

2025

WHITE PAPER



TENDÊNCIAS TECNOLÓGICAS PARA REDUZIR EMISSÕES EM VEÍCULOS FLEXFUEL



SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	3
LEGISLAÇÃO DE EMISSÕES NO BRASIL.....	4
ESTRATÉGIAS DE OTIMIZAÇÃO DA COMBUSTÃO.....	5
ESTRATÉGIAS DE PÓS-TRATAMENTO.....	8
ESTRATÉGIAS DE ELETRIFICAÇÃO.....	10
CONCLUSÃO	12

Avanços recentes na tecnologia automotiva abriram novos caminhos para a redução de emissões em veículos FlexFuel. O roteiro emergente para emissões utiliza múltiplas estratégias — incluindo técnicas aprimoradas de combustão, sistemas sofisticados de pós-tratamento e métodos inovadores de eletrificação — para atingir metas rigorosas de emissões de forma econômica. Ao integrar essas diversas abordagens tecnológicas, os futuros veículos FlexFuel poderão potencialmente alcançar emissões com impacto quase nulo, onde as emissões do escapamento seriam, em média, equivalentes ao nível de emissões do ar ambiente local.

Este artigo examina cada uma dessas tendências, explorando como o desenvolvimento dedicado nessas áreas pode ser sincronizado não apenas para atender às regulamentações ambientais, mas também para oferecer uma vantagem competitiva em desempenho e sustentabilidade para a indústria automotiva.



INTRODUÇÃO

A definição do sistema de pós-tratamento veicular não é mais guiada apenas por legislações de emissões cada vez mais rigorosas e pelos requisitos dos sistemas de diagnóstico a bordo (OBD). O custo de propriedade adequado ao longo da vida útil do produto tornou-se uma grande vantagem competitiva, que só pode ser alcançada por meio da integração otimizada do sistema de pós-tratamento com a definição do trem de força nas fases iniciais do desenvolvimento.

Em um mercado sensível a custos como o Brasil, essa integração é ainda mais decisiva, especialmente para montadoras dos segmentos A e B, que representam os veículos mais vendidos e geralmente são equipados com motores flex de 1.0L com injeção indireta (PFI – Port Fuel Injection). Porém, nos últimos anos, observou-se a introdução de motores flex 1.0L TGDI (Turbocharged Gasoline Direct Injection) nesses segmentos.

A previsão apresentada por [2] indica que os motores TGDI aumentarão sua participação no mercado brasileiro, ultrapassando os motores PFI em 2028, conforme mostrado na Figura 1. Essa elevada participação será impulsionada principalmente pelos veículos dos segmentos A e B, que provavelmente serão equipados com motores flex 1.0L TGDI.

Essa tecnologia TGDI de baixa cilindrada continuará aumentando sua participação devido às metas futuras de emissões cada vez mais rigorosas e ao programa brasileiro ROTA 2030, baseado em eficiência energética, segurança e P&D (Pesquisa e Desenvolvimento). No Brasil, a maior parte dos motores é flex, uma tecnologia que permite ao motor operar com gasolina, etanol ou qualquer mistura entre ambos.

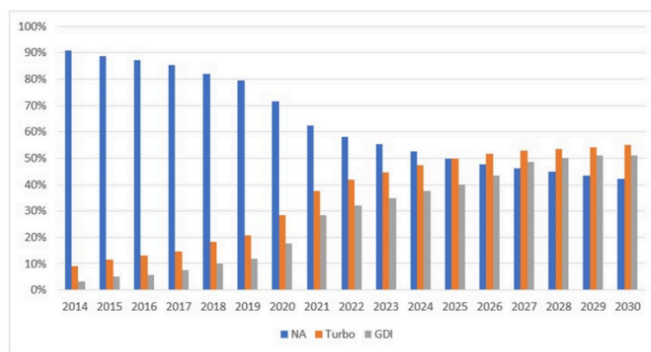


Figura 1. Previsão de aumento da participação de mercado de motores TGDI no mercado brasileiro [4].

A fase atual de controle de emissões de poluentes para veículos leves no Brasil, denominada PROCONVE L8, ou PL8, está em implementação desde janeiro de 2025 como primeira etapa, com metas mais rigorosas previstas para 2027 e além. Essas próximas fases exigirão tecnologias de redução de emissões compatíveis com o contexto do mercado brasileiro de baixo custo. Este artigo apresenta uma visão geral dessas tecnologias, divididas em três categorias diferentes:

- Recursos de otimização da combustão
- Recursos de pós-tratamento
- Recursos de eletrificação

Além disso, conforme ilustrado na Figura 2, essas tecnologias podem ser classificadas com base em seu nível de maturidade de desenvolvimento, variando desde tecnologias amplamente difundidas e já bem estabelecidas, até tecnologias avançadas, que ainda requerem maior refinamento e desenvolvimento para viabilizar sua aplicação.

A seguir, será apresentada uma breve visão geral das regulamentações de emissões no Brasil. Posteriormente, serão detalhadas as tecnologias de cada categoria que permitirão o cumprimento das metas de emissões.



COMBUSTÃO

PÓS TRATAMENTO

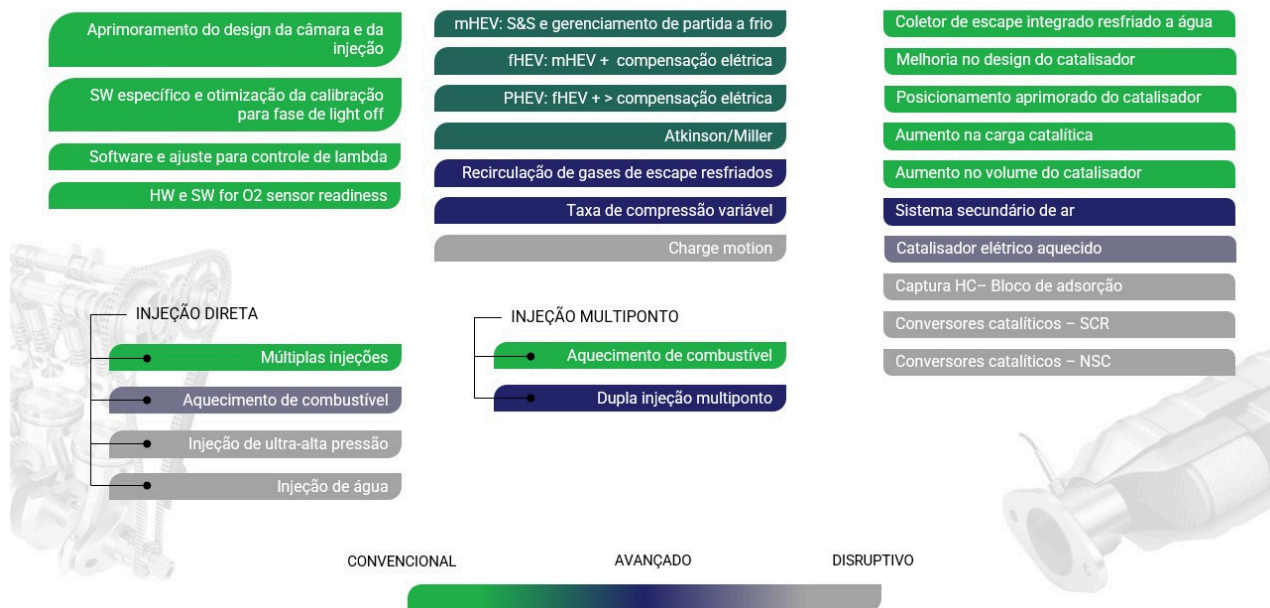


Figura 2: AEA – Tendências Tecnológicas para Baixas Emissões [Autor]

LEGISLAÇÃO DE EMISSÕES NO BRASIL

Historicamente, o controle de emissões de poluentes para veículos leves no Brasil sempre foi baseado na legislação aplicada nos Estados Unidos. Essa legislação apresenta diversas adaptações, tanto em termos de prazos de implementação quanto de procedimentos e limites, principalmente devido a especificidades locais, como o maior teor de etanol na gasolina [4].

A regulamentação atual, PL8, estabelece limites de emissões mais rigorosos, especialmente para NMOG (Gases Orgânicos Não Metano), que incluem, além de NMHC, os gases orgânicos etanol e aldeídos. O cálculo específico de NMOG para o PL8 considera coeficientes de ajuste de reatividade fotoquímica para contabilizar o diferente potencial de formação de ozônio entre gasolina e etanol. CO (Monóxido de Carbono) e HCHO (formaldeído/aldeídos) também são reduzidos no PL8, e MP (Material Particulado) passa a ser regulamentado exclusivamente para motores GDI (Gasoline Direct Injection).

Além dos limites de emissão mais rigorosos, o PL8 introduz também o conceito de um limite único de emissões em nível corporativo

independentemente da categoria do veículo. Isso permite que as montadoras adotem estratégias de conformidade considerando todo o portfólio. A norma também estabelece a geração e o uso de créditos de emissões.

O RDE (Real Driving Emissions), atualmente em fase de monitoramento, fará parte da legislação PL8 com diferentes CF (Fatores de Conformidade) para cada etapa:

- CF = 2 para PL8 Etapa 1, efetivo em janeiro de 2025.
- CF = 1.5 para PL8 Etapa 2, efetivo em 2027.

Nos testes RDE, serão medidos somente CO, NOx, THC (Hidrocarbonetos Totais) e CO₂ (Dióxido de Carbono).

A Figura 3 resume os limites de emissões de escapamento e evaporativas para veículos de passageiros nas legislações brasileira (PL6, PL7, PL8), americana (Tier 3) e europeia (Euro 6). É importante observar que, mesmo com níveis semelhantes de NMOG + NOx entre PL7 e US Tier 3 Bin 125 (no caso do PL8, Bin está relacionado ao nível de emissão; aqui, 125 refere-se a NMOG +

NOx = 125 mg/mi), esses padrões não são diretamente comparáveis em relação às soluções tecnológicas devido aos diferentes combustíveis utilizados.

	Legislation	Level	Date	Cycle	Exhaust					Evaporative			
					NMOG+NOx (mg/km)*	PM (mg/km)	CO (mg/km)	HCHO (mg/km)	RDE	DHHS** (number of tests / h per test)	DHHS** (g/test)	DHHS** (g/total)	Refueling Onboard (mg/l)
Brazil	PL6	-	2014-2022	FTP-75	130	-	1300	20	No	1/2	1,5	1,5	-
	PL7	-	2022-2025	FTP-75	80	6	1000	15	Monitor	2/24	0,5	1	50
	PL8	80	2025	FTP-75	80	6	1000	15	Yes	2/24	0,5	1	50
	PL8	70	2025	FTP-75	70	4	600	10	Yes	2/24	0,5	1	50
	PL8	60	2025	FTP-75	60	4	600	10	Yes	2/24	0,5	1	50
	PL8	50	2025	FTP-75	50	4	600	10	Yes	2/24	0,5	1	50
	PL8	40	2025	FTP-75	40	4	500	10	Yes	2/24	0,5	1	50
	PL8	30	2025	FTP-75	30	3	500	8	Yes	2/24	0,5	1	50
	PL8	20	2025	FTP-75	20	2	400	8	Yes	2/24	0,5	1	50
	PL8	0	2025	FTP-75	0	0	0	0	Yes	2/24	0,5	1	50
US	Tier 3 Bin 160	2017-2025	FTP-75	99,4	1,9	2609,8	2,5	No	3/24	0,3	0,9	53	
	Tier 3 Bin 125	2017-2025	FTP-75	77,7	1,9	1304,9	2,5	No	3/24	0,3	0,9	53	
	Tier 3 Bin 70	2017-2025	FTP-75	43,5	1,9	1056,3	2,5	No	3/24	0,3	0,9	53	
	Tier 3 Bin 50	2017-2025	FTP-75	31,1	1,9	1056,3	2,5	No	3/24	0,3	0,9	53	
	Tier 3 Bin 30	2017-2025	FTP-75	18,6	1,9	621,4	2,5	No	3/24	0,3	0,9	53	
	Tier 3 Bin 20	2017-2025	FTP-75	12,4	1,9	621,4	2,5	No	3/24	0,3	0,9	53	
	Tier 3 Bin 0	2017-2025	FTP-75	0	0	0	0	No	3/24	0,3	0,9	53	
EU	Euro 6	-	2014-2025	WLTC	138	4,5	1000	-	Yes	1/48	2	2	-

* For PL6 and Euro 6 NMOG + NOx is estimated from NMHC and NOx individual limits

Obs: NMHC = NMOG for comparison purpose

** Diurnal + Hot Soak (DHHS) test has specificities between Brazil, US and EU standards.

Obs: limits are presented in this format for comparison purpose only.

Figura 3. Limites de emissões de escapamento e evaporativas para veículos leves: legislações brasileira, americana e europeia.

Enquanto a norma brasileira utiliza como combustíveis de referência E22, E61 e E100, a norma americana utiliza E10. O número refere-se ao percentual em volume de etanol misturado à gasolina. NMOG + NOx é o limite mais crítico a ser cumprido para o PL8. Isso ocorre principalmente devido ao etanol, que possui o grupo funcional hidroxila (-OH), além de uma pressão de vapor baixa, o que dificulta sua combustão em condições de frio.

A Figura 4 mostra a evolução dos limites

corporativos ao longo do tempo para US Tier 3 e PL8, que estabelecem uma redução gradual a cada 2 anos, com valores a serem revisados conforme as tecnologias globais e as experiências internacionais vigentes no momento.

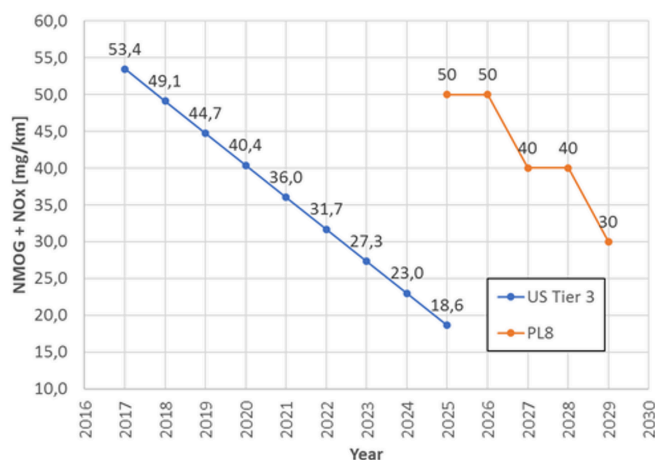


Figura 4. Nível corporativo de emissões, considerando NMOG + NOx, para US Tier 3 e PL8.

Atualmente, os motores FlexFuel atendem em média ao BIN 50 para se enquadrarem no limite de emissões corporativas da frota para o PL8 Etapa 1. Como o limite corporativo será reduzido para BIN 40 no PL8 Etapa 2, em 2027, otimizações serão necessárias para atender a essa nova meta. Além disso, esforços adicionais serão necessários para atingir o menor nível de emissões possível no futuro, visando um nível de impacto zero, no qual as emissões veiculares se aproximariam da qualidade do ar ambiente local.

ESTRATÉGIAS DE OTIMIZAÇÃO DA COMBUSTÃO

Atualmente, existem tecnologias voltadas para otimizar as emissões em motores de combustão, enquanto outras ainda exigem maior desenvolvimento para implementação completa.

O etanol possui características que tornam sua operação em frio mais desafiadora quando comparado à gasolina. As principais estão relacionadas à sua composição — uma molécula simples, com ponto de evaporação bem definido — e à sua baixa pressão de vapor, especialmente durante a fase fria.

A baixa pressão de vapor do etanol pode ser aumentada aquecendo-se o combustível, resultando em uma mistura ar-combustível mais favorável, com maior probabilidade de combustão robusta. Os sistemas de aquecimento de combustível de 1ª geração, atualmente no mercado, têm como objetivo principal viabilizar a partida a frio com etanol e melhorar a dirigibilidade nessas temperaturas, tipicamente abaixo de 20°C, que são não relevantes para emissões na legislação brasileira.

Os sistemas de 2ª geração ampliarão sua atuação para temperaturas relevantes para emissões, acima de 20°C, durante a partida e a fase de aquecimento do motor, resultando assim em menores emissões de HC e CO, alinhados aos limites do PL8. Os sistemas mais comuns possuem elementos de aquecimento no rail de combustível ou diretamente no bico injetor.

DESENHO DA CÂMARA E MELHORIA DE INJEÇÃO

O aprimoramento do desenho da câmara e do sistema de injeção tem como objetivo otimizar a carga de ar no cilindro e a vaporização do combustível, utilizando tumble e swirl para preencher os cilindros com a melhor mistura possível de ar e combustível. O direcionamento adequado do spray do injetor é um fator fundamental para garantir boa vaporização, minimizando o tamanho das gotas e reduzindo o contato do combustível com superfícies metálicas para evitar perdas.

Para injetores PFI, o objetivo é posicioná-los o mais próximo possível da válvula de admissão, direcionando o spray para evitar contato com o duto de admissão. Enquanto isso, os injetores TGDl devem possuir spray centralizado, direcionando o combustível para o meio do cilindro e evitando o contato com as paredes do cilindro e com o topo do pistão.

SOFTWARE E CALIBRAÇÃO P/ CONTROLE LAMBDA

Este recurso busca reduzir emissões durante a partida e as fases frias por meio de estratégias específicas de software e calibrações que conduzam rapidamente o motor a atingir lambda (relação ar-combustível) igual a 1. Atingir esse equilíbrio o mais rápido possível após a partida ajuda a minimizar o período de enriquecimento da mistura, quando as emissões são tipicamente maiores.

SOFTWARE ESPECÍFICO E CALIBRAÇÃO OTIMIZANDO A FASE LIGHT-OFF

Esta abordagem concentra-se em otimizar o

tempo e a duração da injeção para melhorar a vaporização do combustível e a eficiência da combustão, especialmente quando se utiliza etanol puro. Alcançar a estratégia ideal de injeção — injetando etanol durante o tempo de válvula aberta em motores PFI e empregando múltiplas injeções em motores TGDl — é fundamental para limitar as emissões de NMOG durante a partida e as fases frias.

HARDWARE E SOFTWARE PARA SENSOR O₂ READINESS

A otimização de hardware e software para a prontidão da sonda lambda (O₂) tem como objetivo minimizar a fase de malha aberta (open loop) após a partida, alcançando lambda igual a 1 por meio de operação em malha fechada (closed loop) o mais rapidamente possível. Isso envolve projetar sensores O₂ capazes de aquecer muito rapidamente — idealmente com proteção contra gotas d'água — e ajustar o software para acelerar sua prontidão.

O estado atual do mercado de motores FlexFuel é de cerca de 8 segundos, e estudos em andamento sugerem que pré-aquecer os sensores O₂ antes da partida pode reduzir ainda mais esse tempo.

RECIRCULAÇÃO DE GASES DE ESCAPE ARREFECIDA

A recirculação de gases de escape arrefecida (EGR arrefecido) é uma tecnologia avançada projetada principalmente para reduzir emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) ao diminuir a temperatura máxima de combustão dentro dos cilindros do motor. Em aplicações FlexFuel, esse sistema deve ser visto como um recurso avançado que funciona melhor quando integrado a tecnologias complementares.

Ao combinar EGR arrefecido com estratégias de injeção otimizadas, calibração precisa e outras técnicas de controle de emissões, motores FlexFuel podem alcançar maior estabilidade de combustão, melhor eficiência e reduções significativas nas emissões de poluentes.

TAXA DE COMPRESSÃO VARIÁVEL

A tecnologia de taxa de compressão variável (VCR) permite que motores FlexFuel ajustem a taxa de compressão da câmara de combustão. Essa adaptabilidade otimiza a eficiência e o desempenho do motor ao ajustar a pressão de compressão às características de combustão do combustível, seja gasolina, etanol ou suas misturas.

Ajustando finamente a taxa de compressão, motores FlexFuel podem melhorar a eficiência térmica e reduzir emissões, tornando-se mais responsivos às diferentes condições de condução. Apesar dos desafios relacionados à complexidade mecânica e ao custo, a VCR representa um avanço promissor para melhorar o desempenho e as emissões em aplicações flex.

CHARGE MOTION

O charge motion é essencial para alcançar combustão eficiente e uniforme em motores flex, criando movimentos de swirl e tumble que melhoram a mistura de ar e combustível. Essa turbulência aprimorada ajuda a garantir combustão consistente independentemente da mistura de combustível (gasolina, etanol ou suas combinações), resultando em propagação de chama mais rápida, melhor eficiência térmica e redução de emissões.

Componentes do motor, como a geometria de admissão, o comando de válvulas e o desenho da câmara de combustão, são tipicamente otimizados para ajustar esse movimento de carga, compensando de forma eficaz a variabilidade das propriedades do combustível e garantindo desempenho confiável em diferentes condições de operação.

AQUECIMENTO DE COMBUSTÍVEL

O aquecimento de combustível já é uma técnica amplamente utilizada em motores PFI FlexFuel e mostra potencial para expansão em motores TGDI FlexFuel. Ele contribui para melhor vaporização do

combustível durante partidas a frio, reduzindo emissões de NMOG ao utilizar etanol puro (E100).

DUPLA INJEÇÃO MULTIPONTO

O sistema de injetores duplos em motores MPI tem se mostrado eficaz em mercados como Europa e Estados Unidos. Embora sua aplicação em motores FlexFuel seja viável, é considerado uma tecnologia avançada, o que torna sua adoção ampla improvável no curto prazo.

MULTIPLAS INJEÇÕES

Já aplicada em motores TGDI (com até três injeções), essa abordagem pode receber melhorias adicionais com mais divisões de injeção. Em alguns casos, motores PFI também podem se beneficiar de injeções segmentadas durante a fase fria para melhorar desempenho e emissões.

INJEÇÃO DE ULTRA ALTA PRESSÃO

A injeção de altíssima pressão é considerada uma tecnologia disruptiva. Atualmente, a injeção de alta pressão é limitada a 200 bar ao usar etanol puro devido a limitações de durabilidade. No entanto, desenvolvimentos em andamento visam elevar essa pressão para 350 bar, aprimorando ainda mais a vaporização de combustível durante a partida e fases frias.

INJEÇÃO DE ÁGUA

Outra tecnologia disruptiva com potencial de aplicação futura em motores FlexFuel. Já utilizada em outros mercados para aplicações com gasolina, essa abordagem é eficaz na redução de emissões de NOx em condições de operação de alta temperatura.

Em conclusão, esses recursos são considerados capazes de melhorar a vaporização do combustível, a propagação da chama de combustão e/ou o controle de lambda. A eficiência de cada recurso depende das características básicas do motor.

ESTRATÉGIAS DE PÓS-TRATAMENTO

Para motores de ciclo Otto, o TWC (Three-Way Catalyst – Catalisador de Três Vias) é o sistema de pós-tratamento padrão para controle de emissões. Ele recebe esse nome devido à sua capacidade de controlar THC, CO e NOx. Os principais parâmetros e componentes são descritos para melhor compreensão do processo de seleção de um TWC. A posição do catalisador no escapamento é muito importante para o controle de emissões. Limites mais rigorosos de THC e CO exigem o catalisador CC (Close-Coupled), que é integrado ao coletor de escape para permitir que atinja mais rapidamente a temperatura de operação necessária para máxima conversão. Catalisadores UF (Under-Floor) são utilizados como complemento para redução adicional de emissões.

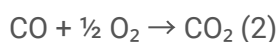
O próprio TWC é composto pelo substrato, um cilindro com estrutura colmeia definido por seu material, volume, CPSI (Cells Per Square Inch), e espessura entre as células. Esse substrato é impregnado com metais nobres PGM (Platinum Group Metals), geralmente paládio (Pd) e ródio (Rh), que serão responsáveis pelas conversões catalíticas. Em seguida, um encapsulamento metálico é fixado ao substrato por meio de um manto que possui diversas funções, como vedação, isolamento térmico, fixação e proteção mecânica contra impactos. Um escudo térmico fornece isolamento térmico adicional para manter o catalisador na temperatura adequada de operação.

A desvantagem fundamental do TWC convencional é que ele depende do calor do escapamento produzido pelos subprodutos da combustão para atingir a temperatura operacional. Enquanto isso, ele só consegue reduzir parcialmente as emissões na fase fria, que geralmente é responsável por mais de 80% das emissões totais do ciclo. Como contramedida, algumas tecnologias foram desenvolvidas para aquecer o catalisador mais rapidamente, como SAI (Secondary Air Injection), que injeta ar no escapamento para promover pós-combustão,

exigindo combustível extra, e EHC (Electrically Heated Catalyst), que utiliza potência elétrica para aquecimento.

O catalisador de três vias é amplamente utilizado para controlar emissões de escapamento de motores a gasolina. Ele é chamado catalisador devido às suas propriedades, que aumentam a velocidade de uma reação química, participam dela, mas não são consumidas como reagente ou produto. E é chamado de três vias por ser capaz de converter 3 poluentes que são regulados, direta ou indiretamente, por legislações de emissões: HC, CO e NOx.

Os agentes catalíticos são metais preciosos que fazem parte do grupo PGM, composto por rutênio (Ru), ródio (Rh), paládio (Pd), ósmio (Os), irídio (Ir) e platina (Pt). Aplicações automotivas, no entanto, utilizam principalmente Pt, Pd e Rh devido à sua notável resistência à corrosão e oxidação em altas temperaturas. Atualmente, a maioria das aplicações automotivas reduziu ou eliminou o uso de Pt, substituindo-o por Pd para a oxidação de HC e CO. A redução de NOx, por sua vez, é realizada pelo Rh. As reações químicas globais são mostradas nas Equações 1, 2 e 3:



Isso significa que HC, CO e NOx são controlados através do catalisador de três vias, que, em sua eficiência máxima, consome os poluentes mencionados (reagentes da reação química) para produzir CO₂, H₂O (água) e N₂ (nitrogênio), conforme ilustrado na Figura 5. O substrato geralmente possui formato colmeia e é definido pelo CPSI e pela espessura das paredes das células adjacentes. O PGM é impregnado em cada célula para maximizar a área útil para reações catalíticas.

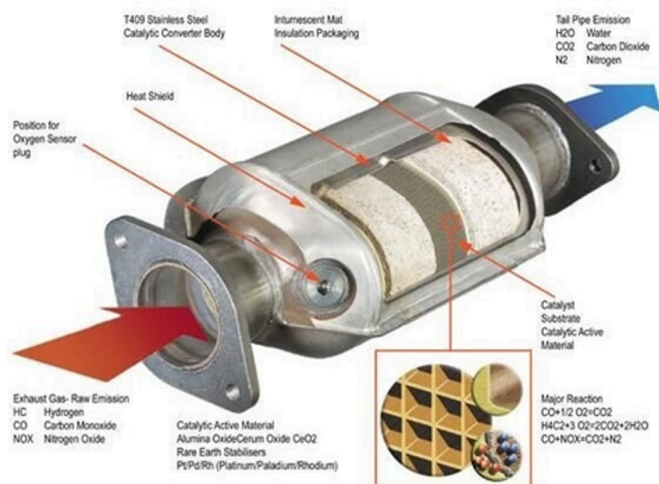


Figura 5. Princípios de funcionamento e principais componentes do catalisador de três vias.

Para que a conversão catalítica seja maximizada, é necessário que o catalisador opere em temperatura adequada e que a mistura ar-combustível seja controlada em uma faixa estreita ao redor da razão estequiométrica. A Figura 6 mostra o impacto do envelhecimento do catalisador na temperatura de light-off, na qual o catalisador apresenta 50% de eficiência de conversão, neste caso para CO. O envelhecimento do catalisador pode ocorrer por diferentes fenômenos, como, por exemplo, impacto mecânico que descole o manto entre o substrato e o encapsulamento, ou a aglutinação dos metais PGM por estresse térmico, reduzindo assim a área útil. Catalisadores envelhecidos exigem mais tempo e temperaturas mais altas para atingir a temperatura de light-off.

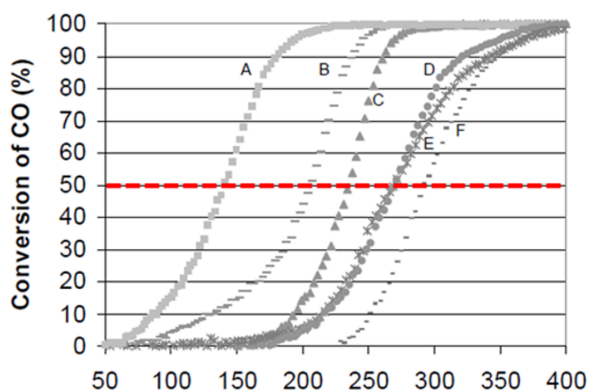


Figura 6. Comparação das curvas de light-off de CO após os envelhecimentos redutivos e oxidativos: A) H_2 (Hidrogênio)/800 °C/3 h-envelhecido; B) ar/800 °C/3 h-envelhecido; C) H_2 /1000 °C/3 h-envelhecido; D) H_2 /1200 °C/3 h-envelhecido; E) ar/1000 °C/3 h-envelhecido; e F) ar/1200 °C/3 h-envelhecido; condições de reação pobre; adaptado de [5].

Figura 7 mostra a eficiência de conversão de HC, CO e NOx em função da razão ar-combustível, bem como a faixa de operação para eficiência ótima de conversão dos 3 gases. Essa faixa é tipicamente entre $\lambda = 1 \pm 2\%$.

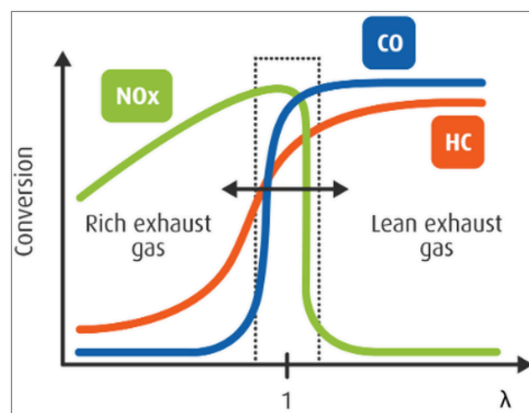


Figura 7. Curvas características de conversão de HC, CO e NOx em função de λ [6].

A seguir estão disponíveis estratégias-chave para otimizar a eficiência do pós-tratamento, principalmente acelerando o light-off do catalisador.

MELHORIA NO DESIGN DO CATALISADOR

Consiste em otimizar o design do catalisador para aquecimento rápido (porosidade, número de células/ft³, formato etc.). O objetivo é alcançar transferência rápida de calor para o substrato cerâmico.

MELHORIA NA POSIÇÃO DO CATALISADOR

Visa melhorar o desempenho do catalisador otimizando seu posicionamento para aquecimento rápido. Posicionar o catalisador o mais próximo possível das válvulas de escape – idealmente integrado ao coletor – pode melhorar significativamente a eficiência térmica.

AUMENTO DA CARGA CATALÍTICA

Ao aumentar a carga catalítica, o sistema pode alcançar maior eficiência após o light-off. No entanto, essa abordagem pode exigir medidas adicionais para reduzir emissões de NMOG durante a fase fria, especialmente com etanol puro.

AUMENTO NO VOLUME DO CATALISADOR

A expansão do volume do catalisador aumenta sua capacidade de armazenamento de oxigênio, melhorando assim a eficiência pós light-off. Assim como no aumento de carga, essa estratégia deve ser acompanhada de medidas para mitigar emissões de NMOG na fase fria, particularmente com etanol puro.

SISTEMA SECUNDÁRIO DE AR

Já comprovadamente eficaz em mercados como Europa e EUA para aplicações a gasolina, o sistema de ar secundário pode ser adaptado para veículos FlexFuel. Ele reduz emissões de NMOG durante a fase fria – especialmente com etanol puro – onde combustões tardias são utilizadas para aquecer o catalisador.

Esse recurso é considerado avançado para veículos FlexFuel e deve ser aplicado em algumas aplicações, provavelmente combinado com outros recursos.

CATALISADOR ELETRICAMENTE AQUECIDO

Este método utiliza resistência elétrica para aquecer o catalisador, reduzindo o tempo de light-off. Sua eficiência em outros mercados sugere boa adequação para lidar com emissões de NMOG na fase fria com etanol puro. Sua eficiência depende da energia elétrica disponível e do fluxo de ar no escapamento durante a partida e condições frias. Combiná-lo com estratégias adicionais, como ar secundário para aumentar o fluxo antes da partida, pode melhorar o desempenho geral.

CAPTURA HC - BLOCO DE ADSORÇÃO

Projetado para tratar emissões de HC através de um conversor dedicado, este recurso é considerado disruptivo para veículos FlexFuel.

CONVERSORES CATALÍTICOS: SCR E NSC

Essas tecnologias disruptivas são consideradas altamente relevantes, porém ainda disruptivas para veículos FlexFuel.

ESTRATÉGIAS DE ELETRIFICAÇÃO

A eletrificação está sendo cada vez mais integrada aos veículos FlexFuel para melhorar a eficiência energética e otimizar as emissões. Cada arquitetura de eletrificação oferece vantagens únicas.

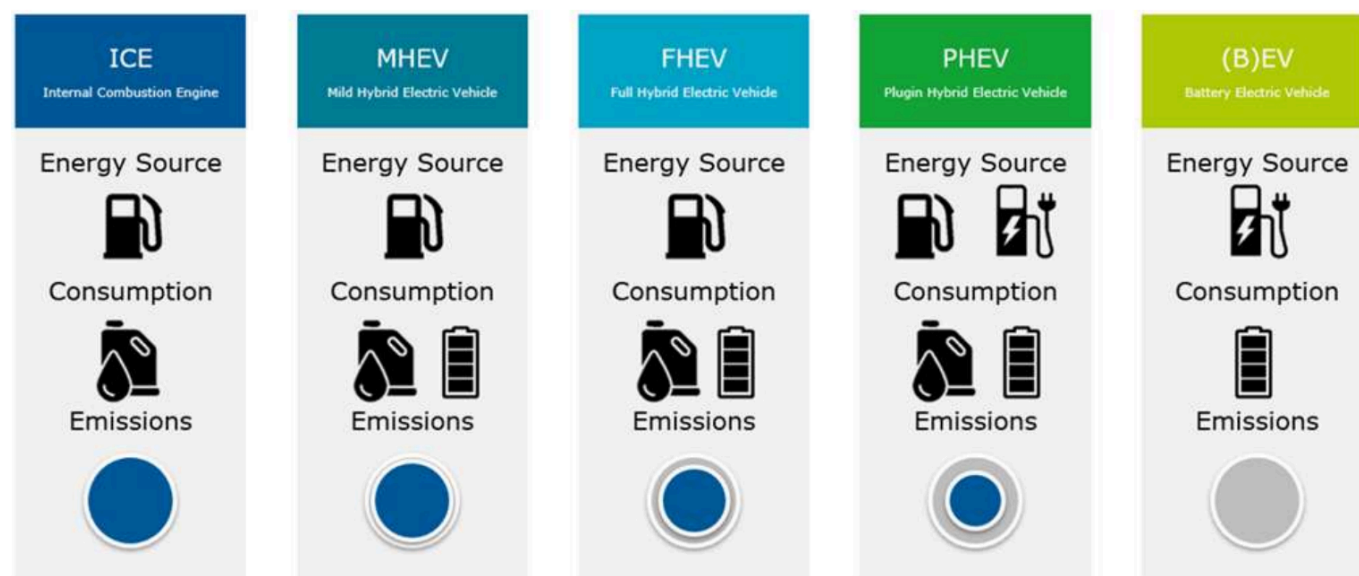


Figura 8. Comparação das arquiteturas de eletrificação.

MHEV: BSG, STOP & START E GERENCIAMENTO DE PARTIDA A FRIO

A arquitetura Mild Hybrid Electric Vehicle (mHEV) é atualmente a solução de eletrificação mais presente no mercado FlexFuel. Ao substituir o motor de combustão durante a partida e as fases de motor frio por dispositivos elétricos, os mHEVs reduzem efetivamente as emissões.

Adicionalmente, combinar este sistema com um catalisador aquecido eletricamente (EHC) pode garantir um light-off mais rápido do catalisador antes do acionamento do motor de combustão, reduzindo ainda mais as emissões.

FHEV: MHEV + COMPENSAÇÃO ELÉTRICA

A arquitetura Full Hybrid está ganhando participação no mercado de veículos FlexFuel e pode ser utilizada para reduzir emissões durante a partida e a fase fria usando dispositivos elétricos em vez do motor de combustão. Devido à maior potência elétrica disponível, essa alavanca é considerada mais eficiente para reduzir emissões quando comparada às alavancas do mild hybrid.

Nos fHEVs, dispositivos elétricos substituem o motor de combustão durante a partida e a fase fria, proporcionando uma redução superior de emissões. Certas configurações, como a arquitetura híbrida em série (Serial Hybrid), podem ampliar ainda mais esses benefícios. Por exemplo, ao usar etanol puro, o motor elétrico pode auxiliar a partida — eliminando emissões durante a fase de cranking — e, quando combinado com um EHC, pode garantir um light-off rápido do catalisador.

PHEV: FHEV + MAIOR COMPENSAÇÃO ELÉTRICA

Os veículos híbridos plug-in (PHEVs) evoluem a partir da tecnologia fHEV ao oferecer ainda mais potência elétrica por meio do carregamento externo. Essa maior capacidade permite uma compensação elétrica superior em comparação com híbridos completos convencionais, levando a reduções adicionais de emissões. Por isso, é a melhor arquitetura de eletrificação para alcançar o nível de emissões de Impacto Zero.



CONCLUSÃO

A roadmap para a redução de emissões em veículos FlexFuel utiliza uma ampla variedade de estratégias — desde avanços nos métodos de combustão e sistemas de pós-tratamento de última geração até arquiteturas eletrificadas.

As alavancas podem ser separadas em 3 diferentes pacotes:

- Pacote de tecnologias padrão para BIN30
- Pacote de tecnologias avançadas para BIN20
- Pacote de tecnologias disruptivas para Emissão de Impacto Zero

Para atender efetivamente às metas de emissões, um programa de desenvolvimento dedicado e bem coordenado deve ser implementado para cada alavanca tecnológica. Além disso, a integração dessas diferentes estratégias será essencial para alcançar soluções custo-eficientes que reduzam as emissões a níveis quase desprezíveis. Ao combinar essas inovações de forma inteligente, existe um potencial promissor para atingir um status de emissões quase zero.

Essa convergência de tecnologias não apenas representa um avanço significativo para a sustentabilidade ambiental no setor automotivo, como também estabelece um novo patamar para futuras inovações no controle de emissões.



REFERÊNCIAS

- [1] Review of thermal management of catalytic converters to decrease engine. Applied Thermal Engineering 2019
- [2] Automotive World (2020). Research: Brazil's new vehicle market: prospects to 2024 and beyond.
- [3] Automotive Business. (17th of August of 2020). O caminho do downsizing no Brasil.
- [4] IHS Markit (2019). IHS Markit VPac – Vehicle Performance and Compliance – September 2019.
- [5] CETESB. (2018). Análise da proposta de Resolução CONAMA para as novas fases de controle de veículos leves do Proconve (L7 e L8) aprovada em reunião Plenária do CONAMA em 28 de novembro de 2018. São Paulo: CETESB.
- [6] MMA/CONAMA. (20 de 12 de 2018). Resolução N° 492, de 20 de Dezembro de 2018. Diário Oficial da União, p. 141.
- [7] Umicore. (23 de 04 de 2020). Three-way catalyst (TWC). Fonte: Umicore Web Site.
- [8] EMITEC (2011). Heated catalysts, the solution to future emission problems. 64th IAA September 2011.