

# A Competividade da Tecnologia Flex-Fuel para Redução de Emissões de CO<sub>2</sub>

Maurilio Cassiani

AVL South America, Powertrain Engineering

Raphael Montemor

Guilherme Neves

AVL South America, Powertrain Engineering

## ABSTRACT

This paper presents an overall study regarding available automotive technologies aiming CO<sub>2</sub> reduction. Taking as reference a *flex-fuel* engine with average technology package representative to Brazilian market, several add-on internal combustion engine technology packages were evaluated regarding its capability in increasing fuel economy efficiency. In addition, the potential CO<sub>2</sub> reduction over incremental technology package cost (USD/gCO<sub>2</sub>) analysis was extended to further vehicle powertrain technology, including hybrids and pure electrical configurations.

## RESUMO

Este trabalho contempla um estudo abrangente acerca das diversas tecnologias disponíveis para redução de CO<sub>2</sub>. Tomando como base um motor *flex-fuel* com um pacote tecnológico representativo do mercado brasileiro, sucessivos pacotes tecnológicos são avaliados quanto à sua capacidade de redução de CO<sub>2</sub> em relação ao custo adicional que representa ao veículo. Tais acréscimos ao motor *flex-fuel* são, então, comparados às demais soluções disponíveis em outros mercados quanto ao seu custo estimado por potencial redução de CO<sub>2</sub> - USD/gCO<sub>2</sub>. Esta análise considera desde conjuntos tradicionais a combustão, com gradual inserção da eletrificação, até conjuntos puramente elétricos.

## INTRODUÇÃO

Em meio as incertezas econômicas associadas a pandemia COVID-19 e seus reflexos na atual transformação da indústria automotiva global, faz-se necessário analisar as particularidades do setor automotivo Brasileiro. A evolução de políticas públicas que objetivam a redução de emissões veiculares de GEE (gases de efeito estufa, tendo como principal fonte o CO<sub>2</sub> (9)) é um fator determinante na definição de estratégias e rotas tecnológicas para o desenvolvimento do portfólio das montadoras.

Inicialmente estabelecido em 1975 pelo Congresso Norte-Americano, a Média Corporativa de Economia de Combustível (ou *CAFE – Corporate Average Fuel Economy*) consistia em reduzir a necessidade de importação

de combustíveis fósseis por meio da limitação do consumo de combustível médio de novos veículos. Tal iniciativa promoveu a redução média de consumo em 80% entre 1978 e 2011 (1).

Em 2010, uma segunda legislação apresentada pela Agência de Proteção Ambiental (*EPA – Environment Protection Agency*) definiu um novo programa para redução de emissões de CO<sub>2</sub> e aumento da eficiência energética (2). Os níveis foram baseados em curvas em função da capacidade de carga e massa do veículo, Tabela 1 (2).

Tabela 1: níveis de emissão de GEE definidos pela EPA para os anos de 2017 a 2025.

Níveis de emissão de CO <sub>2</sub> média de frota e consumo de combustível		Ano-modelo									
Categoria de veículo		2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	
Veículos leves	CO <sub>2</sub> [g/mi]	212	202	191	182	172	164	157	150	143	
	Consumo [mpg]	41.9	44.0	46.5	48.8	51.7	54.2	56.6	59.3	62.2	
Veículos com. leves	CO <sub>2</sub> [g/mi]	295	285	277	269	249	237	225	214	203	
	Consumo [mpg]	30.1	31.2	32.1	33.0	35.7	37.5	39.5	41.5	43.8	
Combinado	CO <sub>2</sub> [g/mi]	243	232	222	213	199	190	180	171	163	
	Consumo [mpg]	36.6	38.3	40.0	41.7	44.7	46.8	49.4	52.0	54.5	

Fonte: Environmental Protection Agency. 2010. (2)

Na União Europeia, a regulamentação (EC) No. 443/2009 definiu os valores limites de emissões específicas de CO<sub>2</sub>. A média de emissões de frota objetivou uma redução de 130 g/km em 2015 para 95 g/km em 2021 (3). Esta regulamentação foi atualizada (*Regulation (EU) 2019/631*) e novos limites (relativos as emissões de 2021) entram em vigor em 2025 e objetivam uma redução de:

- 15% em 2025 e 37.5% em 2030 para veículos leves
- 15% em 2025 e 31% em 2030 para veículos comerciais leves

No cenário local, o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV) foi o primeiro passo para o aumento da eficiência energética veicular. Apesar de divulgar os resultados referentes a emissões e consumo, não estipula os limites de emissão de GEE (5). Como, historicamente, as legislações Brasileiras para veículos leves sucedem as normas Norte-Americanas e Europeias é necessário avaliar as soluções tecnológicas existentes frente as particularidades locais que possam ser utilizadas pela

indústria automotiva para atender as futuras legislações de controle de emissão de GEE – o desenvolvimento tecnológico veicular é sempre vinculado às legislações vigentes, futuras e características do consumidor local.

Tradicionalmente, o mercado consumidor Brasileiro se caracteriza pela sua sensibilidade ao custo. Assim, qualquer solução tecnológica relacionada ao aumento da eficiência energética dos atuais veículos deve ter como parâmetro de decisão a razão “custo/redução de emissões” (ou USD/gCO<sub>2ne</sub>, não emitido). Este trabalho tem como objetivo apresentar tais soluções e discuti-las com relação a seus aspectos tecnológicos, benefícios e o custo associado no cenário local.

A viabilidade das soluções tecnológicas é definida como a razão entre custo e massa de GEE não emitido, sendo tal massa analisada em relação a: **1.** à emissão veicular (*tank-to-wheel*, *TtW*); **2.** ao ciclo de produção do combustível (*well-to-tank*, *WtT*); **3.** ao ciclo de vida (*cradle-to-grave*, *CtG*). A disponibilidade e abrangente utilização de biocombustíveis na matriz de transporte nacional requer a inclusão da análise de quantidade de GEE emitida no processo produtivo e logístico, visto que os biocombustíveis possibilitam a absorção de GEE durante o processo produtivo (cultivo).

A expansão da análise de emissões de poluentes e GEE ao ciclo de vida do produto e inclusão do ciclo de produção do combustível se torna essencial para avaliar o impacto de futuros combustíveis e configurações de powertrain. Uma nova e abrangente metodologia de avaliação tem sido discutida pela Comissão Europeia para inclusão desta análise expandida em futuras legislações de restrição de emissão de poluentes e eficiência energética (10).

## VEÍCULO DE REFERÊNCIA

Um veículo/motor representativo do mercado brasileiro foi selecionado para a análise da razão entre custo e massa de GEE não emitido de das soluções tecnológicas. Este veículo de referência atende a legislação vigente de controle de poluentes veiculares (“PROCONVE” L6, Tabela 2) e apresenta as seguintes características:

- Veículo de passeio leve, segmento B
- Motor a combustão interna flex-fuel 1600cm<sup>3</sup>, 4 cilindros, naturalmente aspirado e PFI
- Comando de admissão variável
- Emissão de CO<sub>2</sub> 110 g/km fóssil (TtW considerando ciclo FTP-75)
- Consumo energético combinado 1.80 MJ/km

Tabela 2: limites estabelecidos pela legislação “PROCONVE”.

Limites “PROCONVE” para veículos leves de passeio (g/km)						
Veículo	Legislação	NMHC	NOx	CO	HCHO	PM
Veículos leves de passeio	L5	0.1	0.12	2.0	0.020	0.050
	L6		0.08	1.3	0.020	0.025
	L7	0.08 (NMHC+NOx)		1.0	0.015	0.006

Fonte: Resolução nº492, de 20 de Dezembro de 2018. (11)

Como discutido anteriormente, quando se analisa a emissão de GEE para meios de transporte, deve-se expandir as considerações para a emissão desses gases ao longo do ciclo de vida do produto, mais especificamente, durante o processo produtivo de cada combustível (*WtT*).

Estima-se que o processo produtivo da gasolina produza 16.5 gCO<sub>2</sub>/MJ, sendo que 85% desta emissão acontece durante as etapas de extração do óleo cru e transformação em gasolina; enquanto o processo produtivo o etanol a partir da cana de açúcar produz 24.8 gCO<sub>2</sub>/MJ (7).

Admitindo que para um biocombustível (como o etanol) toda emissão veicular (*TtW*) de GEE é virtualmente nula já que este gás foi absorvido durante o cultivo e processo produtivo do combustível, a emissão de CO<sub>2</sub>, considerando o ciclo de produção do combustível e as emissões veiculares (*WtT*+*TtW* = *WtW*):

- Emissão *WtW* de CO<sub>2</sub> para a gasolina: 140 gCO<sub>2</sub>/km
- Emissão *WtW* de CO<sub>2</sub> para o etanol: 45 gCO<sub>2</sub>/km

## PACOTES TECNOLÓGICOS PARA O MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA

Diversas soluções tecnológicas existentes poderiam ser aplicadas ao veículo/motor de referência para reduzir suas emissões e promover um aumento de eficiência energética. Dentre essas soluções, algumas são interdependentes, ou seja, seu potencial aumento de eficiência é influenciado, também, pela implementação de uma segunda solução. Assim, faz sentido utilizarmos pacotes tecnológicos ao invés de soluções isoladas – tais pacotes englobam inovações interdependentes e possibilitam um ganho ampliado.

Um exemplo claro desta interdependência é a aplicação do ciclo Miller. Este ciclo objetiva aumentar a relação entre razão de expansão e compressão efetiva por meio de uma variação nos tempos de abertura e fechamento das válvulas de admissão; tal fenômeno possibilita uma redução das perdas por bombeamento e significativo aumento da eficiência energética. Entretanto, a redução da razão de compressão efetiva também implica em redução de eficiência volumétrica que pode ser compensada pela utilização de um turbocompressor.

Três pacotes tecnológicos são apresentados a seguir de acordo com sua complexidade de implementação e potencial de redução de emissões.

### • Pacote tecnológico #1 (inicial)

Este pacote engloba tecnologias que visam reduzir as perdas por bombeamento e priorizar a operação do motor em regiões de elevada eficiência global. O aumento de tal eficiência também pode ser obtido por meio da mitigação de eventos de combustão anormal, propiciados pelo aumento de gás residual no cilindro pela introdução do duplo comando de válvulas variável (*Dual-VVT*); redução de sobre enriquecimento, por meio do coletor de escape integrado ao cabeçote e; a redução das perdas térmicas por meio da separação dos sistemas de arrefecimento (*válvula pilotada*).

A estratégia de separação dos sistemas de arrefecimento objetiva restringir a circulação do líquido de arrefecimento apenas ao bloco em si durante a fase de aquecimento, reduzindo a duração desta fase, assim como as perdas térmicas associadas. Por outro lado, mantendo uma temperatura menor no cabeçote do motor, eventos de combustão anormal são minimizados, assim como a perda de eficiência associada às reações a tais eventos de combustão anormal.

#### • Pacote tecnológico #2 (moderado)

O segundo pacote tecnológico (moderado) visa a aplicação do ciclo Miller – este ciclo, como mencionado anteriormente, se baseia na maior duração fase de expansão comparada a compressão, resultando em maior eficiência indicada bruta. Como efeito secundário, o mecanismo empregado – modificação do ângulo de fechamento da válvula de admissão – reduz a eficiência volumétrica, o que demanda maior pressão no coletor de admissão e consequentemente reduz as perdas por bombeamento. O uso do ciclo Miller reduz também a tendência a detonação e possibilita o uso de razões de compressão/expansão mais agressivas diferente do que é normalmente aplicado. Para assistir à utilização do ciclo Miller, estratégias avançadas de sobre alimentação (conhecido por *Advanced boosting*), que consiste na utilização de turbocompressores com controle eletrônico de *wastegate* ou turbocompressores de geometria variável; e o aumento da energia cinética dentro do cilindro por meio de otimização dos pórtricos de admissão podem ser associadas e possibilitar um aumento mais acentuado da eficiência energética.

Dentre outros objetivos, este pacote tecnológico promove a redução das perdas térmicas e mitigação dos eventos de combustão anormal por meio da aplicação de EGR; a redução de sobre enriquecimento requerido durante a fase de aquecimento do catalisador por meio da aplicação de um catalisador com aquecimento elétrico (*e-CAT*).

#### • Pacote tecnológico #3 (agressivo)

Para o pacote tecnológico agressivo, é apresentado o ciclo Miller agressivo, similar ao proposto no pacote tecnológico moderado, porém, com maior relação de expansão. Além disso, este pacote promove significativa mitigação de eventos de combustão anormal e consequente perdas de eficiência associada a reação a estes eventos por meio da introdução de um sistema de injeção de alta pressão (*UHPI – Ultra High Pressure Injection*), o uso da vela de ignição com pré-câmara passiva (*PCSP – Pre Chamber Spark Plug*) e aumento da eficiência global do ciclo por meio de recuperador de calor rejeitado, no qual parte a energia antes descartada é utilizada em subsistemas do veículo (*Waste heat recovery*).

### ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS PACOTES TECNOLÓGICOS

Tendo como referência, o veículo flex-fuel descrito anteriormente e utilizando o banco de dados da AVL de

motores e veículos em produção e desenvolvimento, foi possível estimar o potencial ganho de eficiência energética e consequente, redução de emissão de CO<sub>2</sub> em decorrência da implementação dos pacotes tecnológicos descritos. A potencial emissão de CO<sub>2</sub> é apresentada na Tabela 3 abaixo, admitindo que a implementação acontece de maneira evolutiva e não isolada.

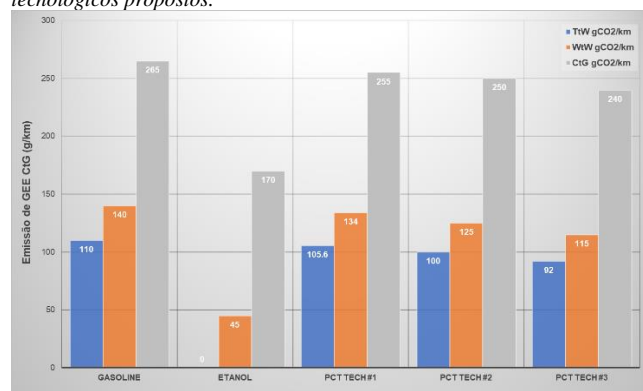
Tabela 3: Potencial emissão de CO<sub>2</sub> para os pacotes tecnológicos

Pacote tecnológico	Descrição	Emissão de CO <sub>2</sub>		
		TtW gCO <sub>2</sub> /km	WtW gCO <sub>2</sub> /km	CtG gCO <sub>2</sub> /km
Ref	Gasoline	110	140	265
	Ethanol	-	45	170
ICE	Pct tech #1 Dual-VVT Direct injection Boosting Integrated exhaust manifold Split cooling - controlled thermostat	105.6	134	255
	Pct tech #2 Miller cycle Advanced boosting (e-WG or VTG) High charge motion intake ports LP/HP EGR e-CAT with GPF Waste heat recovery	100	125	250
	Pct tech #3 Aggressive Miller cycle Variable compression ratio Ultra high pressure injection Pre chamber spark plug Waste heat recovery	92	115	240

Fonte: Autor e Elgowainy, A. et al (8)

A Figura 1 compara a redução de emissão de CO<sub>2</sub> dentre os pacotes tecnológicos propostos e a referência. O comparativo evidencia que a implementação dos três pacotes tecnológicos permite uma redução de 10% ou 25g de CO<sub>2</sub> em comparação a emissão para o motor referência, considerando as emissões totais durante o ciclo de vida (*CtG* gCO<sub>2</sub>/km) do veículo. Entretanto, o benefício da absorção deste mesmo gás durante o ciclo de produção (cultivo da cana de açúcar) do etanol fica evidente - sem qualquer introdução de tecnologia, as emissões de GEE, considerando o ciclo de vida do produto são consideravelmente menores (36% de redução) com etanol.

Figura 1: Comparativo de emissões de CO<sub>2</sub> dentre os pacotes tecnológicos propostos.

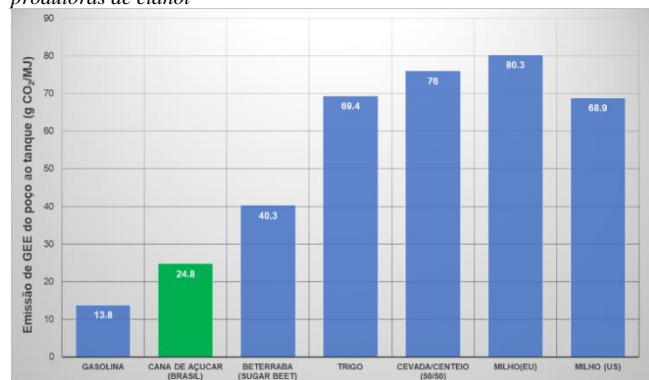


Fonte: Autor

As legislações automotivas, tradicionalmente, se baseiam em duas vertentes de restrições: **a.** emissão de poluentes; e **b.** eficiência energética e consumo de combustíveis. Os pacotes tecnológicos possibilitam não somente redução de CO<sub>2</sub>, mas também gases poluentes (definidos pela legislação, como NO<sub>x</sub>, CO e NMOG, como apresentado na Tabela 2). Assim, a possibilidade de redução de emissão de CO<sub>2</sub> por meio da utilização de etanol, não exclui a necessidade de evolução e aplicação dos pacotes apresentados, visto que estes possibilitam a obrigatoria redução dos demais poluentes.

Outra evidência favorável ao etanol brasileiro é seu baixo nível de emissões do poço ao tanque (*Well to Tank*) em relação ao etanol de outras origens. Um estudo apresentado pela comissão europeia (7) em 2014 demonstra que o processo produtivo do etanol brasileiro (feito a partir da cana de açúcar) emite cerca de 24.8 gCO<sub>2</sub>/MJ, enquanto o etanol produzido a partir de milho na Europa e Estados Unidos emitem, respectivamente, 80.3 e 68.9 gCO<sub>2</sub>/MJ de combustível final – o comparativo de emissões de CO<sub>2</sub> entre as diversas fontes é apresentado na Figura 2.

Figura 2: Comparativo de emissões de CO<sub>2</sub> entre as diversas fontes produtoras de etanol



Fonte: Autor

## HIBRIDIZAÇÃO/ELETRIFICAÇÃO

Alternativamente a pacotes direcionados ao motor de combustão interna, a eletrificação de componentes específicos ou substituição completa do motor de combustão, precisa ser avaliada com relação ao seu potencial de ganho de emissões (*CO<sub>2</sub> não emitido*) e seu custo associado. Desta forma, as seguintes soluções serão apresentadas de acordo com o grau de complexidade, desde a adição de sistemas auxiliares à substituição completa do powertrain convencional:

- **P0 híbrido (P0 MHEV):** Tal sistema, cujas características são apresentadas na Tabela 4, consiste na eletrificação de certos componentes do motor a combustão, como compressor de ar/condicionado. Alternativamente, pode-se adotar um alternador (BSG) capaz de substituir o motor de partida do veículo e elevar o torque em condições de baixa rotação. Além disto, soluções como controle de partida (start-stop) e recuperação de energia de frenagem permitem uma operação mais eficiente devido ao efeito de recuperação e posterior utilização da energia.

Tabela 4: características da arquitetura P0 MHEV

Desempenho do motor elétrico	Torque máximo (no virabrequim): até 50 Nm
	Potência máxima: 12-14 kW
	Potência contínua: 2.5-3.5 kW
Eficiência: até 85%	
Redução de consumo	New European Driving Cycle (NEDC): 10-12 %
	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP): 7-9 %
Modos híbridos	Idle Stop & Start
	Cruise Stop & Start
	Engine load shift
Torque assist	
Torque boost	
Sailing / Coasting	
Recuperação de energia	
Regeneração durante frenagem	
Custo de integração	
Vantagens	Resfriamento do e-motor (ar/água)
	Inversor integrado (ao e-motor)
	Modularidade/tamanho
Razão de torque/rotação entre e-motor e ICE permite redução de potência demandada do e-motor	
Desvantagens	Limitação de torque devido a correia
	Recuperação de energia impactada pelas perdas do ICE
	Capacidade de aumento de torque: <b>Média</b> (limitada ao escorregamento da correia e durabilidade)
Recuperação da energia: <b>Média</b> (devido as perdas do ICE)	
Melhora na dirigibilidade: <b>Média</b> (limitada ao e-motor)	
Idle e motorização elétrica: <b>Impossível</b> (devido a limitação de torque e correia)	
Packaging: <b>Fácil integração</b> (com baixo impacto em demais componentes)	
Eficiência do sistema: <b>Média</b> (principalmente devido a integração)	

Fonte: Autor

- **P4 híbrido (P0/P4 MHEV):** Tal arquitetura consiste na introdução de um motor elétrico ao eixo de tração do veículo, desacoplado do motor a combustão interna. Esta arquitetura possibilita uma maior recuperação de energia e redução das perdas quando o veículo é movido unicamente pelo motor elétrico (e-motor). A Tabela 5 apresenta das principais características da arquitetura P5 MHEV.

Tabela 5: características da arquitetura P4 MHEV

Desempenho do motor elétrico	Torque máximo (no virabrequim): até 50 Nm
	Potência máxima: 21 kW
	Efficiency: até 95%
Redução de consumo	New European Driving Cycle (NEDC): 19-22 %
	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP): 14-16 %
Modos híbridos	Idle Stop & Start
	Cruise Stop & Start
	Engine load shift
Torque assist	
Torque boost	
Sailing / Coasting	
Recuperação de energia	
Regeneração durante frenagem	
Direção elétrica (veículo movido unicamente pelo e-motor)	
Vantagens	Elevada eficiência energética
	Direção elétrica (veículo movido unicamente pelo e-motor)
	Tração integral
Desvantagens	Requer um e-motor adicional para a partida do ICE
	Impacto na arquitetura existente do veículo
	Custo dos componentes elétricos
Refrigeramento (ar) não adequado ao e-motor	
Capacidade de aumento de torque: <b>Alta</b> (limitada ao e-motor)	
Recuperação da energia: <b>Alta</b> (não afetada pelas perdas do ICE)	
Melhora na dirigibilidade: <b>Média</b> (limitada ao e-motor)	
Idle e motorização elétrica: <b>Possível</b> (limitada ao e-motor)	
Packaging: <b>Difícil integração</b> (trem de potência deve ser desenvolvido especificamente para esta arquitetura)	
Eficiência do sistema: <b>Alta</b>	

Fonte: Autor

- **Híbrido plug-in, autonomia de 15km (PHEV15):** A arquitetura híbrida plug-in permite o carregamento da



bateria não só pelo motor a combustão interna (como acontece com a arquitetura P4 MHEV), mas também por meio de uma rede elétrica externa - o pacote de bateria estipula a autonomia elétrica desejada. A arquitetura PHEV pode ser do tipo: **a. série**, na qual apenas o e-motor traciona as rodas do veículo e o motor a combustão interna é utilizado como um *range-extender* da autonomia; ou **b. paralela**, na qual ambos motores são conectados às rodas e tracionam o veículo.

- **Híbrido plug-in, autonomia de 50km (PHEV50):** Sistema semelhante ao PHEV15 com maior autonomia de operação elétrica.
- **Elétrico, célula de combustível de hidrogênio (H2 FCEV):** Tal arquitetura consiste na substituição completa do motor a combustão interna por um motor elétrico associado a uma célula de combustível para suprir a demanda energética do e-motor.
- **Elétrico a bateria, autonomia de 150km (BEV150):** Tal arquitetura consiste na substituição completa do motor a combustão interna por um motor elétrico associado a um pacote de baterias para suprir a demanda energética do e-motor. A Tabela 6 apresenta das principais características da arquitetura BEV.

Tabela 6: características da arquitetura BEV

<b>Vantagens</b>	<p>Eficiência do trem de potência elétrico: o conjunto e-motor e bateria apresenta uma <b>elevada eficiência energética</b>, dependendo do ponto de operação entre 75-95%</p> <p>Aceleração veicular: disponibilidade de torque em baixíssimas rotações</p> <p>Confiabilidade: a menor quantidade de componentes móveis possibilita redução das potências fontes de falha</p> <p>Distribuição de torque: baixo tempo de resposta do sistema (quando comparado ao ICE)</p>
<b>Desvantagens</b>	<p>Densidade energética: um sistema de baterias tem aproximadamente 10 vezes menos densidade energética que combustíveis utilizados nos motores a combustão interna</p> <p>Tempo de recarga</p> <p>Infraestrutura de carregamento</p>

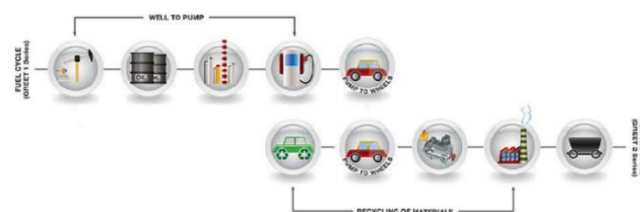
Fonte: Autor

- **Elétrico a bateria, autonomia de 330km (BEV330):** sistema semelhante ao BEV150 com maior autonomia de operação elétrica.

## ANÁLISE DE CUSTO

Para análise da viabilidade das soluções tecnológicas, faz-se necessário avaliar em conjunto o ciclo do combustível, apresentado anteriormente e o ciclo de vida do veículo. O modelo GREET (Figura 3) apresentado por Wang et al. (Fonte 12) engloba ambos ciclos nesta análise. Dentre as etapas do ciclo do veículo estão o custo estimado do combustível utilizado ao longo da vida útil do veículo, a massa de cada componente, assim como sua composição, potencial reutilização posterior e energia utilizada durante o processo de reciclagem.

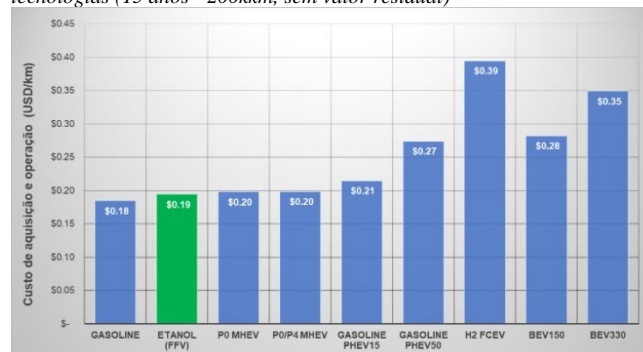
Figura 3: Modelo GREET para análise de custos



Fontes: Wang et al (12)

Os dados utilizados neste estudo foram baseados em (8) e adaptados ao mercado local. Os dados consideram os custos de aquisição e combustível por um período de 15 anos, 200kkm e valor residual nulo. Os dados de consumo de combustível consideram um ciclo combinado (equivalente entre cidade e estrada), divulgado pela Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana (EPA). Dentre resultados, apresentados na Figura 4, deve-se destacar o elevado custo associado a um veículo elétrico com maior autonomia (BEV330), devido ao, atual, elevado custo associado às baterias e células de combustível (para o caso da tecnologia H2 FCEV).

Figura 4: Custo de aquisição e operação de veículo de diferentes tecnologias (15 anos - 200kkm, sem valor residual)



Fonte: Autor e Elgowainy, A. et al (8)

## ANÁLISE DA VIABILIDADE

Como apresentado anteriormente, a viabilidade de um determinado pacote tecnológico ou arquitetura de powertrain quanto à sua potencial redução de GEE pode ser analisada pela razão “custo/redução de emissões” (ou USD/gCO<sub>2ne</sub>, não emitido). Para isso, faz-se necessário determinar as emissões do ciclo de vida (CrG gCO<sub>2</sub>) de cada tecnologia. Tal determinação é mais assertiva quando dividida em emissões veiculares, ciclo produtivo do combustível e processo produtivo do veículo em si, considerando a reutilização/reciclagem de parte dos materiais que compõe os sistemas. A combinação desses três processos resultará na emissão durante o ciclo de vida do produto, apresentado na Tabela 7.

Tabela 7: análise de emissões e razão entre custo e massa de GEE não emitido para os diferentes pacotes tecnológicos e soluções de powertrain

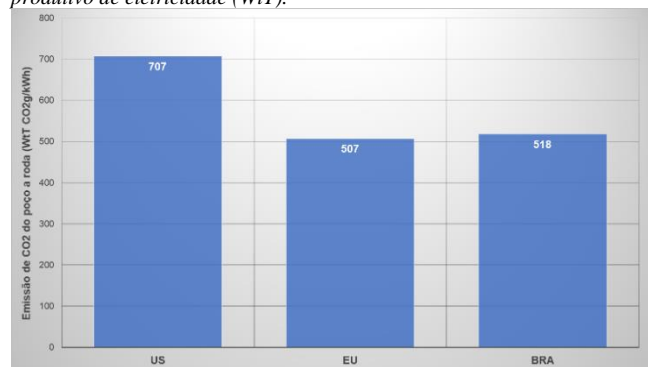
Pacote tecnológico	Descrição	Potencial redução de emissão GEE		
		Ct gCO <sub>2</sub> /km	USD/km	USD/CO <sub>2ne</sub>
ICE	Referência			
	Gasolina	265	0.185	-
	Etanol	170	0.194	100
	Pacote tecnológico #1			
	Dual-VT Direct injection Boosting Integrated exhaust manifold Split cooling - controlled thermostat	255	0.195	985
	Pacote tecnológico #2			
	Miller cycle Advanced boosting (e-WG or VTG) High charge motion intake ports LP/HP EGR e-CAT with GPF Waste heat recovery	250	0.203	1232
	Pacote tecnológico #3			
	Aggressive Miller cycle Variable compression ratio Ultra high pressure injection Pre chamber spark plug Waste heat recovery	240	0.222	1478
	P0 MHEV			
PWT	BSG Idle and Cruising Start/Stop Energy recuperation	255	0.198	1340
	P0/P4 MHEV	213	0.198	261
	Gasoline PHEV15 15 km, mileage range	209	0.215	538
	Gasoline PHEV50 50 km, mileage range	202	0.274	1413
	H2 FCEV	196	0.395	3043
	BEV150 150 km, mileage range	187	0.282	1248
	BEV330 330 km, mileage range	209	0.349	2937

Fonte: Autor

Semelhante à análise anterior (Figura 1), o benefício da absorção de CO<sub>2</sub> durante o ciclo de produção (cultivo da cana de açúcar) do etanol fica evidente também em comparação as outras soluções relacionadas ao powertrain. Alternativas como MHEV e BEV apresentam enorme redução de emissão de GEE quando consideramos somente emissões veiculares (do tanque à roda). Entretanto, quando incluímos o processo produtivo do combustível e componentes associados a essas arquiteturas, (principalmente o pacote de baterias) tal redução não é benéfica quando comparada a biocombustíveis, como o etanol.

Outra influência relacionada a emissões do ciclo de vida é, para arquiteturas híbridas e elétricas, o processo produtivo da energia elétrica. A matriz energética de cada país, pode influenciar positivamente a eletrificação de componentes do powertrain. Como apresentado na Figura 5, os mercados Brasileiros e Europeu apresentam uma matriz energética bastante semelhante quanto a suas emissões de CO<sub>2</sub>, composta principalmente de fontes renováveis (solar, eólica e hidroelétrica no caso Brasileiro) e nuclear (na matriz Europeia). Em um cenário oposto, a matriz Norte-Americana, em meio a uma transição, é composta, majoritariamente, por carvão e gás natural; sendo o primeiro meio responsável por mais de 67% das emissões de CO<sub>2</sub> no país.

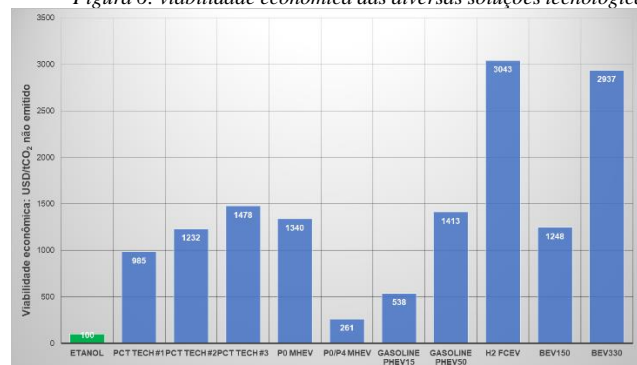
Figura 5: Emissão de CO<sub>2</sub> (gCO<sub>2</sub>/kWh) durante o processo produtivo de eletricidade (WtT).



Fontes: United States Environmental Protection Agency, 2018; Joint Research Center/European Commission, 2014; Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicação/Brasil, 2019

Assim, ao objetivar a redução total de emissão de GEE ao longo do ciclo de vida do produto, a matriz energética de cada país pode ser analisada e considerada na definição de políticas automotivas. Entretanto, tais políticas seriam ineficientes caso não levassem em conta a viabilidade das soluções tecnológicas. A Figura 6 apresenta tal razão “custo/redução de emissões” (ou USD/gCO<sub>2ne</sub>, não emitido) e demonstra o potencial do etanol Brasileiro frente as demais soluções.

Figura 6: viabilidade econômica das diversas soluções tecnológicas



Fonte: Autor

Dentre todas soluções apresentadas e discutidas, o etanol proporciona o menor custo associado à redução de CO<sub>2</sub>. Os principais fatores associados a este baixo custo são: **a.** custo de desenvolvimento e adequação à operação com etanol; **b.** disponibilidade local para desenvolvimento de soluções tecnológicas automotivas; **c.** absorção de CO<sub>2</sub> durante o ciclo de produção (cultivo da cana de açúcar) do etanol, reduzindo as emissões totais no ciclo de vida do veículo; **d.** elevado custo associado às tecnologias alternativas; **e.** elevado nível de emissões totais no ciclo de vida associado às tecnologias alternativas.

A Figura 6 evidencia que soluções alternativas como hibridização parcial (P0/P4 MHEV e PHEV) apresentam grande potencial de redução de gases poluentes, mas a custo superior. Ademais, a baixa viabilidade econômica associada a H2 FCEV devido aos atuais custos de produção de H<sub>2</sub> e tecnológico elevados, abre oportunidade para uma solução alternativa a ser analisada futuramente, a célula de combustível por óxido sólido (SOFC). Tal célula pode utilizar etanol como combustível e se beneficiar da reduzida emissão de GEE associada a este biocombustível.

## CONCLUSÃO

Em virtude das atuais e futuras legislações de restrição de emissão de poluentes e gases de efeito estufa, este artigo objetivou analisar as diversas soluções tecnológicas existentes com relação a sua potencial redução de emissão de CO<sub>2</sub> e sua viabilidade econômica. Para isto foram discutidos os conceitos de emissão veicular, ciclo produtivo do combustível e processo produtivo do veículo em si.

A viabilidade das soluções tecnológicas foi considerada como o custo associada a potencial redução de emissão de GEE. Este estudo evidenciou os benefícios existentes na utilização de biocombustível, especificamente o etanol, largamente produzido, disponibilizado e utilizado no mercado nacional. A utilização do etanol como solução para redução de CO<sub>2</sub> no ciclo de vida de um veículo possibilita a redução de 1 tonelada deste gás com o menor investimento (119 USD/tCO<sub>2</sub>) dentre as tecnologias analisadas.

Tal fato evidencia a necessidade de expansão da utilização deste combustível, assim como o contínuo desenvolvimento local de motores de combustão interna, visando redução de emissão de gases poluentes e aumento da eficiência energética. Sendo este desenvolvimento, normalmente, associado às legislações, que por sua vez, precisam alavancar o desenvolvimento automotivo, além de preservar o específico conhecimento adquirido ao longo dos últimos anos no Brasil.

## REFERÊNCIAS

- (1) Yacobucci B., Bamberger R. *Automobile and Light Truck Fuel Economy: The CAFE Standards*. Washington, 2007.
- (2) Estados Unidos da America. *Light-Duty Vehicle Greenhouse Gas Emission Standards and Corporate Average Fuel Economy Standards*. Environmental Protection Agency. 2010.
- (3) União Européia. *Regulation (EU) 2009/443 of the European Parliament and of the Council*. 2009.
- (4) União Européia. *Regulation (EU) 2019/631 of the European Parliament and of the Council*. 2019.
- (5) INMETRO. “Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular”. Instituto Nacional de Metrologia, Brasília.
- (6) International Council on Clean Transportation. *CO<sub>2</sub> Emission Standards for Passenger Cars and Light-Commercial Vehicles in the European Union*. 2019
- (7) Edwards R. et al. *Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context: WELL-TO-TANK Report*. Luxembourg, 2014.
- (8) Elgowainy, A. et al. *Cradle-to-Grave lifecycle analysis of US light-duty vehicle-fuel pathways: A greenhouse gas emissions and economic assessment of current (2015) and future (2025-2030) technologies*. Argonne National Laboratory. Chicago, 2016.
- (9) CETESB. *Gases do Efeito Estufa e Fontes de Emissão*. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/gases-do-efeito-estufa/>. Acesso em 23/04/2020.
- (10) Edwards R., Larivé J-F., Beziat J-C. *Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context*. European Commission Joint Research Centre Institute for Energy and Transport. Version 3c, July 2011
- (11) Brasil. Resolução nº492, de 20 de Dezembro de 2018. Estabelece as Fases PROCONVE L7 e PROCONVE L8 de exigências do Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores. Diário Oficial da União: edição 246, seção 1, página 141.
- (12) Wang M. et al. *Summary of Expansions and Updates in GREET® 2020*. Argonne National Laboratory. Chicago, 2020.

## CONTATOS

### Maurilio Cassiani

Powertrain Development Engineer at AVL South America  
mailto: Maurilio.Cassiani@avl.com