

# Combustíveis do Futuro - HVO, Biometano, Hidrogênio e Outras Alternativas

Autor: Gilles Laurent Grimberg

Outubro - 2025

## Resumo Executivo

A transição energética global exige não apenas a eletrificação do transporte, mas também o desenvolvimento de combustíveis alternativos sustentáveis para aplicações onde a eletrificação é desafiadora, como transporte pesado, aviação e navegação. Este artigo explora os principais combustíveis do futuro que estão ganhando destaque: o HVO (Diesel Verde), o Biometano, o Hidrogênio e outras alternativas emergentes. Cada um desses combustíveis oferece vantagens únicas em termos de redução de emissões, compatibilidade com infraestrutura existente e potencial de produção a partir de fontes renováveis.

## 1. HVO - Diesel Verde (Hydrotreated Vegetable Oil)

### 1.1. O Que é o HVO?

O HVO, ou óleo vegetal hidrotratado, é um diesel renovável produzido através de um processo de hidrotratamento de óleos vegetais, gorduras animais ou resíduos lipídicos (como óleo de cozinha usado). Diferentemente do biodiesel convencional (FAME - ésteres metílicos de ácidos graxos), o HVO passa por um processo químico que remove completamente o oxigênio da molécula, resultando em um produto quimicamente idêntico ao diesel fóssil, composto exclusivamente de hidrocarbonetos parafínicos.

### 1.2. Processo de Produção

O processo de produção do HVO envolve duas etapas principais:

- 1 Hidrodesoxigenação: A matéria-prima lipídica reage com hidrogênio sob alta pressão e temperatura, na presença de catalisadores, removendo o oxigênio na forma de água ( $H_2O$ ).
- 2 Isomerização e Craqueamento: As cadeias longas de hidrocarbonetos são quebradas e rearranjadas para se adequarem às especificações do diesel, melhorando propriedades como o ponto de fluidez a frio.

### 1.3. Vantagens do HVO

- Drop-in Fuel: O HVO pode ser usado puro (100%) ou em qualquer proporção de mistura com diesel fóssil, sem necessidade de modificações nos motores ou na infraestrutura de distribuição. Isso o diferencia do biodiesel, que tem limitações de mistura devido à sua menor estabilidade oxidativa e problemas em baixas temperaturas.

- Redução de Emissões: O HVO proporciona uma redução de até 90% nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) em comparação ao diesel fóssil, considerando a análise de ciclo de vida. Além disso, reduz significativamente as emissões de material particulado (MP), NO<sub>x</sub> e hidrocarbonetos.
- Desempenho Superior: O HVO possui um número de cetano muito elevado (geralmente acima de 70, comparado a 51 do diesel S10), o que resulta em uma combustão mais eficiente, partida mais suave e menor ruído do motor.
- Estabilidade: Ao contrário do biodiesel, o HVO é altamente estável e não sofre degradação por oxidação ou crescimento microbiano, permitindo armazenamento prolongado.

### 1.4. Desafios

- Custo: O HVO é atualmente mais caro que o diesel fóssil devido aos custos de produção e à disponibilidade limitada de matérias-primas sustentáveis.
- Escala de Produção: A produção global de HVO ainda é pequena em comparação à demanda por diesel, embora esteja crescendo rapidamente, especialmente na Europa e, mais recentemente, no Brasil.

## 2. Biometano - Gás Natural Renovável

### 2.1. O Que é o Biometano?

O biometano é um gás natural renovável obtido através da purificação do biogás. O biogás é produzido pela digestão anaeróbica de matéria orgânica (resíduos agrícolas, dejetos animais, lixo orgânico urbano, lodo de esgoto) por bactérias em ambientes sem oxigênio. O biogás bruto contém cerca de 50-70% de metano (CH<sub>4</sub>), além de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) e outros contaminantes.

Após a purificação, que remove o CO<sub>2</sub> e os contaminantes, o biometano atinge uma concentração de metano superior a 97%, tornando-se quimicamente idêntico ao gás natural fóssil e podendo ser utilizado nas mesmas aplicações.

### 2.2. Aplicações do Biometano

- Combustível Veicular: O biometano pode ser usado como GNV (Gás Natural Veicular) em veículos convertidos ou originalmente projetados para gás natural. É especialmente vantajoso para frotas de ônibus, caminhões e veículos de coleta de lixo.
- Geração de Energia: Pode ser injetado na rede de distribuição de gás natural ou usado em geradores para produção de eletricidade.

- Uso Industrial e Residencial: Substitui o gás natural fóssil em caldeiras, fornos e aquecedores.

### 2.3. Vantagens do Biometano

- Redução de Emissões: O biometano pode ser carbono neutro ou até carbono negativo, pois captura o metano que seria liberado naturalmente pela decomposição de resíduos orgânicos. A redução de emissões de GEE pode chegar a 80-100% em comparação aos combustíveis fósseis.
- Economia Circular: Transforma resíduos em energia, solucionando problemas ambientais relacionados ao descarte de dejetos e lixo orgânico.
- Potencial no Brasil: O Brasil possui um enorme potencial de produção de biometano devido à sua forte agroindústria. Estudos da EPE indicam que o biometano poderia substituir até um terço do consumo de gasolina e diesel no país.
- Infraestrutura Existente: Pode utilizar a infraestrutura de distribuição de gás natural já instalada.

### 2.4. Desafios

- Custo de Purificação: O processo de purificação do biogás para biometano requer investimentos em tecnologia.
- Logística: A produção é descentralizada, exigindo soluções para coleta e transporte do biogás ou injeção na rede.
- Infraestrutura de Abastecimento: A rede de postos de GNV ainda é limitada em muitas regiões.

## 3. Hidrogênio - O Vetor Energético Universal

### 3.1. O Que é o Hidrogênio como Combustível?

O hidrogênio ( $H_2$ ) é o elemento mais abundante do universo e pode ser usado como um vetor energético — uma forma de armazenar e transportar energia. Quando usado em uma célula de combustível, o hidrogênio reage com o oxigênio do ar para gerar eletricidade, calor e água como único subproduto. Alternativamente, pode ser queimado diretamente em motores de combustão adaptados.

### 3.2. Cores do Hidrogênio

A sustentabilidade do hidrogênio depende de como ele é produzido:

- Hidrogênio Cinza: Produzido a partir de gás natural por reforma a vapor, com emissão de  $CO_2$ . É o método mais comum atualmente.

- Hidrogênio Azul: Produzido da mesma forma que o cinza, mas com captura e armazenamento de carbono (CCS), reduzindo as emissões.
- Hidrogênio Verde: Produzido por eletrólise da água usando eletricidade de fontes renováveis (solar, eólica, hidrelétrica). É totalmente livre de emissões de carbono e representa o futuro sustentável do hidrogênio.

### 3.3. Aplicações do Hidrogênio

- Veículos com Célula de Combustível (FCEV): Carros, ônibus e caminhões equipados com células de combustível que convertem hidrogênio em eletricidade para mover motores elétricos. Exemplos incluem o Toyota Mirai e o Hyundai NEXO.
- Transporte Pesado: O hidrogênio é promissor para caminhões de longa distância, onde as baterias elétricas são limitadas pelo peso e tempo de recarga.
- Aviação e Navegação: Pesquisas estão em andamento para o uso de hidrogênio em aviões e navios.
- Indústria: Substituição de combustíveis fósseis em processos industriais de alta temperatura, como siderurgia.

### 3.4. Vantagens do Hidrogênio

- Zero Emissões no Ponto de Uso: A única emissão de um veículo a hidrogênio é vapor de água.
- Reabastecimento Rápido: Um veículo a hidrogênio pode ser reabastecido em 3-5 minutos, semelhante a um veículo a combustão.
- Alta Densidade Energética por Peso: O hidrogênio possui a maior densidade energética por massa de qualquer combustível.

### 3.5. Desafios

- Produção de Hidrogênio Verde: A eletrólise ainda é cara e requer grandes quantidades de energia renovável.
- Armazenamento e Transporte: O hidrogênio é um gás de baixa densidade que precisa ser comprimido a altas pressões (700 bar) ou liquefeito a -253°C, o que exige tecnologia avançada e é energeticamente intensivo.
- Infraestrutura: A rede de postos de abastecimento de hidrogênio é praticamente inexistente na maioria dos países.

- Eficiência Energética: O processo de produção, compressão, transporte e conversão do hidrogênio resulta em perdas energéticas significativas em comparação à eletrificação direta.

Combustível	Matéria-Prima	Redução de GEE	Compatibilidade	Principal Aplicação
HVO	Óleos vegetais, gorduras, resíduos	Até 90%	Drop-in (100% compatível)	Transporte rodoviário (diesel)
Biometano	Resíduos orgânicos, dejetos	80-100%	Compatível com GNV	Frotas urbanas, geração de energia
Hidrogênio Verde	Água + energia renovável	100%	Requer veículos específicos (FCEV)	Transporte pesado, indústria

Tabela 1: Comparativo dos principais combustíveis do futuro.

## 4. Outras Alternativas Emergentes

- E-Fuels (Combustíveis Sintéticos): Produzidos pela combinação de hidrogênio verde com CO<sub>2</sub> capturado, resultando em combustíveis líquidos sintéticos (e-diesel, e-querosene) compatíveis com motores existentes.
- Amônia Verde: A amônia (NH<sub>3</sub>) pode ser produzida a partir de hidrogênio verde e nitrogênio do ar, sendo mais fácil de armazenar e transportar que o hidrogênio puro. Pode ser usada diretamente como combustível ou como vetor para transporte de hidrogênio.
- Biocombustíveis Avançados: Produzidos a partir de algas, resíduos lignocelulósicos e outras fontes de segunda e terceira geração, sem competir com a produção de alimentos.

## 5. Conclusão

O futuro da mobilidade não dependerá de uma única solução, mas de um portfólio diversificado de combustíveis adaptados a diferentes aplicações. O HVO oferece uma transição imediata para o transporte rodoviário, o biometano aproveita resíduos e fortalece a economia circular, e o hidrogênio verde representa a fronteira da descarbonização profunda. O Brasil, com sua matriz energética renovável e vasto potencial agrícola, está em posição privilegiada para liderar a produção e o uso desses combustíveis do futuro, consolidando-se como uma potência global na transição energética.