

HIDROGÊNIO VERDE EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA: FUNDAMENTOS TERMOQUÍMICOS, DESEMPENHO, EMISSÕES E DESAFIOS TECNOLÓGICOS

**GREEN HYDROGEN IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES:
THERMOCHEMICAL FUNDAMENTALS, PERFORMANCE, EMISSIONS AND
TECHNOLOGICAL CHALLENGES**

Ciências Exatas e da Terra, Engenharias • 30/09/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/790753056](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/790753056)

David Willames do Rego Coimbra¹

Jacó Moreira de Aguiar²

Renildo da Silva do Nascimento³

Gilson dos Santos Costa⁴

Wedson Medeiros Silva Souto⁵

Ana Maria Silva Costa⁶

Elvis Presley Teixeira Silva⁷

Maria Aparecida dos Santos Sousa⁸

Murilo Benicio Araujo Sousa⁹

Luiz Geraldo Almeida Machado¹⁰

Júlio Fernando Sousa de Carvalho¹¹

Ana Cláudia Batista Almeida Souza¹²

Elizângela Batista Almeida¹³

Francisco Emerson Alves de Sousa¹⁴

Marcelly de Fátima Pestana Vieira Silva¹⁵

Divino Toledo Pereira¹⁶

RESUMO

A crescente necessidade de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis tem ampliado o interesse pelo hidrogênio como vetor energético e combustível para sistemas de conversão de energia. Entre as possibilidades existentes, sua utilização em motores de combustão interna apresenta características particulares, pois combina um combustível sem carbono em sua estrutura molecular com uma tecnologia mecânica amplamente consolidada. Este trabalho analisa criticamente a aplicação do hidrogênio verde em motores de combustão interna, relacionando sua produção eletrolítica às propriedades físico-químicas do H_2 , à formação da mistura, à cinética de combustão, ao desempenho termodinâmico e às emissões. A análise contempla injeção direta e indireta, combustão pobre, pré-ignição, retorno de chama, detonação, recirculação dos gases de escape, injeção de água, pós-tratamento e sistemas dual-fuel. Resultados experimentais indicam que motores adequadamente desenvolvidos para H_2 podem alcançar eficiência térmica superior a 40% em determinadas configurações. A ausência de carbono no combustível praticamente elimina o CO_2 diretamente relacionado à sua oxidação, mas não impede a formação de óxidos de nitrogênio, fortemente dependente da temperatura, da razão de equivalência e da estratégia de combustão. Combinações entre mistura ultrapobre, recirculação dos gases de escape, injeção de água e tratamento catalítico têm produzido reduções expressivas de NO_x sem necessariamente comprometer a eficiência. Apesar desses resultados, a análise exclusiva do motor é insuficiente para caracterizar a sustentabilidade da tecnologia. Produção eletrolítica, origem da eletricidade, compressão, armazenamento e distribuição introduzem perdas e impactos que precisam ser incorporados à avaliação.

Palavras-chave: hidrogênio verde; motores de combustão interna; combustão; NOx; eficiência térmica; eletrólise; energia.

ABSTRACT

The growing need to reduce dependence on fossil fuels has increased interest in hydrogen as an energy carrier and fuel for energy conversion systems. Among the available alternatives, its use in internal combustion engines has particular characteristics, combining a carbon-free fuel at the molecular level with a well-established mechanical technology. This paper critically examines the application of green hydrogen in internal combustion engines by relating electrolytic hydrogen production to the physicochemical properties of H₂, mixture formation, combustion kinetics, thermodynamic performance, and emissions. Direct and port fuel injection, lean combustion, pre-ignition, backfire, knocking, exhaust gas recirculation, water injection, exhaust after-treatment, and dual-fuel systems are discussed. Experimental results indicate that properly developed hydrogen engines can achieve brake thermal efficiencies above 40% under specific configurations. Although the absence of carbon in hydrogen virtually eliminates fuel-derived CO₂ during combustion, nitrogen oxides may still be formed and are strongly dependent on temperature, equivalence ratio, and combustion strategy. Ultra-lean combustion combined with exhaust gas recirculation, water injection, and catalytic after-treatment has produced substantial NOx reductions without necessarily sacrificing efficiency. Nevertheless, engine-level analysis alone is insufficient to determine the overall sustainability of hydrogen propulsion.

Keywords: green hydrogen; internal combustion engines; combustion; NOx; thermal efficiency; electrolysis; energy.

1. INTRODUÇÃO

A história dos motores de combustão interna foi marcada, durante boa parte do século XX, pela procura de maior potência, menor consumo específico e aumento da durabilidade. O controle das emissões ganhou importância progressivamente e, nas últimas décadas, passou a interferir diretamente na arquitetura dos motores, nos combustíveis e nos sistemas de pós-tratamento. Atualmente, eficiência e potência continuam relevantes, mas já não podem ser dissociadas da origem da energia e das emissões associadas à sua conversão (Ampah et al., 2024).

A eletrificação constitui uma das principais respostas a esse problema. Seu avanço, porém, não elimina a necessidade de investigar outras rotas. As exigências de um automóvel utilizado predominantemente em ambiente urbano são diferentes daquelas encontradas em caminhões de longa distância, máquinas agrícolas, equipamentos de mineração, grupos geradores e embarcações. Autonomia, massa, disponibilidade operacional, tempo de abastecimento e infraestrutura assumem pesos distintos em cada aplicação. É nesse cenário que o hidrogênio voltou a ocupar espaço relevante na pesquisa sobre motores.

O interesse pelo H_2 apresenta uma característica que o diferencia de combustíveis primários. O hidrogênio não está disponível como fonte energética pronta para utilização em quantidade significativa; precisa ser produzido. Nesse sentido, funciona como vetor energético. Energia proveniente de outra fonte é utilizada para obtê-lo, armazená-lo e disponibilizá-lo para posterior conversão.

Quando produzido pela eletrólise da água utilizando eletricidade renovável, o combustível é geralmente denominado hidrogênio verde. A denominação, embora útil, precisa ser interpretada com

cuidado. A molécula que entra no cilindro permanece sendo H_2 independentemente da rota utilizada em sua produção. O motor não distingue hidrogênio produzido por eletrólise alimentada por energia eólica daquele obtido a partir de uma rota intensiva em carbono. Para a avaliação ambiental, entretanto, essa diferença é fundamental.

Ajeeb, Costa Neto e Baptista (2024), ao examinarem estudos de avaliação do ciclo de vida da produção eletrolítica, identificaram a fonte de eletricidade, a tecnologia de eletrólise, o consumo energético, a vida útil dos equipamentos e os materiais empregados como variáveis importantes na determinação do impacto ambiental. Isso exige uma leitura mais ampla: um motor alimentado por hidrogênio não pode ser classificado ambientalmente apenas pelo que sai do escapamento.

Do ponto de vista da Engenharia Mecânica, o H_2 apresenta uma vantagem industrial interessante. Diferentemente de uma mudança completa de princípio de propulsão, sua combustão permite preservar parte substancial do conhecimento acumulado em projeto e fabricação de motores. Bloco, pistões, virabrequim, cabeçote, sistema de lubrificação, arrefecimento e sobrealimentação permanecem conceitualmente reconhecíveis. Isso não significa, entretanto, que um motor convencional possa simplesmente receber H_2 no lugar de gasolina ou diesel.

A baixa densidade do gás, sua elevada difusividade, ampla faixa de inflamabilidade, reduzida energia mínima de ignição e elevada velocidade de chama alteram profundamente a formação da mistura e a evolução da combustão. Sistemas de admissão, injetores,

ignição, gerenciamento térmico e controle eletrônico precisam ser adaptados (Algayyim et al., 2024; Gao et al., 2025).

É justamente nessa combinação de vantagens e dificuldades que se encontra uma das questões mais interessantes do H_2 . A elevada velocidade de chama pode aproximar a liberação de calor da região termodinamicamente favorável do ciclo. A ampla inflamabilidade permite operar com excesso de ar muito superior ao usual em motores convencionais. Em contrapartida, a pequena energia necessária para iniciar a combustão aumenta a sensibilidade da mistura a superfícies aquecidas, gases residuais e outros pontos capazes de desencadear pré-ignição.

Nas emissões, surge um compromisso semelhante. Como não existe carbono na molécula, a oxidação do combustível não apresenta uma rota química direta para formação de CO_2 . Entretanto, o motor recebe ar e, em temperaturas elevadas, nitrogênio e oxigênio participam de mecanismos responsáveis pela formação de NO. O problema muda de natureza: a redução de CO_2 diretamente relacionada ao combustível passa a coexistir com a necessidade de controlar NOx.

Resultados experimentais ilustram essa situação. Zhao et al. (2024), em um motor de injeção direta otimizado para H_2 , obtiveram eficiência térmica de frenagem de 41,7% em $\lambda = 2,67$, enquanto Zhang et al. (2024) reportaram eficiência térmica de frenagem de 43,03% após otimização multiparamétrica da injeção e da ignição. Em outra abordagem, Wu et al. (2025) associaram operação ultrapobre e pós-tratamento SCR, alcançando aproximadamente 44% de eficiência térmica e NOx de 0,2 g/kWh em condições específicas. Esses valores não são diretamente intercambiáveis, pois

pertencem a arquiteturas, cargas e estratégias de controle distintas; sua utilidade está em demonstrar o potencial do H₂-ICE quando a configuração experimental é explicitada.

Esses resultados mostram que a questão deixou de ser simplesmente saber se o hidrogênio funciona em um motor. A pergunta mais relevante é determinar sob quais condições essa combustão consegue reunir eficiência, potência, estabilidade e baixas emissões.

O limite do motor, porém, não encerra a análise. Uma eficiência térmica elevada no dinamômetro não significa, por si só, elevada eficiência do sistema energético. Antes de chegar ao motor, a eletricidade precisa ser transformada em H₂; posteriormente o gás precisa ser condicionado, comprimido, armazenado e distribuído. Cada etapa consome parte da energia inicialmente disponível.

Dessa maneira, o presente trabalho analisa o hidrogênio verde em motores de combustão interna estabelecendo uma ligação entre Química, Termodinâmica e Engenharia Mecânica. O objetivo é compreender como produção eletrolítica, propriedades físico-químicas, cinética de combustão, formação da mistura e estratégias de controle se refletem no desempenho do motor e, em uma escala mais ampla, na eficiência da cadeia energética.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este estudo foi desenvolvido como revisão bibliográfica crítica de caráter narrativo, orientada para a integração entre Química, Termodinâmica, Engenharia Mecânica e Ciência dos Materiais. A busca concentrou-se em trabalhos publicados principalmente entre 2020 e 2026, sem excluir estudos anteriores quando necessários à

explicação de mecanismos consolidados de combustão, propriedades do hidrogênio ou fundamentos eletroquímicos.

Foram priorizados artigos de periódicos científicos relacionados a hidrogênio, energia, combustão, motores, materiais e avaliação do ciclo de vida. Os descritores foram combinados em português e inglês, incluindo hydrogen internal combustion engine, green hydrogen, direct injection, port fuel injection, lean combustion, NOx, hydrogen embrittlement, electrolysis, life cycle assessment e hydrogen storage.

A seleção privilegiou estudos experimentais, análises numéricas validadas experimentalmente e trabalhos de síntese capazes de fornecer dados sobre eficiência térmica, potência, formação de NOx, estratégia de injeção, razão de equivalência, taxa de compressão, sobrealimentação, EGR, injeção de água, armazenamento e produção eletrolítica. Trabalhos com informações insuficientes para identificar as condições de operação foram utilizados apenas para contextualização e não como base para comparações quantitativas.

A comparação dos resultados foi realizada preservando, sempre que disponíveis, as condições em que cada valor foi obtido. Essa decisão reduz o risco de confrontar diretamente motores, cargas e estratégias de combustão que não são equivalentes. Assim, valores máximos de eficiência ou mínimos de emissão não foram interpretados isoladamente, mas em conjunto com rotação, carga, λ , sistema de injeção e recursos de controle empregados.

Por se tratar de revisão crítica narrativa, o objetivo não foi realizar meta-análise nem estabelecer estimativa estatística única para o desempenho dos H₂-ICE. A síntese buscou identificar convergências,

divergências e relações causais entre propriedades físico-químicas do combustível, comportamento da combustão, desempenho mecânico e impactos da cadeia energética.

A estratégia de busca foi empregada com finalidade de levantamento temático e aprofundamento crítico, e não como protocolo de revisão sistemática. O corpus bibliográfico final representado na lista de referências reúne 18 publicações, selecionadas por aderência ao escopo e utilidade para a interpretação de combustão, desempenho, emissões, materiais, armazenamento e cadeia energética. Não foram reconstruídos retrospectivamente números de registros recuperados ou excluídos, pois esses dados não foram documentados durante o levantamento. Por essa razão, não se apresenta fluxograma de seleção nem se atribui ao estudo caráter sistemático. Sempre que um resultado quantitativo foi utilizado, a revisão procurou preservar a configuração experimental ou computacional necessária à sua interpretação e vinculá-lo à publicação correspondente.

3. FUNDAMENTOS FÍSICO-QUÍMICOS E PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE

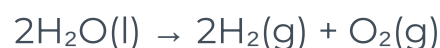
A eletrólise da água estabelece a primeira conexão entre Química e Engenharia no sistema analisado. Globalmente, o processo pode ser representado pela decomposição da água em hidrogênio e oxigênio. A reação não ocorre espontaneamente nas condições utilizadas e exige fornecimento de energia.

O balanço eletroquímico parece simples no papel, mas a operação industrial depende de materiais, eletrodos, membranas, catalisadores, temperatura, pressão e densidade de corrente. A

eletrólise alcalina apresenta elevada maturidade tecnológica e custos relativamente competitivos para produção em grande escala. Sistemas PEM oferecem resposta dinâmica rápida e elevada densidade de corrente, características interessantes para integração com fontes renováveis variáveis, embora apresentem desafios relacionados a materiais e custos (Ajeeb; Costa Neto; Baptista, 2024).

A intermitência das fontes renováveis acrescenta outra dificuldade. Eletrolisadores alimentados diretamente por geração solar ou eólica não trabalham necessariamente em regime constante. Variações de potência podem modificar eficiência, pureza do gás e vida útil dos componentes. Por isso, estratégias de operação e gerenciamento do eletrolisador tornaram-se parte importante do problema.

Essa observação é relevante para a análise do motor porque a energia química disponível no H_2 já representa apenas uma parcela da eletricidade inicialmente fornecida. Valores reportados para sistemas industriais variam conforme tecnologia e base de cálculo. Não se deve interpretar esses números como constantes universais. Pressão de operação, temperatura, carga, envelhecimento e equipamentos auxiliares modificam o consumo real.

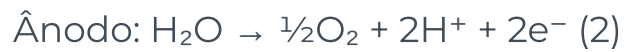


Em meio ácido, as semirreações podem ser representadas por:



A semirreação catódica explicita a etapa de formação do H_2 e ajuda a compreender por que materiais de eletrodo e catalisadores influenciam diretamente a eficiência do processo. Na prática,

sobretensões e resistências internas afastam o sistema do comportamento ideal representado pela equação.



No ânodo ocorre a etapa complementar de evolução de oxigênio, cuja cinética pode impor perdas relevantes ao processo eletrolítico. A leitura conjunta das duas semirreações evidencia que a produção de H_2 depende não apenas da disponibilidade de eletricidade, mas também do desempenho eletroquímico dos materiais envolvidos.

3.1. Propriedades Físico-Químicas do H_2 e Implicações para o Projeto do Motor

A análise do hidrogênio como combustível torna-se mais clara quando suas propriedades são relacionadas diretamente às exigências do motor. A elevada energia específica em massa é frequentemente apresentada como vantagem, mas a baixa densidade em condições ambientais produz baixa densidade energética volumétrica. Em aplicações móveis, essa diferença explica por que o armazenamento ocupa papel tão importante quanto a própria combustão (Algayyim et al., 2024; Gao et al., 2025).

A elevada difusividade favorece a mistura do H_2 com o ar e pode contribuir para uma distribuição mais rápida do combustível. Ao mesmo tempo, pequenas dimensões moleculares aumentam as exigências de vedação e tornam vazamentos uma preocupação de projeto. A ampla faixa de inflamabilidade permite explorar misturas muito pobres, enquanto a baixa energia mínima de ignição aumenta a sensibilidade a superfícies aquecidas e gases residuais.

Essas características não devem ser classificadas isoladamente como vantagens ou desvantagens. O efeito depende da arquitetura do motor. Uma elevada velocidade de chama, por exemplo, pode aproximar a liberação de calor da região termodinamicamente desejável, mas também pode elevar a taxa de crescimento da pressão e reduzir a margem disponível para evitar combustão anormal.

A relação entre as propriedades do combustível e as exigências de projeto é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Relação entre as propriedades do H₂ e suas implicações para o motor.

Propriedade	Potencial contribuição	Implicação de projeto
Alta energia específica em massa	Menor massa de combustível	Não resolve a baixa densidade volumétrica
Alta difusividade	Mistura rápida com o ar	Maior exigência de vedação
Ampla inflamabilidade	Operação ultrapobre	Maior faixa de mistura inflamável
Baixa energia de ignição	Facilidade de ignição	Pré-ignição e retorno de chama
Elevada velocidade de chama	Combustão rápida	Maior taxa de elevação de pressão
Ausência de carbono no H ₂	Sem CO ₂ da oxidação do combustível	NOx e emissões a montante permanecem relevantes

Fonte: elaboração própria com base nos estudos discutidos nesta seção.

A relação entre propriedades e implicações de projeto mostra a natureza ambivalente do H_2 como combustível. Características que favorecem a combustão, como ampla inflamabilidade e baixa energia de ignição, também ampliam a sensibilidade a fenômenos anormais. Da mesma forma, a elevada energia por unidade de massa não elimina a limitação volumétrica. O projeto do motor precisa, portanto, explorar as vantagens do combustível sem tratar suas propriedades isoladamente.

3.2. Cinética de Combustão: Do H_2 à Chama

A combustão do hidrogênio não ocorre por uma reação única. A equação global esconde uma cadeia de reações elementares envolvendo espécies intermediárias altamente reativas, entre elas H , O , OH e HO_2 . Essas espécies participam dos mecanismos de iniciação, propagação, ramificação e terminação da cadeia.

Do ponto de vista do motor, o resultado é uma chama capaz de se propagar rapidamente em uma faixa de composição muito mais ampla que aquela normalmente associada a hidrocarbonetos convencionais. Essa característica pode ser explorada termodinamicamente. Se uma parcela elevada da energia química for liberada próxima ao ponto ideal do ciclo, maior quantidade dessa energia poderá ser convertida em trabalho durante a expansão.

Contudo, existe um limite. Uma combustão excessivamente rápida eleva a taxa de aumento da pressão. Além disso, a reduzida energia necessária para iniciar a reação torna a mistura mais suscetível a

focos não controlados de ignição. É por isso que a química do H₂ não pode ser separada do projeto mecânico do motor.



Dessa forma, a cinética de combustão do hidrogênio deve ser compreendida como um elemento determinante para o comportamento global do motor, uma vez que a elevada reatividade do H₂ influencia simultaneamente a velocidade de propagação da chama, a taxa de liberação de calor, a evolução da pressão no interior do cilindro e a ocorrência de fenômenos de combustão anormal. O controle adequado dessas características depende da interação entre composição da mistura, estratégia de ignição, razão de equivalência, temperatura, pressão e geometria da câmara de combustão.

Portanto, compreender as etapas elementares que conduzem à formação da água permite não apenas explicar a elevada velocidade de combustão do hidrogênio, mas também estabelecer as bases para a análise de seu desempenho termodinâmico, de sua eficiência e de suas emissões. Nesse sentido, a cinética química constitui a ligação entre as propriedades fundamentais do H₂ e as condições efetivamente observadas durante o funcionamento do motor, aspecto que será aprofundado nas discussões subsequentes sobre liberação de calor, transferência térmica e desempenho energético.

4. COMBUSTÃO E FORMAÇÃO DA MISTURA EM MOTORES H₂-ICE

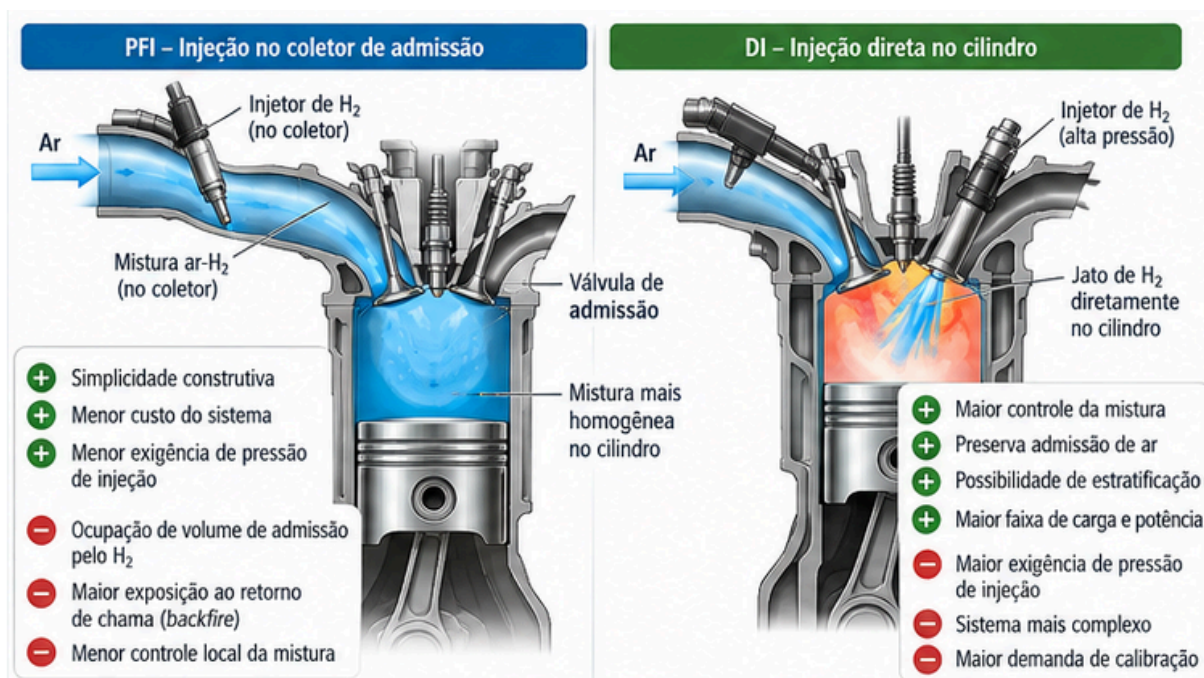
Duas estratégias concentram grande parte das aplicações: injeção no coletor e injeção direta. No PFI, o H₂ é introduzido antes da válvula de admissão. A solução apresenta relativa simplicidade e exige menos alterações no motor. Entretanto, o combustível gasoso

ocupa volume que poderia ser preenchido por ar, reduzindo a massa de oxigênio admitida (Goyal et al., 2024; Khalid et al., 2024).

O problema não se resume à eficiência volumétrica. A existência de uma mistura inflamável no sistema de admissão cria condições para retorno de chama. Pontos quentes, gases residuais, sincronização inadequada e temperaturas elevadas podem iniciar uma combustão capaz de avançar para o coletor (Khalid et al., 2024).

A injeção direta modifica esse cenário. O cilindro pode ser inicialmente preenchido com ar e o combustível introduzido posteriormente. Além de recuperar parte da eficiência volumétrica, a estratégia oferece maior liberdade sobre a distribuição espacial do H_2 . A vantagem, porém, traz novas variáveis. Pressão de injeção, início e término da injeção, geometria do jato e movimento do ar determinam quanto tempo o combustível terá para se misturar antes da ignição (Goyal et al., 2024).

Figura 1. Comparação conceitual entre injeção no coletor (PFI) e injeção direta (DI) em motores a H_2 .



Fonte: elaboração dos autores com auxílio de inteligência artificial generativa, com base nos estudos discutidos nesta seção (2026).

A comparação entre PFI e DI deixa claro que a escolha do sistema de injeção altera mais do que o ponto de introdução do combustível. No PFI, a simplicidade construtiva é acompanhada pela ocupação de parte do volume de admissão pelo H_2 e por maior exposição ao retorno de chama. Na DI, a separação temporal entre admissão de ar e fornecimento de combustível amplia a liberdade de formação da mistura, mas transfere complexidade para pressão de injeção, geometria do jato e calibração. Portanto, não existe uma solução universalmente superior: a arquitetura deve ser compatibilizada com carga, potência requerida e estratégia de controle.

Resultados experimentais mostram que existe uma janela de injeção dentro da qual formação da mistura, eficiência e emissões se aproximam de uma condição favorável. Atrasos excessivos podem criar regiões localmente ricas, elevar temperaturas e aumentar NO_x (Zhao et al., 2024; Zhang et al., 2024). Mohamed et al. (2024), ao otimizar o comando de válvulas e a sobreposição em um motor de injeção direta de H_2 , também demonstraram que alterações no

gerenciamento de carga podem elevar a eficiência e reduzir NO_x, reforçando a dependência entre arquitetura, calibração e resultado experimental.

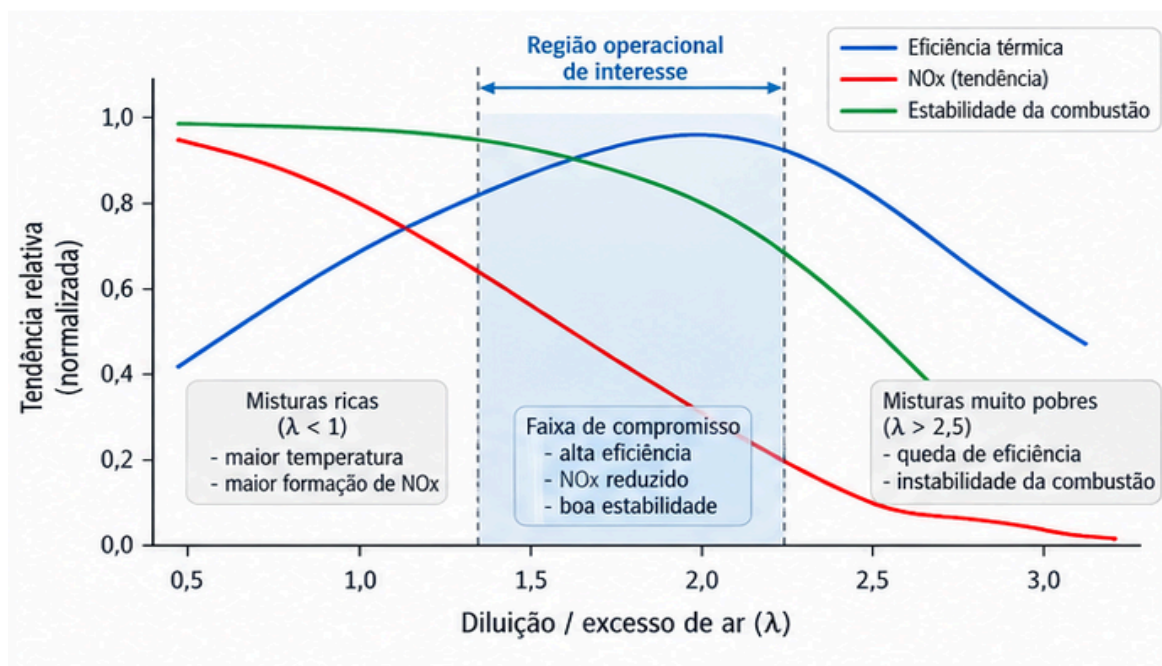
Dessa forma, a escolha entre PFI e injeção direta não pode ser reduzida à simplicidade construtiva ou ao ganho de potência. O sistema de injeção define parte importante da margem disponível para controlar mistura, combustão anormal e emissões, tornando sua calibração um elemento central no desenvolvimento do H₂-ICE.

4.1. Combustão Pobre e Eficiência Térmica

A ampla inflamabilidade do H₂ permite explorar razões ar-combustível que seriam impraticáveis com diversos combustíveis convencionais. Para valores de λ superiores a 1, a mistura contém excesso de ar. À medida que a quantidade de ar aumenta, a energia liberada pelo combustível é distribuída por maior massa gasosa. Em determinadas condições, a temperatura de pico diminui, reduzindo a tendência de formação térmica de NO (Gao et al., 2025).

Há, contudo, uma região ótima. Empobrecer indefinidamente a mistura não produz benefícios indefinidamente crescentes. Próximo ao limite de inflamabilidade, aumentam as variações ciclo a ciclo e a possibilidade de falhas de combustão.

Figura 2. Compromisso conceitual entre diluição, eficiência, NO_x e estabilidade da combustão.



Fonte: elaboração dos autores com auxílio de inteligência artificial generativa, com base nos estudos discutidos nesta seção (2026).

O compromisso entre diluição, eficiência, formação de NOx e estabilidade é representado conceitualmente na Figura 2. O comportamento esquematizado sintetiza um dos principais compromissos dos motores a hidrogênio. O aumento da diluição tende a reduzir a temperatura de combustão e, conseqüentemente, a formação térmica de NOx; entretanto, quando a mistura se aproxima do limite pobre, a estabilidade passa a deteriorar-se. A região de interesse tecnológico situa-se, portanto, entre esses extremos, onde a redução de emissões ainda pode ser conciliada com eficiência elevada e regularidade ciclo a ciclo.

Experimentos com injeção direta confirmam esse comportamento. O aumento do excesso de ar inicialmente favorece a eficiência e reduz NOx, mas o controle da combustão torna-se mais difícil à medida que a mistura se aproxima de condições extremamente diluídas. Configurações ultrapobres com eficiência térmica próxima de 45% demonstram que a redução de NOx não precisa necessariamente ocorrer à custa de perda acentuada de eficiência.

O benefício da combustão pobre, portanto, não decorre simplesmente do aumento de λ , mas da existência de uma faixa operacional em que diluição, velocidade de chama e estabilidade permanecem compatíveis. Fora dessa faixa, a redução adicional da temperatura pode ser anulada pelo aumento da variabilidade cíclica e pela deterioração da combustão.

$$\lambda = (A/F)_{\text{real}} / (A/F)_{\text{estequiométrico}} \quad (4)$$

A razão de excesso de ar fornece uma variável particularmente útil para interpretar a combustão de H_2 . Valores superiores à condição estequiométrica permitem explorar a ampla faixa de inflamabilidade do combustível, mas o aumento de λ não pode ser tratado como benefício ilimitado, pois misturas excessivamente pobres ampliam a variabilidade ciclo a ciclo e o risco de falhas de combustão.

4.2. Combustão Anormal: Pré-Ignição, Retorno de Chama e Detonação

As propriedades que favorecem combustão rápida também aumentam a sensibilidade do motor a fenômenos anormais. A pré-ignição ocorre quando a mistura inicia a combustão antes do instante programado de centelha. Depósitos, válvulas aquecidas, eletrodos e gases residuais podem atuar como fontes de ignição (Gao et al., 2025; Khalid et al., 2024).

O retorno de chama apresenta outro mecanismo. A chama se propaga em direção ao sistema de admissão, problema especialmente importante em sistemas PFI. A detonação envolve autoignição de parte da mistura ainda não consumida pela frente de chama, produzindo oscilações rápidas de pressão.

Em motores sobrealimentados, o fenômeno pode atingir condições ainda mais severas. Trabalhos experimentais registraram super-knock associado ao retorno de chama em motores turboalimentados a H_2 . Isso impõe limites concretos à tentativa de elevar indiscriminadamente carga e pressão de admissão.

Esses fenômenos mostram que a elevada reatividade do H_2 deve ser tratada simultaneamente como recurso e restrição de projeto. O aumento da densidade de potência exige, portanto, controle térmico, formação adequada da mistura e gerenciamento preciso da ignição para que o ganho de desempenho não reduza a margem de segurança da combustão.

5. DESEMPENHO, EMISSÕES E ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

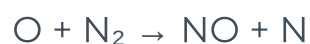
A origem do NO_x frequentemente provoca confusão porque nem o combustível nem a reação global ideal de H_2 contêm nitrogênio. A resposta está no ar. Em temperaturas elevadas, o mecanismo térmico de Zeldovich, incluindo sua extensão pela reação envolvendo o radical OH, permite que o N_2 participe de reações que levam à formação de NO. A velocidade dessas reações cresce fortemente com a temperatura e depende também da disponibilidade local de O, O_2 e OH (Gao et al., 2025).

Isso cria um compromisso fundamental: condições que produzem combustão rápida e elevada pressão podem também elevar temperaturas locais e favorecer NO_x . É nesse ponto que a expressão emissão zero perde precisão. O H_2 elimina a principal fonte de carbono associada ao combustível, mas não elimina automaticamente NO_x . Além disso, óleo lubrificante pode contribuir com pequenas emissões de CO_2 e outras espécies.

A recirculação dos gases de escape é uma das estratégias mais estudadas para reduzir NOx. Os gases recirculados aumentam a capacidade térmica da carga e reduzem a concentração de oxigênio, diminuindo temperaturas máximas. Quantidades excessivas, contudo, podem desacelerar a combustão e prejudicar estabilidade.

A injeção de água atua por caminho diferente. A água absorve energia durante aquecimento e vaporização, reduzindo temperaturas locais. Rueda-Vázquez et al. (2024) verificaram que a combinação de injeção de água e EGR reduziu as emissões de NOx em mais de 90% nas condições avaliadas, alcançando aproximadamente 98% no ponto de maior redução.

Mesmo com combustão pobre, EGR e gerenciamento térmico, determinadas regiões operacionais continuam produzindo NOx. Nesse cenário, sistemas catalíticos permanecem importantes. Wu et al. (2025) reportaram, em operação ultrapobre associada ao sistema SCR, eficiência térmica de aproximadamente 44% e NOx de 0,2 g/kWh em condições específicas.



A participação do radical OH mostra que a formação de NO está ligada à própria química da chama, e não apenas à presença macroscópica de N₂ e O₂. Isso explica por que mudanças no faseamento, na estratificação e na temperatura podem alterar significativamente as emissões mesmo quando o combustível permanece o mesmo.

5.1. Sistemas Dual-Fuel

A utilização de H_2 juntamente com outro combustível constitui uma alternativa de transição e, em determinadas aplicações, uma solução técnica própria. Em motores diesel, pequenas quantidades de combustível líquido podem iniciar a combustão enquanto o H_2 fornece parcela significativa da energia (Ampah et al., 2024; Gao et al., 2025).

Os benefícios aparecem principalmente na redução do consumo de combustível carbonáceo e de algumas emissões. O problema novamente é o NO_x . Ensaio envolvendo diferentes velocidades e cargas mostram que a introdução de H_2 pode aumentar a eficiência térmica em relação ao diesel convencional, enquanto o NO_x responde de maneira dependente do ponto operacional (Ampah et al., 2024).

Portanto, a porcentagem de substituição de diesel não deve ser utilizada isoladamente como medida de qualidade da estratégia. Mais H_2 significa menos carbono introduzido pelo combustível principal, mas pode significar temperaturas diferentes, outra taxa de liberação de calor e maior NO_x .

5.2. Taxa de Compressão, Sobrealimentação e Densidade de Potência

A taxa de compressão ocupa posição central na tentativa de elevar a eficiência dos H_2 -ICE. Em princípio, taxas maiores podem favorecer o aproveitamento termodinâmico da energia liberada. Na prática, o benefício precisa ser equilibrado com a temperatura final da compressão, pressão máxima, transferência de calor e possibilidade de combustão anormal.

Lou, Liu e Zhang (2025) avaliaram, em um H_2 -ICE de injeção direta e sobrealimentado, taxas de compressão de 9, 11 e 13 em conjunto com diferentes coeficientes de excesso de ar. Lou, Liu e Zhang (2025) observaram que a maior taxa de compressão ampliou o limite de operação pobre e que a eficiência térmica indicada atingiu 41,25% para a taxa de compressão 13 e $\lambda = 2,5$. O mesmo estudo mostrou que o aumento da taxa de compressão também modifica o faseamento da combustão e eleva a atenção necessária aos fenômenos anormais.

A sobrealimentação enfrenta um problema complementar. Em motores PFI, o H_2 gasoso desloca parte do ar admitido, reduzindo a quantidade de oxigênio disponível por ciclo. O aumento da pressão de admissão pode recuperar parte dessa densidade de carga e elevar torque e potência. Entretanto, maiores pressões e temperaturas estreitam a margem operacional em relação à pré-ignição, knock e super-knock (Goyal et al., 2024).

Assim, taxa de compressão e pressão de admissão não devem ser otimizadas de maneira independente. A região de maior eficiência precisa respeitar limites de pressão no cilindro, temperatura dos componentes, estabilidade ciclo a ciclo e NO_x .

5.3. Transferência de Calor e Perdas Térmicas

A transferência de calor merece maior atenção na análise do H_2 porque a eficiência térmica não depende apenas da rapidez da combustão. Parte da energia liberada é transferida para cabeçote, camisa, pistão e sistema de arrefecimento antes de ser convertida em trabalho.

A elevada velocidade de chama pode reduzir a duração global da combustão, mas a temperatura local e a área de contato dos gases quentes com as paredes continuam determinando perdas relevantes. Alterações na razão de equivalência, na turbulência e no faseamento da combustão modificam simultaneamente a liberação de calor e o fluxo térmico para as paredes.

Esse aspecto ajuda a compreender por que estratégias que produzem picos elevados de pressão nem sempre resultam na maior eficiência de frenagem. O ponto de máxima pressão, a duração da combustão, o atrito e as perdas térmicas precisam ser analisados em conjunto. Para motores de elevada carga, o gerenciamento térmico também interfere na resistência dos materiais, na temperatura das válvulas e na probabilidade de surgimento de pontos quentes capazes de iniciar pré-ignição.

A discussão da transferência de calor aproxima a análise de combustão da engenharia do componente. Geometria da câmara, relação superfície-volume, materiais do cabeçote e pistão, revestimentos térmicos e estratégia de arrefecimento podem modificar o resultado mesmo quando combustível e razão de equivalência permanecem constantes.

Portanto, a otimização térmica de um H_2 -ICE não termina na calibração da combustão. Ela exige compatibilizar o processo químico de liberação de energia com geometria, materiais e arrefecimento, pois a eficiência observada no eixo é resultado do balanço entre trabalho produzido e perdas que ocorrem durante todo o ciclo.

6. MATERIAIS, ARMAZENAMENTO E SEGURANÇA

Uma das propriedades mais frequentemente citadas do H_2 é sua elevada energia específica em massa. Isso é correto, mas incompleto. A baixa densidade do gás produz uma situação oposta quando a comparação é volumétrica. Para armazenar quantidade útil de energia em um veículo, torna-se necessário comprimir, liquefazer ou utilizar materiais capazes de absorver ou adsorver H_2 .

Cheng et al. (2024) descrevem que tanques automotivos modernos utilizam frequentemente estruturas compostas. Sistemas Tipo III empregam liner metálico envolvido por material compósito, enquanto tanques Tipo IV utilizam liner polimérico com reforço compósito. A compressão também consome energia e deve integrar o balanço energético.

Existe ainda uma questão diretamente ligada à Engenharia de Materiais: fragilização por hidrogênio. Átomos de hidrogênio podem penetrar em materiais metálicos e alterar mecanismos de deformação e fratura. A susceptibilidade depende da liga, microestrutura, tensão, temperatura e condições de exposição. Regiões soldadas merecem atenção especial em razão das tensões residuais e alterações microestruturais (Sun et al., 2024; Yu et al., 2024).

A literatura descreve diferentes mecanismos para interpretar esse dano, que podem atuar de forma concorrente e não devem ser tratados como explicações mutuamente exclusivas. Entre os mais discutidos estão a de coesão intensificada por hidrogênio (HEDE), associada à redução da coesão em regiões suscetíveis; a plasticidade localizada intensificada por hidrogênio (HELP), na qual o H favorece a mobilidade de discordâncias e a localização da deformação; e a formação de vacâncias induzidas por deformação intensificada por

hidrogênio (HESIV). A predominância de cada mecanismo depende da liga, microestrutura, estado de tensões, concentração de hidrogênio e condições de serviço, razão pela qual a fragilização não deve ser atribuída a um único processo universal (Sun et al., 2024; Yu et al., 2024).

Consequentemente, armazenamento e integridade dos materiais não são questões periféricas ao desempenho do motor. Elas condicionam pressão de abastecimento, massa do sistema, durabilidade e segurança, podendo determinar a viabilidade prática de uma arquitetura mesmo quando a combustão apresenta resultados termodinâmicos favoráveis.

6.1. Segurança, Vazamentos e Integridade dos Materiais

O emprego de hidrogênio exige que desempenho e segurança sejam tratados simultaneamente. Sua elevada inflamabilidade e alta permeabilidade impõem atenção especial a conexões, válvulas, tubulações, sensores e ventilação. Em sistemas pressurizados, vazamentos podem originar jatos de alta velocidade, enquanto o acúmulo do gás em espaços confinados cria condições para formação de misturas inflamáveis (Sattar et al., 2024).

A seleção de materiais constitui outro ponto crítico. O hidrogênio pode adsorver na superfície, penetrar em materiais metálicos, difundir-se pela microestrutura e interagir com discordâncias, interfaces e defeitos. O resultado pode ser redução da ductilidade, aceleração do crescimento de trincas e diminuição da resistência à fadiga em determinadas combinações de material, tensão, pressão e temperatura (Sun et al., 2024; Yu et al., 2024).

Uma revisão abrangente publicada em 2024 destacou que a fragilização por hidrogênio resulta da interação entre força motriz mecânica, microestrutura e presença de H, abrangendo aços, ligas de níquel e ligas de alumínio. A compreensão ainda é dificultada pela coexistência de diferentes mecanismos e pela forte dependência das condições de serviço (Yu et al., 2024).

Essa questão ganha importância especial em componentes submetidos a ciclos de abastecimento. Variações repetidas de pressão combinam carregamento mecânico cíclico com exposição ao H_2 . Por isso, critérios desenvolvidos para componentes convencionais não devem ser automaticamente transferidos para serviço com hidrogênio sem avaliação da compatibilidade do material.

Em termos de projeto, a segurança deve incluir prevenção, detecção e mitigação. Sensores de H_2 , ventilação adequada, válvulas de bloqueio, posicionamento criterioso de componentes e procedimentos de inspeção formam uma barreira complementar à escolha correta dos materiais.

Esse conjunto de medidas evidencia que segurança e durabilidade precisam ser incorporadas desde as etapas iniciais do projeto, e não adicionadas após a definição do sistema de propulsão. A confiabilidade do H_2 -ICE depende tanto do controle da combustão quanto da capacidade de manter o combustível confinado e os componentes estruturalmente íntegros ao longo da vida útil.

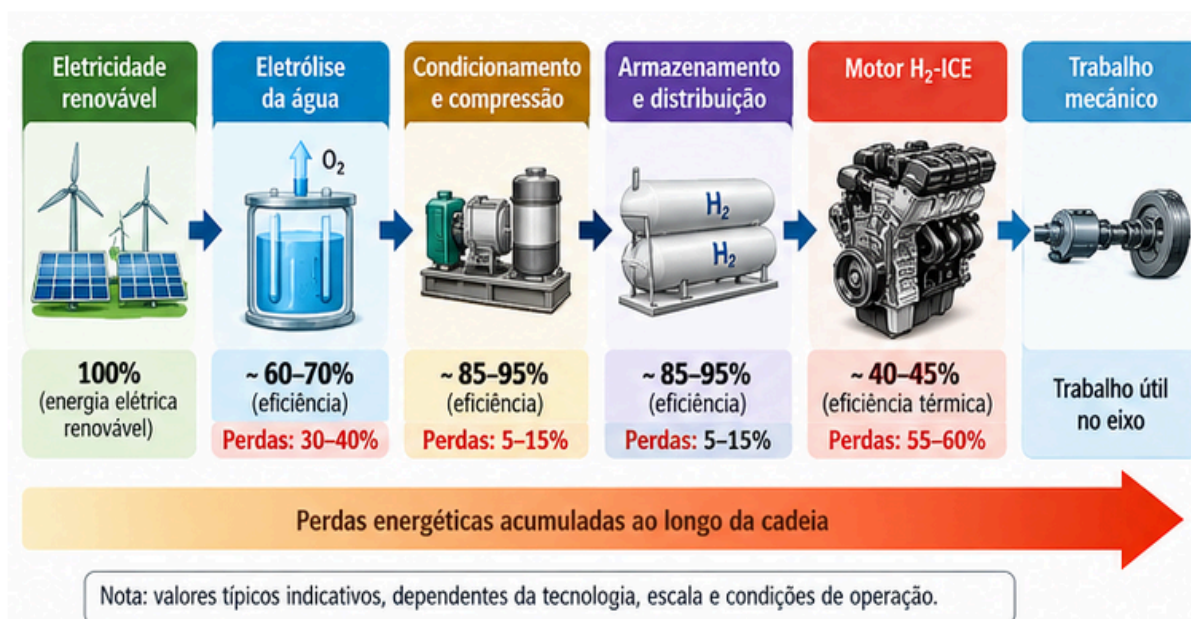
7. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E AVALIAÇÃO AMBIENTAL

A avaliação mais favorável ao H_2 -ICE geralmente aparece quando a fronteira começa no tanque. Entretanto, para hidrogênio verde, a

cadeia começa na eletricidade renovável, passa pela eletrólise, condicionamento, compressão, armazenamento e distribuição antes de chegar ao motor (Pashchenko, 2024).

A eficiência global resulta da combinação das eficiências de cada etapa. Essa relação deixa evidente que uma eficiência térmica de 44% no motor não significa que 44% da eletricidade renovável original será convertida em trabalho mecânico.

Figura 3. Cadeia simplificada de conversão energética do hidrogênio verde



Fonte: elaboração dos autores com auxílio de inteligência artificial generativa, com base nos estudos discutidos nesta seção (2026).

A sequência de conversões considerada na avaliação energética é apresentada esquematicamente na Figura 3. A representação evidencia que o desempenho ambiental e energético do hidrogênio não pode ser atribuído apenas ao motor. Entre a eletricidade renovável e o trabalho mecânico existem sucessivas etapas de conversão, condicionamento e armazenamento, cada uma

acompanhada por perdas. Assim, uma elevada eficiência térmica no eixo pode coexistir com uma eficiência global mais modesta, o que reforça a necessidade de analisar o H₂-ICE como parte de uma cadeia energética integrada.

A comparação com outras rotas precisa considerar essa diferença. É por isso que eletrificação direta, células a combustível e H₂-ICE não devem ser comparados apenas pelo rendimento do último equipamento.

$$\eta_{\text{global}} = \eta_{\text{eletrólise}} \times \eta_{\text{compressão}} \times \eta_{\text{armazenamento}} \times \eta_{\text{distribuição}} \times \eta_{\text{motor}} \quad (6)$$

A expressão torna explícito o caráter multiplicativo das perdas ao longo da cadeia. Uma etapa isoladamente eficiente não compensa necessariamente perdas relevantes nas demais; por isso, melhorias no motor devem ser avaliadas juntamente com eletrólise, compressão, armazenamento e distribuição.

7.1. Eficiência Energética do Poço à Roda (Well-To-Wheel, Wtw) e Avaliação do Ciclo de Vida

Uma avaliação centrada apenas no tanque e no motor pode superestimar o aproveitamento energético da rota do hidrogênio. Neste trabalho, a análise do poço à roda (Well-to-Wheel, WTW) compreende a energia consumida desde a produção e disponibilização do vetor energético até sua conversão em trabalho no veículo. Essa abordagem reúne, de forma simplificada, as etapas do poço ao tanque (Well-to-Tank, WTT) e do tanque à roda (Tank-to-Wheel, TTW). Para o hidrogênio verde, a fronteira energética começa na geração da eletricidade renovável e inclui eletrólise,

condicionamento, compressão ou liquefação, armazenamento, transporte, abastecimento e conversão no motor.

$$\eta_{\text{poço-roda}} = \eta_{\text{geração}} \times \eta_{\text{eletrólise}} \times \eta_{\text{condicionamento}} \times \eta_{\text{distribuição}} \times \eta_{\text{motor}} \quad (7)$$

A formulação do rendimento poço-roda amplia a fronteira de análise para além do tanque. Seu principal valor é impedir que a eficiência térmica do motor seja confundida com a eficiência da rota energética completa, sobretudo quando o H₂ precisa ser produzido, condicionado e transportado antes do uso final.

A expressão é deliberadamente simplificada, mas mostra por que o rendimento de uma etapa não representa o sistema completo. Mesmo um motor com eficiência superior a 40% recebe um combustível que já incorporou perdas anteriores.

A análise WTW não deve ser confundida com a avaliação do ciclo de vida (ACV). A primeira acompanha principalmente os fluxos de energia e, conforme a metodologia adotada, as emissões associadas à produção, distribuição e uso do combustível. A ACV utiliza uma fronteira mais ampla e pode incorporar produção de materiais, fabricação de equipamentos e veículos, infraestrutura, manutenção e fim de vida. Essa distinção é necessária porque um bom desempenho energético do motor não implica, isoladamente, menor impacto ambiental ao longo de toda a cadeia.

A origem da eletricidade é especialmente importante. O benefício climático do H₂ eletrolítico cresce quando a eletrólise é alimentada por fontes de baixa intensidade de carbono. Consequentemente, o mesmo motor pode apresentar resultados de ciclo de vida muito

diferentes em regiões com matrizes elétricas distintas (AJEEB; COSTA NETO; BAPTISTA, 2024; PUIG-SAMPER et al., 2024).

Para veículos, o raciocínio well-to-wheel também impede comparações simplistas. A eletrificação direta evita algumas conversões existentes na rota do H_2 , enquanto o hidrogênio pode oferecer vantagens operacionais em missões nas quais tempo de abastecimento, autonomia, massa ou disponibilidade do equipamento assumem peso elevado. A conclusão depende da missão, e não apenas da eficiência máxima de um componente.

Assim, a análise energética e ambiental deve ser orientada pela aplicação. O valor técnico do H_2 -ICE emerge da combinação entre desempenho do motor, origem do hidrogênio, logística e requisitos operacionais, e não de um único indicador isolado de eficiência ou emissão.

8. DISCUSSÃO CRÍTICA E PERSPECTIVAS TECNOLÓGICAS

O conjunto dos trabalhos analisados revela uma mudança importante na pesquisa sobre motores de hidrogênio. A questão inicial, centrada em demonstrar que o combustível poderia sustentar um motor convencional, perdeu importância. A investigação atual concentra-se em algo mais difícil: produzir elevada densidade de potência e eficiência mantendo a combustão controlada e o NO_x em níveis compatíveis com exigências ambientais cada vez mais rigorosas.

Os valores de eficiência acima de 40% encontrados em diferentes trabalhos demonstram que o H_2 -ICE pode operar em uma faixa elevada do ponto de vista estritamente termodinâmico. Contudo, esses resultados não aparecem simplesmente porque o combustível

foi substituído. São consequência de estratégias específicas de injeção, mistura pobre, sobrealimentação, gerenciamento térmico e controle da combustão.

Considerados em conjunto, os resultados de Zhao et al. (2024), Zhang et al. (2024) e Wu et al. (2025) mostram que eficiências superiores a 40% podem ser alcançadas por caminhos distintos. A comparação, contudo, deve permanecer condicionada à arquitetura do motor, à carga, ao excesso de ar, à estratégia de injeção e ao sistema de controle de emissões. O dado relevante não é a existência de um único valor máximo, mas a possibilidade de construir regiões operacionais favoráveis por diferentes combinações de projeto e calibração.

A formação de NO_x representa talvez o melhor exemplo dessa interdependência. Elevar a temperatura pode favorecer velocidade de reação e completar rapidamente a combustão, mas também acelera mecanismos térmicos de formação de NO. Reduzir a temperatura com diluição diminui NO_x, mas uma diluição excessiva pode prejudicar estabilidade. A solução dificilmente será uma única estratégia.

EGR, água, razão de equivalência, momento da centelha, pressão de admissão e instante de injeção precisam ser tratados como variáveis acopladas. O engenheiro não consegue retirar o N₂ do ar em um motor convencional, mas consegue modificar temperatura, composição e tempo de residência de maneira a tornar as reações menos favoráveis.

A diferença entre mistura homogênea e estratificada também interfere nesse equilíbrio. A injeção direta permite criar regiões com

concentrações diferentes de H_2 . Isso pode melhorar ignição e estabilidade em condições globalmente pobres. Entretanto, regiões localmente próximas da estequiometria ou ricas podem atingir temperaturas elevadas e tornar-se fontes de NO_x .

A discussão dos sistemas dual-fuel apresenta dificuldade semelhante. Adicionar H_2 ao diesel geralmente reduz a quantidade de carbono introduzida e pode acelerar a combustão. Contudo, os experimentos mostram que NO_x não responde de maneira monotônica à porcentagem de H_2 . Carga e rotação interferem no resultado.

Uma estratégia coerente para aplicações futuras é utilizar controle dinâmico da fração de H_2 , ajustando-a conforme carga, rotação, temperatura, pressão e limite de NO_x . Sistemas de controle baseados em modelos e técnicas de inteligência artificial podem assumir função importante nesse cenário, desde que sejam validados em condições operacionais reais.

Existe, entretanto, uma questão ainda maior que o controle do cilindro. Quando a eletricidade renovável é convertida em H_2 e posteriormente o H_2 é queimado para recuperar energia mecânica, são introduzidas etapas que não existem na eletrificação direta. Isso não constitui, por si só, argumento para descartar a tecnologia. Eficiência energética não é o único critério de engenharia.

Uma solução pode aceitar maior perda energética se oferecer autonomia, menor tempo de parada, capacidade de armazenamento, aproveitamento de infraestrutura existente ou características operacionais que outra tecnologia não oferece adequadamente. Por isso, a comparação entre H_2 -ICE e baterias

precisa evitar tanto ignorar as perdas da produção de H_2 quanto concluir que a menor eficiência global torna o H_2 inútil em qualquer situação.

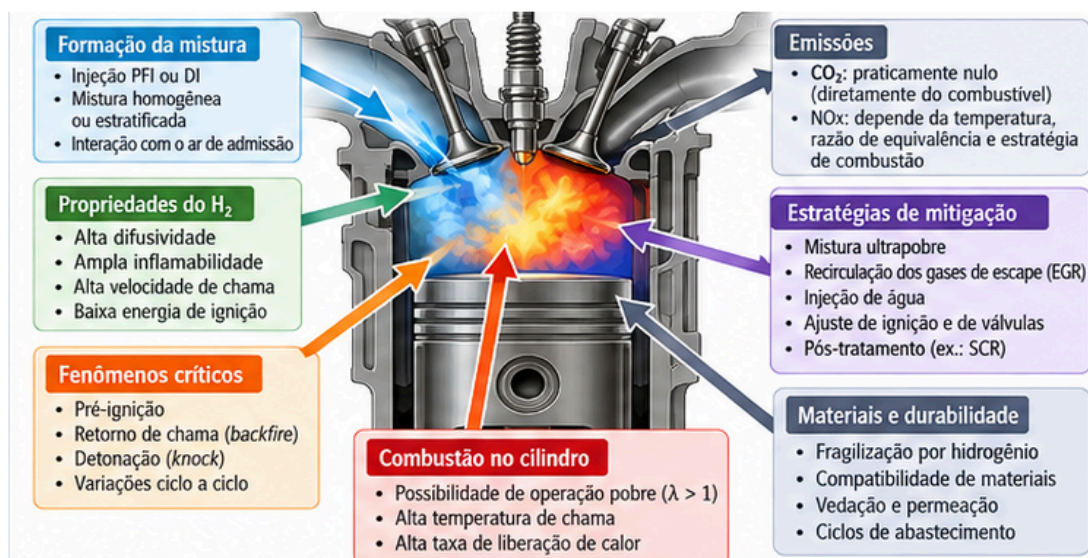
Outro ponto frequentemente negligenciado é a diferença entre emissão no escapamento e emissão no ciclo de vida. A avaliação ambiental dos sistemas de hidrogênio apresenta grande variabilidade em função de escolhas metodológicas, tecnologia, fonte energética e fronteiras de análise. Expressões como hidrogênio limpo ou emissão zero precisam, portanto, ser acompanhadas da definição da fronteira.

Dentro da reação principal de combustão, não existe CO_2 proveniente do H_2 . No escapamento de um motor real, pode existir NO_x e pequenas emissões carbonáceas provenientes do óleo. Na produção do combustível, o impacto depende fortemente da eletricidade e dos equipamentos. Na infraestrutura, entram materiais, compressão, transporte e armazenamento.

Esse cuidado conceitual fortalece a análise do H_2 verde. A vantagem ambiental deixa de depender de uma formulação genérica e passa a ser demonstrada pela combinação entre produção renovável, controle da combustão e aplicação adequada.

A integração entre propriedades do H_2 , formação da mistura, combustão, emissões, estratégias de mitigação e integridade dos materiais é sintetizada na Figura 4. A representação evidencia que o desempenho do H_2 -ICE depende do tratamento simultâneo de fenômenos químicos, térmicos, mecânicos e de controle.

Figura 4. Integração dos principais fenômenos, desafios e estratégias de controle em motores H_2 -ICE.



Fonte: elaboração dos autores com auxílio de inteligência artificial generativa, com base nos estudos discutidos nesta seção (2026).

A Figura 4 reforça que as propriedades que tornam o hidrogênio atraente para a combustão, como elevada difusividade, ampla inflamabilidade e alta velocidade de chama, também ampliam as exigências de controle. A formação da mistura por PFI ou DI interfere na ocorrência de pré-ignição e retorno de chama; o regime térmico influencia simultaneamente eficiência e formação de NOx; e estratégias como mistura ultrapobre,

EGR, injeção de água, ajuste de ignição e pós-tratamento precisam ser combinadas conforme o ponto operacional. Em paralelo, vedação, permeação e fragilização por hidrogênio mantêm a integridade dos materiais como parte do mesmo problema de engenharia, e não como questão isolada da combustão.

8.1. Perspectivas Tecnológicas

O desenvolvimento futuro dos motores de hidrogênio provavelmente ocorrerá menos pela introdução de um componente isolado e mais pela integração de diferentes tecnologias. A injeção direta tende a ganhar importância em aplicações que exigem

elevada densidade de potência. Sua capacidade de preservar a admissão de ar e controlar a estratificação oferece vantagens importantes, embora aumente as exigências sobre injetores e gerenciamento eletrônico (Goyal et al., 2024; Gao et al., 2025).

A combustão ultrapobre continuará sendo uma das ferramentas centrais para conciliar eficiência e NO_x. O desafio será estender essa região para maiores cargas sem aumentar a instabilidade ou provocar combustão anormal. EGR e injeção de água oferecem uma segunda camada de controle térmico, enquanto o pós-tratamento fornece uma terceira (Gao et al., 2025; Wu et al., 2025).

Outra frente importante está nos materiais. A infraestrutura de armazenamento e distribuição precisa conviver durante longos períodos com H₂ sob pressão. Fragilização, permeação, fadiga e comportamento das juntas soldadas precisam ser incorporados ao projeto (Sattar et al., 2024; Sun et al., 2024).

Na produção do combustível, materiais de eletrodos, catalisadores e membranas continuam sendo decisivos para reduzir o custo e aumentar a vida útil dos eletrolisadores. Há, portanto, uma convergência entre áreas: a Química determina as reações; a Ciência dos Materiais condiciona eletrodos, tanques, tubulações e componentes; a Termodinâmica estabelece limites de conversão; a Mecânica transforma pressão em trabalho; e a eletrônica controla o ponto operacional.

Os resultados experimentais selecionados são reunidos na Tabela 2 para permitir a comparação entre estratégias de combustão, eficiência e controle de emissões.

Tabela 2. Síntese comparativa de resultados experimentais.

Configuração	Estratégia	Resultado principal	Aspecto crítico
H ₂ -DI turboalimentado	Otimização da injeção, $\lambda = 2,67$	BTE de 40,4% para 41,7%	Injeção excessivamente tardia aumenta NOx Fonte: Zhao et al. (2024)
H ₂ -DI turboalimentado	Otimização multiparamétrica	BTE de 43,03%	NOx de 640,25 ppm na condição selecionada Fonte: Zhang et al. (2024)
H ₂ -PFI pesado	Ar e injeção de água	42% de eficiência; IMEP de 22 bar	Pequeno CO ₂ associado ao óleo Fonte: Gao et al. (2025), síntese de literatura
H ₂ ultrapobre + SCR	Lean burn + Cu-CHA	44% BTE; NOx de 0,2 g/kWh	Dependência da temperatura do catalisador Fonte: Wu et al. (2025)
H ₂ predominante + diesel piloto	Água + EGR	Redução de NOx superior a 90%	Controle conjunto necessário Fonte: Rueda-Vázquez et al. (2024)
H ₂ -DI	Otimização do comando de válvulas	+5% de eficiência	NOx reduzido em 54% Fonte: Mohamed et al. (2024)

Diesel-H ₂	Substituição parcial	Aumento de eficiência	NOx depende da rotação e da carga Fonte: Ampah et al. (2024); Gao et al. (2025)
-----------------------	----------------------	-----------------------	--

Fonte: elaboração própria a partir das publicações identificadas na coluna “Fonte”.

A síntese dos resultados experimentais revela que eficiências superiores a 40% são tecnicamente alcançáveis, mas surgem associadas a configurações e estratégias específicas. Injeção, excesso de ar, água, EGR e pós-tratamento modificam simultaneamente eficiência e emissões. Por isso, os valores máximos não devem ser comparados como se fossem propriedades intrínsecas do H₂; eles representam pontos operacionais obtidos sob condições particulares de projeto e calibração. A Tabela 3 amplia a análise para diferentes rotas de propulsão, destacando diferenças conceituais relevantes para a escolha tecnológica.

Tabela 3. Comparação conceitual das principais rotas.

Aspecto	Bateria + motor elétrico	H ₂ + célula a combustível	H ₂ + motor de combustão
Número de conversões energéticas	Menor	Intermediário	Maior
Combustão	Não	Não	Sim
NOx da propulsão	Não	Não	Pode ocorrer

Reabastecimento	Dependente da recarga	Rápido com infraestrutura adequada	Rápido com infraestrutura adequada
Aproveitamento da indústria de motores	Baixo	Parcial	Elevado
Complexidade do armazenamento de H ₂	Não	Sim	Sim
Sensibilidade à pureza do H ₂	Não aplicável	Elevada	Comparativamente menor
Aplicações pesadas	Dependente da missão	Potencialmente relevante	Potencialmente relevante

Fonte: elaboração própria com base nos estudos discutidos nesta seção.

A comparação entre as rotas evidencia que a escolha tecnológica envolve critérios que ultrapassam o rendimento de conversão. A eletrificação direta reduz o número de etapas energéticas, enquanto as rotas baseadas em H₂ introduzem armazenamento e condicionamento adicionais, mas podem apresentar características operacionais relevantes em determinadas missões. Assim, a adequação de cada solução depende da aplicação, da infraestrutura disponível e da fronteira adotada para a comparação.

8.2. Quadro Integrado de Limitações e Estratégias de Mitigação

As principais limitações identificadas ao longo da revisão e as estratégias investigadas para mitigá-las são consolidadas na Tabela 4.

Tabela 4. Limitações dos H₂-ICE e estratégias de mitigação.

Limitação	Origem predominante	Consequência	Estratégias investigadas
NOx	Altas temperaturas e N ₂ /O ₂ do ar	Emissões reguladas	Mistura pobre, EGR, água, SCR e ajuste de ignição
Pré-ignição	Baixa energia de ignição e pontos quentes	Perda de controle da combustão	Gerenciamento térmico e injeção direta
Backfire	Mistura inflamável na admissão	Risco e perda de desempenho	Injeção direta e sincronização da injeção
Baixa densidade volumétrica	Propriedade física do H ₂	Maior volume ou alta pressão	Compressão, liquefação e materiais de armazenamento
Fragilização	Interação H-material	Redução da integridade	Seleção de ligas, inspeção e projeto
Perdas da cadeia	Múltiplas conversões	Menor eficiência global	Eletrólise eficiente e logística otimizada

Fonte: elaboração própria com base nos estudos discutidos nesta seção.

A leitura integrada da Tabela 4 evidencia que as limitações dos H₂-ICE são acopladas. Estratégias de redução de NOx modificam temperatura e estabilidade da combustão; medidas destinadas a elevar densidade de potência podem estreitar a margem frente à pré-ignição; e soluções de armazenamento acrescentam massa, requisitos de segurança e consumo energético.

Consequentemente, a otimização não deve maximizar isoladamente eficiência, potência ou emissões, mas buscar uma solução de compromisso entre combustão, integridade dos materiais, segurança e desempenho da cadeia energética (Ampah et al., 2024; Sattar et al., 2024; Gao et al., 2025).

9. LACUNAS E AGENDA DE PESQUISA

Apesar do avanço observado nos últimos anos, algumas questões ainda impedem conclusões amplas. A primeira é a dificuldade de comparar resultados obtidos em motores com arquiteturas e condições experimentais distintas. Eficiência térmica, NOx ou potência não deveriam ser apresentados sem informações suficientes sobre carga, rotação, λ , taxa de compressão, sobrealimentação e estratégia de injeção.

A segunda lacuna é a distância entre experimentos de curta duração e a durabilidade exigida em aplicações comerciais. Injetores, válvulas, sedes, turbocompressores, sistemas de ignição e componentes de armazenamento precisam ser avaliados durante milhares de horas e sob ciclos reais de carga.

A terceira está na integração entre motor e cadeia energética. Estudos de combustão frequentemente começam no tanque, enquanto análises de ciclo de vida tratam o motor de maneira simplificada. Trabalhos que conectem mapas experimentais de eficiência e emissões do H₂-ICE a modelos regionais de produção e distribuição de H₂ podem fornecer resultados mais úteis para decisões de engenharia.

Também merece atenção a padronização das métricas utilizadas para classificar emissões. Expressões como zero emissão, carbono

zero e baixo carbono podem assumir significados diferentes conforme a fronteira considerada. Uma terminologia mais precisa facilita a comparação entre tecnologias e reduz interpretações inadequadas.

Entre as frentes ainda abertas, destaca-se o controle adaptativo. A grande sensibilidade do H_2 às condições de operação torna pouco provável que uma calibração fixa seja ideal em todo o mapa do motor. Controle em tempo real de injeção, ignição, EGR, pressão de admissão e, em sistemas dual-fuel, fração de H_2 constitui uma linha de pesquisa particularmente promissora.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A literatura analisada permite concluir que o hidrogênio pode sustentar motores de combustão interna com desempenho termodinâmico elevado, mas esse resultado não decorre simplesmente da substituição do combustível convencional por H_2 . Estudos experimentais recentes mostram eficiências superiores a 40% em configurações específicas, obtidas mediante combinação de injeção, excesso de ar, sobrealimentação, faseamento da combustão e gerenciamento térmico. Portanto, o desempenho deve ser interpretado a partir do conjunto motor-calibração-condição operacional, e não como propriedade universal do combustível.

A mesma interdependência aparece no controle de emissões. A ausência de carbono na molécula de H_2 elimina o CO_2 diretamente associado à oxidação do combustível, porém não impede a formação de NO_x . Combustão ultrapobre, EGR, injeção de água e pós-tratamento podem reduzir essas emissões, mas alteram simultaneamente estabilidade, temperatura, potência e eficiência.

O desafio técnico central é, portanto, definir uma região operacional capaz de conciliar eficiência, densidade de potência, estabilidade e controle de NOx. A análise também mostra que a viabilidade dos H₂-ICE não pode ser julgada exclusivamente no cilindro. Produção eletrolítica, origem da eletricidade, compressão, armazenamento, transporte, segurança e compatibilidade dos materiais acrescentam perdas e condicionantes que modificam a eficiência e o impacto ambiental da rota.

Nesse sentido, o caráter verde do sistema depende da cadeia que fornece o combustível e da fronteira utilizada na avaliação, e não apenas das emissões observadas no escapamento. Do ponto de vista tecnológico, os H₂-ICE apresentam maior coerência quando avaliados em aplicações nas quais autonomia, disponibilidade operacional, rapidez de abastecimento, elevada demanda de potência ou aproveitamento de conhecimento e infraestrutura de motores tenham peso relevante. Isso não os transforma em substitutos universais de baterias, células a combustível, gasolina ou diesel. A escolha entre essas alternativas deve ser vinculada à missão do equipamento, à disponibilidade energética e à infraestrutura existente.

Em síntese, a contribuição central desta revisão está em mostrar que o potencial dos motores a hidrogênio emerge da integração entre Química, Termodinâmica, Engenharia Mecânica e Ciência dos Materiais. O avanço da tecnologia dependerá menos da demonstração isolada de valores máximos de eficiência e mais da capacidade de controlar conjuntamente produção do H₂, armazenamento, formação da mistura, combustão, emissões e durabilidade. Estudos futuros que conectem mapas experimentais do motor a avaliações regionais da cadeia energética e a ensaios de

longa duração poderão delimitar com maior precisão as aplicações em que essa rota oferece vantagens técnicas e ambientais consistentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AJEEB, W.; COSTA NETO, R.; BAPTISTA, P. Life cycle assessment of green hydrogen production through electrolysis: a literature review. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 69, 103923, 2024. DOI: 10.1016/j.seta.2024.103923.

ALGAYYIM, S. J. M.; SALEH, K.; WANDEL, A. P.; FATTAH, I. M. R.; YUSAF, T.; ALRAZEN, H. A. Influence of natural gas and hydrogen properties on internal combustion engine performance, combustion, and emissions: a review. **Fuel**, v. 362, 130844, 2024. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.130844.

AMPAH, J. D. et al. Race towards net zero emissions (NZE) by 2050: reviewing a decade of research on hydrogen-fuelled internal combustion engines (ICE). **Green Chemistry**, v. 26, p. 9025-9047, 2024. DOI: 10.1039/D4GC00864B.

CHENG, Q.; ZHANG, R.; SHI, Z.; LIN, J. Review of common hydrogen storage tanks and current manufacturing methods for aluminium alloy tank liners. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**, v. 7, n. 2, p. 269-284, 2024. DOI: 10.1016/j.ijlmm.2023.08.002.

GAO, N.; GENG, Z.; ZHAO, W.; GENG, L.; DONG, F.; HUANG, D. Review on the combustion and emission characteristics of hydrogen engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 143, p. 121-146, 2025. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.05.321.

GOYAL, H.; JONES, P.; BAJWA, A.; PARSONS, D.; AKEHURST, S.; DAVY, M. H.; LEACH, F. C. P.; ESPOSITO, S. Design trends and challenges in hydrogen direct injection (H₂DI) internal combustion engines: a review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 86, p. 1179-1194, 2024. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.284.

KHALID, A. H.; SAID, M. F. M.; VEZA, I.; ABAS, M. A.; ROSLAN, M. F.; ABUBAKAR, S.; JALAL, M. R. Hydrogen port fuel injection: review of fuel injection control strategies to mitigate backfire in internal combustion engine fuelled with hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 66, p. 571-581, 2024. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.04.087.

LOU, D.; LIU, Y.; ZHANG, Y. Influence of Compression Ratio on Combustion and Emission Characteristics of Hydrogen Internal Combustion Engines Under Different Excess Air Coefficients. **Energies**, v. 18, n. 7, 1656, 2025. DOI: 10.3390/en18071656.

MOHAMED, M.; BISWAL, A.; WANG, X.; ZHAO, H.; HALL, J. Experimental investigation for enhancing the performance of hydrogen direct injection compared to gasoline in spark ignition engine through valve timings and overlap optimization. **Fuel**, v. 372, 132257, 2024. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.132257.

PASHCHENKO, D. Green hydrogen as a power plant fuel: What is energy efficiency from production to utilization? **Renewable Energy**, v. 223, 120033, 2024. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120033.

PUIG-SAMPER, G.; BARGIACCHI, E.; IRIBARREN, D.; DUFOUR, J. Life-cycle assessment of hydrogen systems: a systematic review and meta-regression analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 470, 143330, 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143330.

RUEDA-VÁZQUEZ, J. M.; SERRANO, J.; JIMÉNEZ-ESPADAFOR, F. J.; DORADO, M. P. Simultaneous optimization of water addition and exhaust gas recirculation in a hydrogen-fueled compression-ignition engine: numerical and experimental analysis. **Fuel**, v. 374, 132505, 2024. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.132505.

SATTAR, M. A.; RASUL, M. G.; JAHIRUL, M. I.; HASAN, M. M. An up-to-date review on the progress and challenges of hydrogen storage, and its safety and economic analysis. **Sustainable Energy & Fuels**, v. 8, p. 3545-3573, 2024. DOI: 10.1039/D4SE00281D.

SUN, B. et al. Current challenges in the utilization of hydrogen energy: a focused review on the issue of hydrogen-induced damage and embrittlement. **Advances in Applied Energy**, v. 14, 100168, 2024. DOI: 10.1016/j.adapen.2024.100168.

WU, G.; CHEN, H.; LI, Y.; GAO, H.; SUN, F.; DU, J.; LI, Y. Experimental investigation of NO_x emissions and SCR optimization in hydrogen internal combustion engines under full-range operating conditions. **Journal of the Energy Institute**, v. 123, 102232, 2025. DOI: 10.1016/j.joei.2025.102232.

YU, H. et al. Hydrogen embrittlement as a conspicuous material challenge: comprehensive review and future directions. **Chemical Reviews**, v. 124, n. 10, p. 6271-6392, 2024. DOI: 10.1021/acs.chemrev.3c00624.

ZHANG, S.-W.; SUN, B.-G.; LUO, Q.-H.; BAO, L.-Z.; LI, X.-Y.; LEACH, F. Experimental multiple parameters optimization of the injection strategies for a turbocharged direct injection hydrogen engine to achieve highly efficient and clean performance. **Energy**, v. 312, 133592, 2024. DOI: 10.1016/j.energy.2024.133592.

ZHAO, F. et al. Experimental and modeling investigations to improve the performance of the near-zero NO_x emissions direct-injection hydrogen engine by injection optimization. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 49, p. 713-724, 2024. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.09.039.

¹ Licenciatura Plena em Química, Universidade Estadual do Piauí - UESPI, Teresina, Piauí, Brasil. Mestre e Doutorando em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Piauí - UFPI, Teresina, Piauí, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9112-758X>. Lattes: <https://lattes.cnpq.br/0156962783585205>

² Bacharel em Engenharia Civil. Faculdade Única. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

³ Graduado em Química- Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Piauí (IFPI)- Campus Cocal. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8009915688479956>. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5673-6549>

⁴ Doutorando em química - UFPI. Lattes: <https://lattes.cnpq.br/6662101480693419>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0103-9153>

⁵ Doutor em Ciências Biológicas (Zoologia) pela UFPB. Universidade Federal do Piauí (UFPI), Departamento de Biologia, Laboratório de Etnobiologia e Sustentabilidade (LES). ORCID: <https://orcid.org/0000->

0001-7508-9175. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6517728431299455>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁶ Licenciatura Plena em Química, Universidade Estadual do Piauí - UESPI, Teresina, Piauí, Brasil. Mestre em Química, Universidade Estadual do Piauí - UESPI, Teresina, Piauí, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0565-3302>

⁷ Licenciatura Plena em Química, Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, São Luís, Maranhão, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7503538036896706>. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3762-5471>

⁸ Licenciatura em Geografia, Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, São Luís, Maranhão, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2423-2980>. Lattes: <https://lattes.cnpq.br/1451131235419958>

⁹ Licenciatura em Química. Instituto Federal do Piauí. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1307-0502>

¹⁰ Graduando Engenharia Civil. Centro Universitário Única

¹¹ Mestrado - Universidade Federal do Piauí - UFPI. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0266227084848647>. Lattes: <https://orcid.org/0009-0009-0442-7742>

¹² Licenciatura Plena em Química, Instituto Federal do Maranhão – IFMA, São Luís, Maranhão, Brasil. Mestrado Em Ciências com ênfase em Física De Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). Lattes: <https://lattes.cnpq.br/3971275998095349>

¹³ Licenciatura em Ciências com habilitação em Física, Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, São Luís, Maranhão, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). Lattes: <https://lattes.cnpq.br/4940368299229425>

¹⁴ Mestrando em Ciências e Engenharia de Materiais - Universidade Federal do Piauí. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

¹⁵ Licenciatura Plena em Ciências, Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, São Luís, Maranhão, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). Lattes: <https://lattes.cnpq.br/1291874057426574>. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2315-6155>

¹⁶ Eng. ELETRICISTA, Eng. SEGURANÇA TRABALHO, Bacharel Física, Matemática, acadêmico Eng. Civil. Acadêmico Faculdade Uniunica. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)