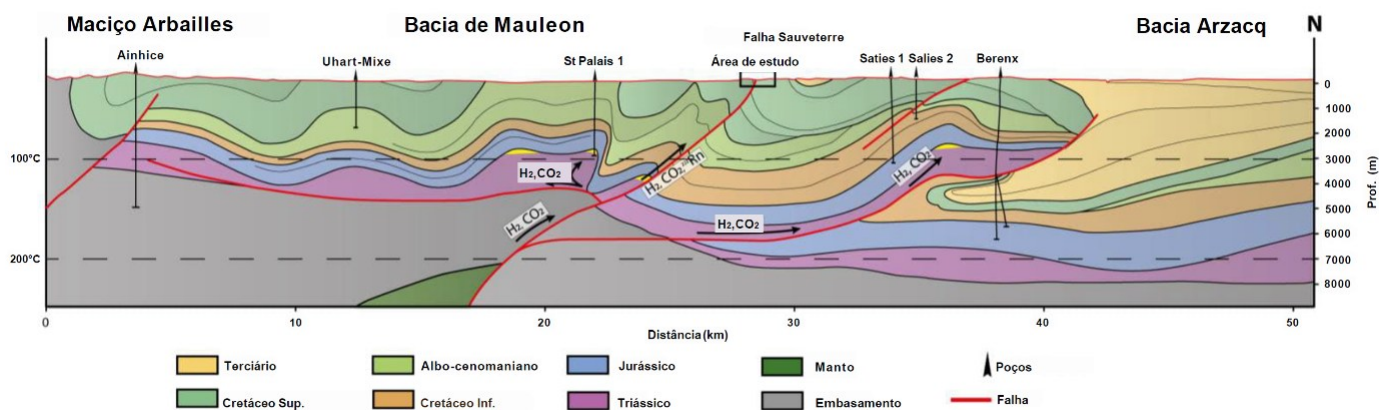


Figura 7. Seção geológica na Bacia Mauléon, Pirineus, representando os caminhos de migração e zonas de trapeamento de H_2 (Lefreuvre et al., 2022).

- 6) Ofiolito Tekirova, Turquia: hidrogênio migrado a partir de falhas (advecção), tendo contribuição subordinada da difusão (Etiopie, 2023).
- 7) Faixa Ribeira, Maricá - RJ, Brasil: caminhos de migração por falhas de empurrão profundas reativadas e suas falhas conjugadas (Prinzhofer et al., 2024).

3.3. Reservatório

O estudo dos reservatórios de hidrogênio, quando comparado ao de hidrocarbonetos, se inicia em estágio mais tardio, de acordo com Liu et al. (2023), já que primeiramente o foco recorre acerca da distribuição e gênese deste gás.

3.3.1. Exemplos da literatura para reservatórios de hidrogênio natural:

- 1) A ocorrência tipo de hidrogênio natural no mundo foi encontrada em Mali, a sudeste da Bacia de Taoudenni, na África. Em 1987, após a perfuração de um poço cuja finalidade era a prospecção de água e, no entanto, foi constatada a presença de um gás, a 110m de profundidade, contendo 98% H_2 , 1% CH_4 e 1% N_2 (Prinzhofer et al., 2018). Os reservatórios ocorrem a profundidades entre 30 e 1500 m, sendo compostos por calcários e arenitos, conforme Figura 8. Os calcários dolomíticos são carstificados, com porosidades variando de 0,2 a 14%, de idade neoproterozóica. O hidrogênio está acumulado nos *vugs*, produtos de porosidade secundária da matriz atribuída à circulação de fluidos hidrotermais. Os arenitos apresentam porosidades de 4,5 a 6,4%. O reservatório mais raso é o mais rico em hidrogênio, estando este em fase livre. Nos reservatórios mais profundos, o hidrogênio encontra-se dissolvido na água, o qual foi constatado inclusive no

embasamento fraturado. A solubilidade quase nula do hidrogênio em baixas pressões poderia explicar por que há, essencialmente, a presença de gás livre em reservatórios muito rasos e nenhuma grande acumulação de gás livre descoberta em profundidade. Após o poço descobridor, foram perfurados mais 24 poços de extensão, e todos constataram a presença de hidrogênio (Maiga et al., 2023).

- 2) Na Bacia de São Francisco, Donzé et al. (2020) reportaram que reservatórios carbonáticos carstificados do Grupo Bambuí, a 400 m de profundidade, são cruzados por sistemas de falhas, e podem servir como zonas de acumulação temporária de hidrogênio.
- 3) Sistema de *Rift Mid-Continent*, Kansas, EUA: os reservatórios são constituídos de arenitos, siltitos e calcários de idade devoniana a permiana (Coveney et al., 1987).
- 4) Na mina de cromita Bulqizë, na Albânia, ocorrem reservatórios falhados e rotacionados em maciço ofiolítico jurássico. Os resultados do estudo de Truche et al., (2024) demonstram a existência de fluxo de hidrogênio, somando concentração de 84 % em volume, concluindo que certos ofiolitos podem hospedar acumulações econômicas deste gás.
- 5) Bacia de Mauléon, Pirineus, França: calcários e dolomitos de idade triássica, com porosidades variando de 1 a 10% (Lefreuvre et al., 2022).
- 6) Outros exemplos: na Estônia, Ilha de Koksher, foi descoberta uma acumulação de gás com 79% de metano e 20,8% de hidrogênio em reservatórios glaciais. Na Rússia, o campo de gás Sarmatian, em Stavropol, contém 27% de hidrogênio em reservatórios miocênicos, além de alto conteúdo de nitrogênio, em torno de 20%. Na ilha de Oland, porção *offshore* da Suécia, estratos cambrianos contém gás natural com até 4,9% de hidrogênio (Smith et al., 2005; Zgonnik, 2020).

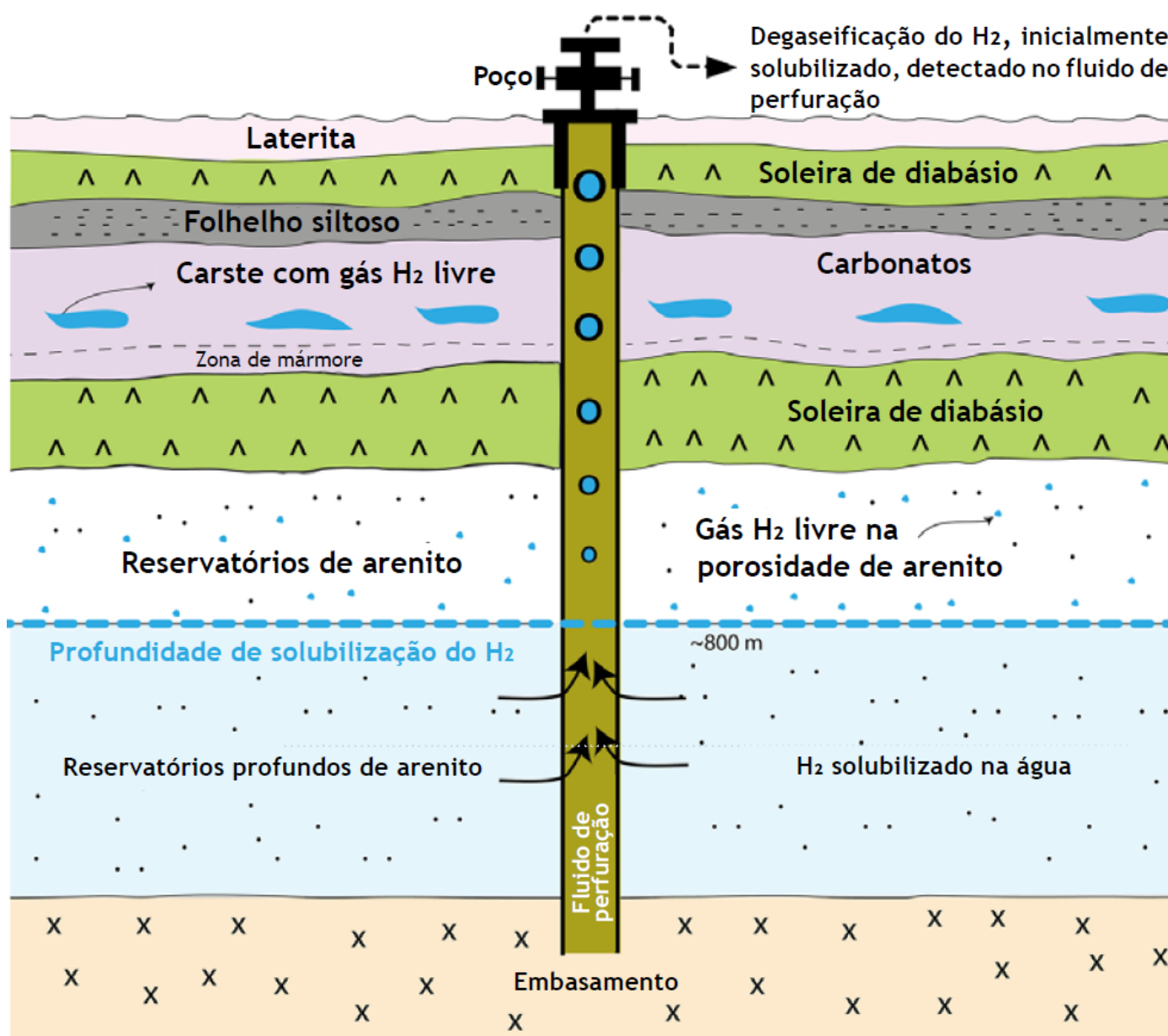


Figura 8. Modelo esquemático indicando a presença de hidrogênio, em fase livre, nos reservatórios carbonáticos e areníticos superiores, e dissolvido na água na sequência de arenitos mais profundos (Mod. de Maiga et al., 2023).

3.4. Trapa

Em um sistema petrolífero, o selo depende de elementos estruturais, litológicos, estratigráficos e de composição da trapa. Todavia, para o hidrogênio, em tese, haveria maior dificuldade de retenção devido à sua alta mobilidade (Prinzhofer et al., 2019). Acredita-se que rochas capeadoras de baixa permeabilidade, como evaporitos, apenas retardem a migração e perda por difusão em sistemas de hidrogênio. Desse modo, a acumulação de hidrogênio em um dado sistema pode ser alcançada quando a recarga de hidrogênio é maior do que as perdas por difusão (Prinzhofer et al., 2019). De acordo com Prinzhofer et al. (2018) e Maiga et al. (2023), em Mali, o poço Bougou-1 produz hidrogênio desde 2012,

atingindo uma vazão de 1.500 m³ por dia, no intervalo de 60 a 112 metros de profundidade, e a pressão na cabeça do poço não diminuiu com o tempo. Pelo contrário, a pressão subiu de 4,5 para 5 bar. Para os autores, isso mostra que a acumulação vem sendo continuamente recarregada em um sistema dinâmico. No entanto, é necessária produção em escala comercial para testar essa hipótese. Outro exemplo de recarga contínua são os fluxos de hidrogênio de Blue Pool, em Omã, onde o hidrogênio advindo de fontes profundas, provém da interação entre rochas ultrabásicas e soluções aquosas, causando oxidação do ferro e redução da água; os fluxos são enriquecidos de 60 a 88 % de hidrogênio, associados a metano abiótico (Deville et al., 2011; Liu et al., 2023).

3.4.1. Exemplos da literatura para o trapeamento de hidrogênio natural:

- 1) Em Mali, os reservatórios são selados por *sills* de diabásio (Maiga et al., 2024). Os diabásios apresentam espessuras entre 15 e 50 metros, sendo que acima de 20 metros os diabásios se tornam significativamente mais eficientes na retenção de hidrogênio (Maiga et al., 2024). A densidade de fraturas é outro fator muito importante, sendo que o diabásio selante contém baixa densidade de fraturas, enquanto diabásios abaixo do reservatório, com alta densidade de fraturas, permitem a migração e ascensão do hidrogênio até os reservatórios superiores. No entanto, em um dos poços de extensão foram descritas brechas. Estas desempenham o papel de rocha selante, embora sejam altamente porosas, devido à baixa solubilidade do hidrogênio na água em condições de baixa pressão e temperatura, em profundidades mais rasas, como já foi mencionado. Desse modo, pode ser sugerido que a água, em dadas rochas porosas, se comporta como um meio impermeável à passagem de hidrogênio nas condições descritas (Prinzhofer et al., 2018; Maiga et al., 2024). Em seu trabalho sobre os processos de trapeamento de hidrogênio no Campo de Mali, Maiga et al. (2024) concluem que a exploração de hidrogênio depende
- 2) da presença de um sistema de trapeamento eficiente.
- 2) Por outro lado, Everts et al., (2025) concluem, a partir da interpretação de dados geológicos, medidas de pressão e perfil de neutrão disponíveis, que a o trapeamento pelas soleiras de diabásio não é absolutamente eficiente, e o hidrogênio no campo de Bourakebougou está predominantemente dissolvido em água, com bolsões locais de hidrogênio livre, apenas.
- 3) Na Bacia de North Perth, oeste da Austrália, são reportados sal, folhelhos e aquíferos de baixa salinidade como responsáveis pela retenção do hidrogênio (Frery et al., 2023).
- 4) Na Bacia de Mauléon, Pirineus franceses, a trapa é composta por evaporitos e folhelhos sobrepostos a reservatórios porosos do triássico (Lefreuvre et al., 2022).

4. DISCUSSÃO

Baseado em pesquisas da literatura e no fluxo de trabalho que vem sendo elaborado e adotado pela Petrobras, resumimos, a seguir, as etapas a serem percorridas para a investigação da ocorrência de hidrogênio, culminando na proposição de uma locação de poço exploratório (Figura 9).



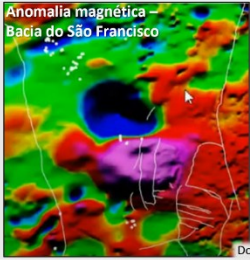
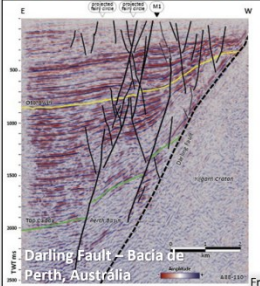

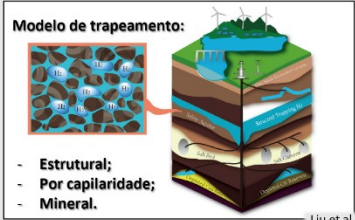

Pré-campo & Campo	
<p>Identificação remota de círculos de fada (<i>fairy circles</i>);</p> <p>Interpretação de dados sísmicos, multifísicos, gama espectrometria;</p> <p>Identificação de <i>seeps</i>;</p> <p>Medição de emissões de H₂;</p> <p>Coleta de gases para geoquímica de superfície;</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Círculo de fada – Bacia do São Francisco</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Amostragem de H₂ – Bacia do São Francisco</p> </div> </div>
Definição do Sistema de H ₂ Natural	
<p style="text-align: center;">Geração</p> <p>Identificação de anomalias magnéticas e gravimétricas;</p> <p>Identificação de potenciais rochas fontes para H₂ em mapas geológicos e tectônicos;</p> <p>Identificação de atividade vulcânica e hidrotermal;</p> <p>Análise de mapas de temperatura e fluxo térmico.</p>	<div style="text-align: center;">  <p>Anomalia magnética – Bacia do São Francisco</p> </div> <p style="text-align: right; font-size: small;">Donze et al., 2020</p>
<p style="text-align: center;">Migração</p> <p>Interpretação do arcabouço estrutural;</p> <p>Identificação de falhas profundas (sísmica ativa);</p> <p>Interpretação em sísmica passiva (fluxo de maior velocidade).</p>	<div style="text-align: center;">  <p>Darling Fault – Bacia de Perth, Austrália</p> </div> <p style="text-align: right; font-size: small;">Frery et al., 2023</p>
<p>Modelagem do sistema de H₂: detecção de possíveis focos de geração e zonas preferenciais de migração.</p>	
<p style="text-align: center;">Reservatório</p> <p>Busca por zona produtiva;</p> <p>Caracterização sísmica;</p> <p>Estudo de análogos;</p> <p>Dados de coleta de campo.</p>	<div style="text-align: center;">  <p>(a) Calcário neoproterozóico – Bacia de Taoudeni, Mali</p> </div> <p style="text-align: right; font-size: small;">Prinzhofer & Cacas-Stentz, 2023</p>
<p style="text-align: center;">Trapa</p> <p>Reconhecimento sísmico da trapa;</p> <p>Identificação de rochas selantes e aquíferos rasos.</p>	<div style="text-align: center;">  <p>Modelo de trapeamento:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Estrutural; - Por capilaridade; - Mineral. </div> <p style="text-align: right; font-size: small;">Liu et al., 2023</p>
<p>Avaliação de riscos</p>	<p>Avaliação de capacidade volumétrica e econômica</p>
Poço	
<p>Licença ambiental;</p> <p>Modelo 1D de temperatura;</p> <p>Modelo 1D de geopressões;</p> <p>Insumos de geodésia;</p> <p>Projeto de poço.</p>	<div style="text-align: center;">  <p>Bourakebougou, Mali</p> </div> <p style="text-align: right; font-size: small;">Fonte: Hydroma</p>

Figura 9. Fluxo de trabalho para proposição de locação exploratória para investigação da ocorrência de hidrogênio natural.

4.1. Etapas de pré-campo e campo

Um dos primeiros *proxies* a se observar na prospecção de hidrogênio é a ocorrência de círculos de fada (do inglês *fairy circles*), que são depressões que variam de geomorfologia circular até irregulares, podendo ou não ser preenchidas com água, com vegetação modificada pela exsudação do gás hidrogênio em superfície (Félix, 2022; Moretti et al., 2022). A Figura 10 mostra, de maneira didática, a ocorrência e expressão dos círculos de fada.

No entanto, ocorrências de hidrogênio podem existir na ausência de círculos de fada, como reportado por Prinzhofer et al. (2024), na região de Maricá, no Rio de Janeiro. Foram detectadas emissões superficiais de hidrogênio e hélio, migradas até a superfície através de falhas reativadas do embasamento neoproterozóico, sem estarem associadas a círculos de fada.

A etapa pré-campo consiste na identificação remota de círculos de fada, através imagens de satélite, aliada à interpretação de dados de geoquímica de superfície, dados sísmicos (rastreamento de falhas

profundas), de multifísica e gama espectrometria existentes, com intuito de selecionar os alvos a serem avaliados em campo. Finalmente, análises químicas de amostras de poços de água, quando existentes, devem compor o conjunto de informações a serem avaliadas.

No campo, devem ser realizadas medições das exalações de hidrogênio, inclusive medidas dinâmicas dos fluxos, uma vez que é reportado pela literatura que a concentração de hidrogênio varia ao longo de determinados ciclos de tempo, como no estudo de Prinzhofer et al. (2019). Os autores investigaram a emissão contínua de hidrogênio natural em uma estrutura de círculo de fada localizada na Bacia do São Francisco, e identificaram que as emissões de hidrogênio variaram ao longo do dia, com picos centrados ao meio-dia, além de variar em ciclos de semanas e meses. Os autores defendem que os picos de concentração do gás estão associados à radiação solar e à evaporação de água do solo.

A seguir, são apresentadas as etapas referentes ao estudo de cada um dos elementos do sistema de hidrogênio natural para definição de locação exploratória:

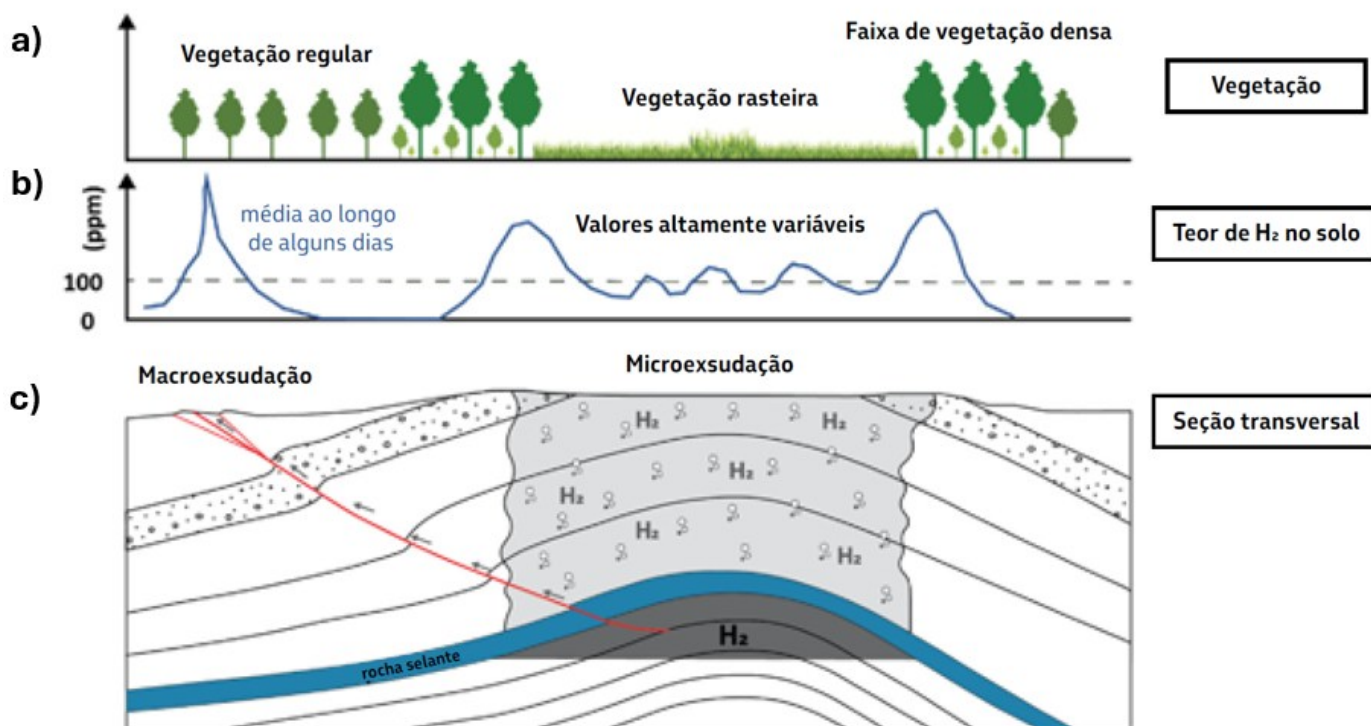


Figura 10. Seção esquemática de zona rica em H₂: **A.** Aparência da vegetação em superfície. **B.** Conteúdo de H₂ no solo. **C.** Seção esquemática de subsuperfície, topografia negativa (Extraído de Moretti et al., 2022).

4.2. Geração

Para a identificação de rochas e processos geradores de hidrogênio, são utilizados mapas de métodos potenciais, para identificação de anomalias magnéticas e gravimétricas, já que é consensual o papel preponderante do ferro na geração de hidrogênio. A busca por rochas fontes de H₂ pode ser auxiliada por mapas geológicos e tectônicos, uma vez que rochas fontes tectonicamente mais rasas favorecem a economicidade de possíveis descobertas. Mapas de estiramento crustal podem sugerir áreas propícias à ocorrência de serpentinização. A identificação de atividade vulcânica e hidrotermal deve ser considerada no rastreamento, pois esses processos também podem contribuir para a geração de hidrogênio, apesar de terem papel subordinado. Além disso, a análise de mapas de temperatura e fluxo térmico também pode auxiliar, pois as reações que geram hidrogênio são catalisadas por altas temperaturas, normalmente.

4.3. Migração

Analogamente ao estudo do sistema petrolífero, para a definição das rotas de migração de hidrogênio, se faz necessária a interpretação do arcabouço estrutural, com especial atenção às falhas profundas. A sísmica passiva tem papel relevante já que, em tese, o hidrogênio possui velocidade de migração superior à dos hidrocarbonetos, o que poderia gerar um ruído passivo e servir como rastreador. Devido à baixa densidade do gás e ao efeito da flutuabilidade, é razoável concluir que a migração mais importante deve ser a vertical, em detrimento da lateral. É interessante mencionar, ainda, que no caso de Mali, por estar localizado em ambiente transpressivo, as falhas transcorrentes, com alto ângulo, poderiam facilitar a migração do hidrogênio até a trapa, embora não haja qualquer menção na literatura que relacione esse fator ao sucesso desta ocorrência, até o momento.

Os produtos resultantes do mapeamento da geração e migração servem como dados de entrada para uma modelagem 3D para definição de possíveis focos de geração e zonas preferenciais de migração. Schneider et al. (2022) apresentaram um estudo de caso de modelagem de bacia aplicada ao sistema de hidrogênio em bacia de *foreland* na Colômbia. Utilizaram, como entradas para o modelo, o ambiente geológico, arcabouço estrutural e estratigráfico, dados geoquímicos, petrofísicos e distribuição de fácies. Como resultado, obtiveram o modelo de pressão e temperatura, geração de fluido, predição de migração e focos de acumulação, compondo o sistema de hidrogênio.

4.4. Reservatório

Assim como no estudo de reservatórios para hidrocarbonetos, também para o hidrogênio é fundamental a busca por zonas produtivas, com boas propriedades permo-porosas. Devido à alta difusividade do gás hidrogênio, acreditamos que a permeabilidade necessária possa ser menor que aquela requerida para a produção do gás natural, no que tange ao sucesso geológico. No entanto, para que a produção seja rentável, a permeabilidade precisa ser adequada, já que, para o hidrogênio natural, a vazão tem um papel fundamental na avaliação econômica. Embora Mali, até o momento, seja o único caso de produção de hidrogênio natural no mundo, a ausência de dados sobre permeabilidade limita a elaboração de modelos mais precisos para prospecção e avaliação econômica.

Na prática, para a investigação do reservatório, além da caracterização sísmica, é premente o estudo de amostras de campo, naqueles porventura aflorantes, ou análogos. O perfil neutrão é uma ferramenta útil, já que, na presença de hidrogênio, a leitura desta propriedade é alta, como foi observado nos poços de Mali, que mostram separação positiva dos perfis, com densidade à direita do neutrão (Prinzhofer e Cacas-Stentz, 2023).

4.5. Trapa

A geometria e o selo podem ser definidos através do reconhecimento sísmico da trapa. O estudo da retenção também herda conhecimento advindo do petróleo quanto à caracterização do potencial selante das camadas sobrepostas ao reservatório, mas exige novas pesquisas para investigação de formações porosas, mais rasas, saturadas em água. Alguns modelos de trapeamento publicados na literatura, a exemplo de Boreham et al. (2021) e Liu et al. (2023), mostram grande similaridade com aqueles consolidados para o sistema petrolífero, como as trapas estruturais e estratigráficas.

4.6. Avaliação

Quanto à avaliação dos prospectos, mais uma vez de maneira análoga ao processo exploratório de petróleo, havendo uma carteira de projetos, há que se avaliar os riscos de cada um e realizar a avaliação de capacidade volumétrica e de economicidade, de modo a selecionar aquela locação com maior chance de sucesso. Banks et al. (2025) propõem uma metodologia sistemática baseada na exploração de *plays* de petróleo para projetos de exploração de hidrogênio em fases iniciais, considerando a integração de informações desde a escala de bacia, no que tange à geologia e incertezas, culminando na escala

de poço, passando pela análise do valor da informação e chance de sucesso geológico.

4.7. Poço

Para a perfuração do poço, segue-se basicamente a mesma sequência, que inclui obtenção de licença ambiental, confecção dos modelos 1D de temperatura e geopressões, aquisição de insumos de geodésia e definição do projeto de poço. Especial atenção deve ser dada à segurança de poço, já que o gás hidrogênio é altamente inflamável.

5. CONCLUSÕES

O hidrogênio natural constitui um recurso com potencial de ocupar uma fatia importante da oferta de energia futura. Ao se tornar um dos principais agentes da diversificação energética, contribuirá com o cumprimento dos objetivos de descarbonização e sustentabilidade, no cenário das mudanças climáticas globais e da transição energética.

Pela natureza e similaridades do sistema de hidrogênio natural com o sistema petrolífero, os conhecimentos adquiridos por décadas na indústria do petróleo e gás natural podem e estão sendo aproveitados para avançar na investigação das ocorrências do gás hidrogênio com fins exploratórios.

No atual estágio de compreensão em que se encontra o modelo analítico de sistema de hidrogênio natural, são utilizados conceitos ainda fortemente influenciados pela já consagrada análise de sistema petrolífero. No entanto, essas analogias podem ser cada vez menos importantes, à medida que o entendimento acerca do hidrogênio for avançando e adquirindo formas próprias, conforme as suas peculiaridades forem sendo identificadas.

Diante desse cenário, o esforço deste texto de síntese tratou de organizar e de consolidar a produção deste conhecimento, transformando publicações dispersas em informações coesas e acessíveis, em língua portuguesa, o que facilita a identificação de tendências, inconsistências e de lacunas de pesquisa. Isso é essencial, tanto para futuras tomadas de decisão empresariais quanto para o avanço do conhecimento geocientífico, já que ele direciona novas investigações para instituições de pesquisa brasileiras, garantindo que os próximos passos contribuam com os esforços anteriores.

O fluxo de trabalho para investigação da ocorrência de hidrogênio natural aqui descrito abrange a análise de cada elemento do sistema, desde a identificação de rochas fontes e processos geradores até os caminhos de migração e a caracterização do reservatório e da trapa.

O conhecimento sobre o hidrogênio natural ainda está em estágio inicial, refletindo a natureza emergente desse campo de pesquisa. No entanto, a disponibilidade abrangente de bibliografia atualmente evidencia o quanto a pesquisa acerca do hidrogênio demonstra avanço acelerado. De tal sorte, certamente modelos mais adequados à dinâmica do hidrogênio em subsuperfície surgirão, à medida que dados relacionados a novas descobertas, e, porventura, dados de produção, se tornem disponíveis. Cabe ressaltar, sob a ótica de viabilidade econômica, que ainda há obstáculos relevantes a serem superados, não apenas de ordem técnica, mas principalmente relacionados à condição natural em que o hidrogênio se encontra no reservatório. A presença do hidrogênio na fase de gás livre, em vez de dissolvido na água, favoreceria uma maior produtividade e, conseqüentemente, melhores resultados econômicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à geóloga Isabela de Oliveira Carmo, pela cessão de fotografias e fotomicrografias para o item da radiólise, Figura 5, bem como pelas discussões sobre o tema; à *designer* Tatiana Duarte Esteves, pela ilustração científica da Figura 2, e edição das figuras 8 e 10; ao geólogo Teo Vitor Nogueira Melo, pelas fotografias das amostras do Museu de Ciências da Terra, SGB, Rio de Janeiro, figuras 3 e 4; ao geólogo Marcio Ferreira Guimarães pela cessão das fotografias da Figura 9, primeiro quadro; ao geólogo Yuri de Melo Portela pelas sugestões e contribuições ao artigo; e aos geólogos Leonardo Correa Gomes e Victor Hugo Guimarães Pinto, pela revisão conceitual da Figura 2B. Os autores agradecem especialmente ao geólogo Claudemir Vasconcelos por sua ampla contribuição à temática do hidrogênio natural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abiri-Franklin, S.O., et al., 2025, Exploring the Prospects in the Law and Policy of Green Hydrogen Energy (GHE) in West Africa: Plowing the Way Forward. NIPES: Journal of Science and Technology Research, v. 7, n. 3, p. 441-455, doi: <https://doi.org/10.37933/nipes/7.3.2025.1631>.
- Albrecht, U., Bünger, U., Michalski, J., Raksha, T., Wurster, R., and Zerhusen, J., 2020, International hydrogen strategies: a study commissioned by and in cooperation with the World Energy Council Germany: Berlin: WEC German, <https://en.lbst.de/publikationen/international-hydrogen-strategies/> (acessado Maio 2025).

- Apps, J.A., e Van De Kamp, P.C., 1993, Energy gases of abiogenic origin in the Earth's crust: Future Energy Gases: United States Geological Survey, Professional Paper, v. 1570, p. 81-130.
- Arrouvel, C., e Prinzhofer, A., 2021, Genesis of natural hydrogen: New insights from thermodynamic simulations: International Journal of Hydrogen Energy, v. 46, doi: <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.03.057>
- Ball, P.J., e Czado, K., 2024, Natural hydrogen: the race to discovery and concept demonstration: Geoscientist, spring.
- Banks, G.J., Ball, P.J., Cousins, D. e Fehr, S., 2025, Geological hydrogen exploration: Optimize decision-making with play-based exploration, value of information and geological chance of success, in GeoConvention, Calgary, Canadá.
- Berndt, M.E., Allen, D.E. e Seyfried, W.E., 1996, Reduction of CO₂ during serpentinization of olivine at 300 °C and 500 bar: Geology, v. 24, n. 4, p. 351-354, doi: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024<0351:ROCDSD>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<0351:ROCDSD>2.3.CO;2).
- Blay-Roger, R., Bach, W., Bobadilla, L., Ramirez Reina, T., Odriozola, J.A., Amils, R., e Blay, V., 2024, Natural hydrogen in the energy transition: Fundamentals, promise, and enigmas: Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 189, part A, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113888>.
- Boreham, C.J., Edwards, D.S., Czado, K., Rollet, N., Wang, L., Van Der Wielen, S., Champion, D. e Feitz, A., 2021, Hydrogen in Australian natural gas: occurrences, sources and resources: The APPEA Journal, v. 61.
- Brasil, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Bicomcombustíveis (ANP), 2016, Resolução ANP nº 46, de 1º de novembro de 2016: Aprova o regime de segurança operacional para integridade de poços de petróleo e gás natural: Diário Oficial da União, seção 1, n. 211, p. 77.
- Brasil, Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), 2024, Resolução nº 5, de 26 de agosto de 2024: Institui a Política Nacional de Transição Energética - PNTE, o Plano Nacional de Transição Energética - Plante, o Fórum Nacional de Transição Energética - Fonte, e dá outras providências: Diário Oficial da União, seção 1, n. 166, p. 2.
- Brasil, Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), 1986, Resolução nº 001, de 23 de janeiro de 1986: Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental: Diário Oficial da União, seção 1, n. 32, p. 2548-2549.
- Brasil, Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997: Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental: Diário Oficial da União, seção 1, n. 248, p. 30894-30896.
- Brasil, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2022, Hidrogênio Cinza: Produção a partir da reforma a vapor do gás natural: Rio de Janeiro: Nota Técnica EPE/DPG/SPG/01/2022.
- Brasil, Petróleo Brasileiro S.A., 2024, Petrobras aprova Plano Estratégico 2050 e Plano de Negócios 2025-2029: <https://api.mziq.com/mzfilemanager/v2/d/25fdf098-34f5-4608-b7fa-17d60b2de47d/2f3f86ef-1818-11a3-4585-556aed3ad2bb?origin=1> (acessado julho 2025).
- Brasil, 1997, Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997: Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências: Diário Oficial da União, seção 1, n. 151, p. 1-6.
- Brasil, Petróleo Brasileiro S.A., 2024, Petrobras investirá R\$ 20 milhões em pesquisas sobre hidrogênio natural: Agência Petrobras: <https://agencia.petrobras.com.br/w/sustentabilidade/petrobras-investira-r-20-milhoes-em-pesquisas-sobre-hidrogenio-natural> (acessado julho 2025).
- Brasil, 2024a, Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), Resolução nº 5, de 26 de agosto de 2024: Institui a Política Nacional de Transição Energética - PNTE, o Plano Nacional de Transição Energética - Plante, o Fórum Nacional de Transição Energética - Fonte, e dá outras providências: Diário Oficial da União, seção 1, n. 166, p. 2.
- Brasil, 2024b, Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024: Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono; dispõe sobre a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono; institui incentivos para a indústria do hidrogênio de baixa emissão de carbono; institui o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono; e altera as Leis nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, e nº 9.478, de 6 de agosto de 1997: Diário Oficial da União, seção 1, Edição Extra A, ano 162, n. 148-A, p. 1.
- Brasil, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2025, Hidrogênio natural: Conceitos básicos e estado da arte sobre uma das potenciais fontes de energia renovável para descarbonização: Diretoria de Estudos do Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Superintendência de Petróleo e Gás Natural, v. 1, n. 4.

- Brasil, 2024c, Lei nº 14.990, de 27 de setembro de 2024: Instituto do Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC); e altera a Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024: Diário Oficial da União, seção 1, ano 162, n. 187, p. 2.
- Brière, D., Jerzykiewicz, T. e Śliwiński, W., 2017, On Generating a Geological Model for Hydrogen Gas in the Southern Taoudeni Megabasin (Bourakebougou Area, Mali): Search and Discovery, doi: 10.1190/ICE2016-6312821.1.
- Castelvecchi, D., 2022, How the hydrogen revolution can help save the planet - and how it can't. *Nature*, v. 611, n. 7936, p. 440-443.
- Cavendish, H., 1766, Three Papers, Containing Experiments on Factitious Air: *Philosophical Transactions*, v. 56, p. 141-184, doi: 10.1098/rstl.1766.0019.
- Conrad, R., 1996, Soil microorganisms as controllers of atmospheric trace gases (H₂, CO, CH₄, OCS, N₂O, and NO): Marburg, Germany: *Microbiological Reviews*, v. 60, n. 4, p. 609-640, doi: <https://doi.org/10.1128/mr.60.4.609-640.1996>.
- Coveney Jr., R.M., Goebel, E.D., Zeller, E.J., Dreschhoff, G.A.M. e Angino, E.E., 1987, Serpentinization and the Origin of Hydrogen Gas in Kansas: Tulsa: *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, v. 71, n. 1, p. 39-48, doi: <https://doi.org/10.1306/94886D3F-1704-11D7-8645000102C1865D>.
- Deville, E., Prinzhofer, A., Pillot, D., e Vacquand, C., 2011, Natural flows of H₂ and associated diagenetic processes of atmospheric CO₂ capture and sequestration: Um estudo nas ofiolitas de Omã, in *Proceedings of the Offshore Mediterranean Conference, OMC, Ravenna, Itália*, 9 p.
- Donzê, F.V., Truche, L., Namin, P.S., Lefevre, N. e Bazarkina, E.F., 2020, Migration of Natural Hydrogen from Deep-Seated Sources in the São Francisco Basin, Brazil: *Geosciences*, v. 10, n. 9, doi: <https://doi.org/10.3390/geosciences10090346>.
- Epelle, E.I., Obande, W., Udourioh, G.A., Afolabi, I.C., Desongu, K.S., Orivri, U., Gunes, B. e Okolie, J. A., 2022, Perspectives and prospects of underground hydrogen storage and natural hydrogen: Paisley: *Sustainable Energy Fuels*, v. 6, n. 3, p. 3324-3343, doi: <http://dx.doi.org/10.1039/D2SE00618A>.
- Etiópe, G., 2023, Massive release of natural hydrogen from a geological seep (Chimaera, Turkey): gas advection as a proxy of subsurface gas migration and pressurized accumulations: *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48, p. 9172-9184, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.025>.
- Evans, W.C., Banks, N.G., e White, L.D., 1981, Analyses of gas samples from the summit crater. In: 1980 eruptions Mt. St. Helens, Washingt., U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey, pp. 227-231.
- Everts, A.J.W., Bonnie, J. e Loosveld, R., 2025, Natural hydrogen development-potential and challenges: *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 142, p. 26-39, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.05.357>.
- Freitas, V.A., Prinzhofer, A., Françolin, J. B., Ferreira, F. J. F., e Moretti, I., 2024, Natural hydrogen system evaluation in the São Francisco Basin: Rio de Janeiro: *Science and Technology for Energy Transition*, v. 79, p. 95, doi: <https://doi.org/10.2516/stet/2024091>.
- Gaillard, F., Scaillet, B. e Arndt, N.T., 2011, Atmospheric oxygenation caused by a change in volcanic degassing pressure: *Nature*, v. 478, p. 229-232, doi: <https://doi.org/10.1038/nature10460>.
- Gaucher, E.C., Moretti, I., Pélissier, N., Burrige, G. e Gonthier, N., 2023, The place of natural hydrogen in the energy transition: a position paper: *European Geologist*, v. 55, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8108239>.
- Geymond, U., Ramanaidou, E., Lévy, D., Ouaya, A., e Moretti, I., 2022, Can Weathering of Banded Iron Formations Generate Natural Hydrogen? Evidence from Australia, Brazil and South Africa: *Minerals*, v. 12, n. 2, doi: <https://doi.org/10.3390/min12020163>.
- Generation Energy Council, 2018, Canada's energy transition: getting to our energy future, together. Ottawa: Natural Resources Canada: https://natural-resources.canada.ca/sites/nrcan/files/energy/CoucilReport_june27_English_Web.pdf (acessado Outubro 2025).
- Geymond, U., Briole, T., Combaudon, V., Sissmann, O., Martinez, I., Duttine, M., e Moretti, I., 2023, Reassessing the role of magnetite during natural hydrogen generation: *Frontiers in Earth Science*, v. 11, doi: <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1169356>.
- Gregory, S.P., Barnett, M.J., Field, L.P. e Milodowski, A.E., 2019, Subsurface Microbial Hydrogen Cycling: Natural Occurrence and Implications for Industry: Nottingham: British Geological Survey, Environmental Science Centre: *Microorganisms*, v. 7, n. 2, doi: <https://doi.org/10.3390/microorganisms7020053>.
- Guélard, J., Covey, R.M.J., Goebel, E.D., e Zeller, E.J., 2017, Natural H₂ in Kansas: deep or shallow origin?: *Geochemistry, Geophysics and Geosystems*, v. 18, n. 5, p. 1841-1865, doi: <https://doi.org/10.1002/2016GC006544>.

- Hand, E., 2023, Hidden hydrogen: does Earth hold vast stores of a renewable carbon-free fuel: *Science*, v. 379, n. 6633, doi: <https://doi.org/10.1126/science.adh1477>.
- Hanson, J. e Hanson, H., 2023, Hydrogen's organic genesis: *Haywards Heath: Unconventional Resources*, v. 4, doi: <https://doi.org/10.1016/j.uncres.2023.07.003>.
- Heard, A.W., et al., 2018, South African crustal fracture fluids preserve paleometeoritic water signatures for up to tens of millions of years: *Oxford: Chemical Geology*, v. 493, p. 379-395, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.06.011>.
- Holland, G., Lollar, B.S., Li, L., Lacrampe-Couloume, G., Slater, G.F., e Ballentine, C.J., 2013, Deep fracture fluids isolated in the crust since the Precambrian era: *Nature*, v. 497, p. 357-360, doi: <https://doi.org/10.1038/Nature12127>.
- International Energy Agency (IEA), 2019, *The Future of Hydrogen*: Paris: International Energy Agency, <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (acessado Setembro 2023).
- Isaev, E.I., Skorodumova, N.V., Ahuja, R., Vekilov, Y.K., e Johansson, B., 2007, Dynamical stability of Fe-H in the Earth's mantle and core regions: *Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences*, v. 104, n. 22, p. 9168-9171, doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.0609701104>.
- IFPEN, 2022. *Hydrogen for mobility*. Curso online. <https://www.ifp-school.com/en/node/1443> (acessado Março 2025).
- Klein, F., Tarnas, J. D., e Bach, W., 2020, Abiotic Sources of Molecular Hydrogen on Earth: *Elements*, v. 16, p. 19-24, doi: <https://doi.org/10.2138/gselements.16.1.19>.
- Kozlova, N.S., Rudakov, V.P., Shuleykin, V.N., Voitov, G.I., e Baranova, L.V., 1999, Emanation and electrical effects in the atmosphere of subsoil over the Kaluga impact ring structure: *Russian Journal of Earth Sciences*, v. 1, n. 6, p. 503-510, doi: <https://doi.org/10.2205/1999ES000027>.
- Larin, V.N., 1993, *Hydridic earth: The new geology of our primordially hydrogen-rich planet*: Calgary, Canadá, Polar Publishing, 242 p.
- LaVerne, J.A., e Tandon, L., 2005, H² and Cl² production in the radiolysis of calcium and magnesium chlorides and hydroxides: *Journal of Physical Chemistry A*, v. 109, n. 12, doi: <https://doi.org/10.1021/jp044166o>.
- Lavoisier, A., 1789, *Traité Élémentaire de Chimie*: Paris, France: Cuchet, v. 1, p. 174. <https://archive.org/details/traitlmentairede01lavo/page/n13/mode/2up> (acessado janeiro 2025).
- Lefevre, N., Truche, L., Donzé, F.V., Gal, F., Tremosa, J., Fakoury, R., Calassou, S. e Gaucher, E.C., 2022, Natural hydrogen migration along thrust faults in foothill basins: The North Pyrenean Frontal Thrust case study: *Applied Geochemistry*, v. 145, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105396>.
- Lefevre, N., Truche, L., Donzé, F.V., Vandenborre, J., Gaucher, E.C., e Magnin, V., 2025, The contribution of mechanoradical reactions to crustal hydrogen generation: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 660, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2025.119363>.
- Lepecki, W., 2011, A energia nuclear e a economia do hidrogênio: *Revista do Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE)*, v. 26, n. 1, p. 1-25. https://inee.org.br/wp-content/uploads/2025/02/Economia_Hidrogenio_Lepecki.pdf (acessado maio 2022).
- Levshounova, S.P., 1991. Hydrogen in petroleum geochemistry: *Terra Nova*, v. 3, p. 579-585, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105396>.
- Lévy, D., Boka-Mene, M., Meshi, A., Fejza, I., Guermont, T., Hauville, B., e Pelissier, N., 2023, Looking for natural hydrogen in Albania and Kosova: *Frontiers in Earth Science*, v. 11, doi: 10.3389/feart.2023.1167634.
- Lin, L.H., Hall, J., Lippmann-Pipke, J., Ward, J. A. e Lollar, B.S., 2005, Radiolytic H₂ in continental crust: Nuclear power for deep subsurface microbial communities: *Geochemistry Geophysics Geosystems*, v. 6, n. 7, doi: <https://doi.org/10.1029/2004GC000907>.
- Lin, L.H., Later, G.F. S., Lollar, B.S., Lacrampe-Couloume, G., e Onstott, T.C., 2005, The yield and isotopic composition of radiolytic H₂, a potential energy source for the deep subsurface biosphere: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 69, n. 4, p. 893-903, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.07.032>.
- Loureiro, E.M.L., Menezes, P.T.L., Zalán, P.V. e Heilbron, M., 2024, The Tectonic Framework of Parecis Basin: Insights from a Multiphysics Interpretation Workflow: *Basel: Minerals*, v. 14, n. 783, doi: <https://doi.org/10.3390/min14080783>.
- Maiga, O., Deville, E., Laval, J., Prinzhofer, A. e Diallo, A.B., 2023, Characterization of the spontaneously recharging natural hydrogen reservoirs of Bourakebougou in Mali: *Scientific Reports*, v. 13, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38977-y>.

- Maiga, O., Deville, E., Laval, J., Prinzhofer, A. e Diallo, A.B., 2024, Trapping processes of large volumes of natural hydrogen in the subsurface: The emblematic case of the Bourakebougou H₂ field in Mali: Rueil-Malmaison: *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 50, parte B, p. 640-647, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.131>.
- McCullom, T.M. e Bach, W., 2008, Thermodynamic constraints on hydrogen generation during serpentinization of ultramafic rocks: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 73, p. 856-875, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.10.032>.
- Moody, J.B., 1976, Serpentinization: a review: *Lithos*, Amsterdam, v. 9, n. 2, p. 125-138, doi: [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(76\)90030-X](https://doi.org/10.1016/0024-4937(76)90030-X).
- Moretti, I., Brouilly, E., Loiseau, K., Prinzhofer, A. e Deville, E., 2021, Hydrogen Emanations in Intracratonic Areas: New Guide Lines for Early Exploration Basin Screening: *Geosciences*, v. 11, n. 145, doi: <https://doi.org/10.3390/geosciences11030145>.
- Morita, R.Y., 1999, Is H₂ the Universal Energy Source for Long-Term Survival? Corvallis, OR: Department of Microbiology, Oregon State University, *Microbial Ecology*, v. 38, p. 307-320, doi: <https://doi.org/10.1007/s002489901002>.
- Mosquera-Rivera, J.E., Jiménez-Vergara, J.M., Betancourt-Flórez, R.E., Vargas-Jiménez, C.A. e Ball, P.J., 2025, Evaluating and revealing statistical patterns and database performance in hydrogen exploration: *Interpretation*, v. 13, n. 2, p. 1-18, doi: <https://doi.org/10.1190/int-2024-0101.1>.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). Imagine the universe! <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/sun1.html> (Acessado janeiro 2025).
- Nealson, K.H., Inagaki, F. e Takai, K., 2005, Hydrogen-driven subsurface lithoautotrophic microbial ecosystems (SLiMEs): do they exist and why should we care?: *Trends in Microbiology*, v. 13, n. 9, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tim.2005.07.007>.
- Ortiz, R. A., 2003, Valoração econômica ambiental, in May, P. H. et al. *Economia do meio ambiente*. Rio de Janeiro: Campus, p. 81-99.
- Peng, A., Misch, D., Tari, G., Sachsenhofer, R.F., Zach, C., e Stranzl, C., 2025, Drilling-induced hydrogen: A challenge for natural hydrogen exploration: *Leoben: International Journal of Hydrogen Energy*, v. 149, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.150091>.
- Prinzhofer, A., Tahara Cissè, C.S. e Diallo, A.B., 2018, Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali): *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 43, n. 42, p. 19315-19326 doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.193>.
- Prinzhofer, A., Moretti, I., França, J., Pacheco, C., D'Agostino, A., Werly, J., and Rupin, F., 2019, Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: The example of a Brazilian H₂-emitting structure: *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 4, n. 12, p. 5676-5685, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.119>.
- Prinzhofer, A. e Cacas-Stentz, M.C., 2023, Natural hydrogen and blend gas: a dynamic model of accumulation: *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48, n. 36, p. 16071-16083, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.060>.
- Prinzhofer, A., Rigollet, C., Lefevre, N., Françolin, J., e Miranda, P.E.V., 2024, Maricá (Brazil), the new natural hydrogen play which changes the paradigm of hydrogen exploration: *Rio de Janeiro: International Journal of Hydrogen Energy*, v. 62, p. 91-98, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.263>.
- Rifkin, J., 2003, *A Economia do Hidrogênio*: São Paulo, Ed. M. Books, 300 p.
- Rifkin, J., 2012, *A terceira revolução industrial: como o poder lateral está transformando a energia, a economia e o mundo*: São Paulo, Ed. M. Books, 320 p.
- Rigollet, C., e Prinzhofer, A., 2022, Natural hydrogen: a new source of carbon-free and renewable energy that can compete with hydrocarbons: *Paris: First Break*, v. 40, n. 10, doi: <https://doi.org/10.3997/1365-2397.fb2022087>.
- Saliba-Silva, A.M. e Linardi, M., 2008, Hidrogênio Nuclear - Possibilidades para o Brasil, in *Workshop Internacional sobre Hidrogênio e Células a Combustível*, 4 ed, 2008, Campinas, p. 1-8, <https://www.osti.gov/etdweb/servlets/purl/21154459> (acessado maio 2022).
- Sanz, J.L., Rodriguez, N., Escudero, C., Carrizo, D. e Amils, R., 2021, Biological production of H₂, CH₄ and CO₂ in the deep subsurface of the Iberian Pyrite Belt: *Environmental Microbiology*, v. 23, n. 7. p. 3817-3831, doi: <https://doi.org/10.1111/1462-2920.15561>.
- Schneider, F., Dubille, M., Patino, C., e Medellin, F., 2022, Natural Hydrogen System Assessment with Basin Modelling Applied to the Colombian Foreland Basins, in *AAPG VTS HYDROGEN 2022*.

- Serratt, H., Cupertino, J.A., Cruz, M.F., Girelli, T.J., Lehn, I., Teixeira, C.D., Oliveira, H.O.S. e Chemale Jr, F., 2024, Southern Brazil hydrogen systems review: *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 69, p. 347-357, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.018>.
- Smith, N.J. P., Shepherd, T.J., Styles, M.T. e Williams, G.M., 2005, Hydrogen exploration: a review of global hydrogen accumulations and implications for prospective areas in NW Europe: Geological Society London Petroleum Geology Conference Series, v. 6, p. 349-358, doi: <https://doi.org/10.1144/0060349>.
- Smith, E.M., Shirey, S.B., Nestola, F., Bullock, E.S., Wang, J., Richardson, S.H. e Wang, W., 2016, Large gem diamonds from metallic liquid in Earth's deep mantle: *Science*, v. 354, n. 6318, p. 1403-1405, doi: <https://doi.org/10.1126/science.aal1303>.
- Stevenson, O.J., 1977, Hydrogen in the Earth's core: Canberra: Nature Publishing Group, v. 268, p. 130, doi: <https://doi.org/10.1038/268130a0>.
- Strapoć, D., Ammar, M., Abolins, N., e Gligorijevic, A., 2022, Key role of regearing mud gas logging for natural H₂ exploration, in SPWLA Annual Logging Symposium, 63rd, Stavanger, Norway, doi: <https://doi.org/10.30632/SPWLA-2022-0008>.
- Sugisaki, R., Ido, M., Takeda, H., Isobe, Y., Hayashi, Y., Nakamura, N., Satake, H., e Mizutani, Y., 1983, Origin of hydrogen and carbon dioxide in fault gases and its relation to fault activity: *Journal of Geology*, v. 91, n. 3, p. 239-258.
- Tagami, T., e O'Sullivan, P.B., 2005, Fundamentals of Fission-Track Thermochronology: Kyoto: Reviews in Mineralogy & Geochemistry, v. 58, p. 19-47, doi: <https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.2>.
- Tari, G.C., 2025, Natural hydrogen exploration: some similarities and differences with oil and gas exploration, in Rezaee, R., e Evans, B., eds., *Natural Hydrogen Systems: properties, occurrences, generation mechanisms, exploration, storage and transportation*: Berlin, De Gruyter Academic Publishing, doi: <https://doi.org/10.1515/9783111437040-003>.
- Truche, L., Donzé, F.V., Goskolli, E., Muceku, B., Loisy, C., Monnin, C., Dutoit, H., e Cerepi, A., 2024, A deep reservoir for hydrogen drives intense degassing in the Bulqizë ophiolite: *Science*, v. 383, p. 618-621, doi: <https://doi.org/10.1126/science.adk9099>.
- Vargas, R.A., Chiba, R., Franco, E.G. e Seo, E.S.M., 2006, Hidrogênio: O vetor energético do futuro?: São Paulo, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN).
- Vidavskiy, V., e Rezaee, R., 2022, Natural deep-deated hydrogen resources exploration and development: structural features, governing factors, and controls: *Journal of Energy and Natural Resources*, v. 11, n. 3, p. 60-81, doi: <https://doi.org/10.11648/j.jenr.20221103.11>.
- Vidavskiy, V., Rezaee, R., Larin, N., Dorrington, R., Spivey, M., and Vidavskiy, V., 2024, Natural Hydrogen in the Northern Perth Basin, WA Australia: Geospatial Analysis and Detection in Soil Gas for Early Exploration: *Journal of Energy and Natural Resources*, v. 13, n. 2, p. 90-113, doi: <https://doi.org/10.11648/j.jenr.20241302.15>.
- Viscusi, W. K., Vernon, J. M., Harrington, J. E., 2005, Economics of regulation and antitrust: Boston, MIT Press, 960 p.
- Wang, L., Jin, Z., Chen, X., Su, Y., e Huang, X., 2023, The Origin and Occurrence of Natural Hydrogen: *Energies*, v. 16, n. 5, doi: <https://doi.org/10.3390/en16052400>.
- Wakita, H., Nakamura, Y., Kita, I., Fujii, N., e Notsu, K., 1980, Liberation of Hydrogen: A New Indicator of Fault Activity: *Science*, v. 210, n. 4466, p. 188-190, doi: <https://doi.org/10.1126/science.210.4466.188>.
- Warr, O., Giunta, T., Ballentine, C. J. e Lollar, B.S., 2019, Mechanisms and rates of ⁴He, ⁴⁰Ar, and H₂ production and accumulation in fracture fluids in Precambrian Shield environments: *Chemical Geology*, v. 530, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.119322>.
- Yang, X., Keppler, H., e Li, Y., 2016, Molecular hydrogen in mantle minerals: *Geochemical Perspectives Letters*, v. 2, p. 160-168. doi: <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1616>.
- Zgonnik, V., 2020, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: a comprehensive review: *Earth-Science Reviews*, v. 203, doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140>.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES: CREDIT

Marielli Wesz Vogado: Conceituação, curadoria dos dados e redação do manuscrito. Alexandre de Andrade Ferreira: Conceituação, curadoria dos dados, edição do manuscrito, tradução do resumo e termos em inglês. Fabricio da Silva Ogorodnik: Redação do item 2.3 A Regulação do Hidrogênio no Brasil e no Mundo, edição dos itens 1. Introdução, 5. Conclusões e Referências Bibliográficas, revisão do manuscrito. Erica Tavares de Moraes: revisão do manuscrito. Fernando Jorge Pedrosa Maia Junior: revisão do manuscrito.

FONTES DE FINANCIAMENTO

Esta pesquisa não obteve financiamento específico de agências públicas, comerciais ou sem fins lucrativos.

DECLARAÇÃO SOBRE O USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Neste trabalho, os autores utilizaram ferramentas baseadas em inteligência artificial para auxiliar na organização e sistematização das informações. Em particular, o modelo de linguagem ChatGPT, desenvolvido pela OpenAI, foi empregado para realizar resumos de artigos científicos, com o objetivo de agilizar a triagem e compreensão do conteúdo bibliográfico. Além disso, a ferramenta foi utilizada para ajustar e padronizar referências bibliográficas, de acordo com as normas exigidas pelo periódico. Ressalta-se que todas as informações processadas pela IA foram revisadas criticamente pelos autores, assegurando a precisão e a integridade científica do material apresentado.