

ANÁLISE DE EMISSÕES E CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM CICLO DE CONDUÇÃO DE UM VEÍCULO BI-FUEL GNV/ETANOL/DIESEL CONVENCIONAL E HÍBRIDO LEVE P0 MILD HEVDavi José Souza Ferreira¹ (IC), Christian Jeremi Coronado Rodriguez (PQ)¹¹Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).**Palavras-chave: Biocombustível; Hibridização; FTP-75; emissões; condução.****Introdução**

A grande maioria dos países concorda que o planeta está chegando a um ponto sem retorno em relação ao aquecimento global e às mudanças climáticas. Prova disso é a Agenda 2030 e o Acordo de Paris, ratificados por quase todas as nações do mundo, dois dos mais importantes pactos globais que orientam as ações para um futuro sustentável. Entre as metas, as fontes de energia renováveis se destacam para mitigar as emissões de gases de efeito estufa.

O mecanismo dos motores de combustão é bem conhecido: a queima de combustível gera energia mecânica e térmica. No caso dos veículos motorizados, o calor é uma forma indesejada de energia; nesse sentido, a eficiência de conversão da queima em energia mecânica é um dado importante ao escolher a fonte de um combustível.

No entanto, a queima de combustível também produz alguns vilões nesses motores: gases de efeito estufa (GEE), gases contaminantes e tóxicos para a saúde humana. Os principais gases produzidos são dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4), dióxido de nitrogênio (NO_2), óxido nítrico (NO), amônia (NH_3), clorofluorcarbonetos (CFCs), hidrofluorcarbonetos (HFCs), ozônio (O_3), perfluorcarbonetos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF_6) e compostos orgânicos voláteis (VOCs) [1].

Os biocombustíveis são reagentes que não têm origem fóssil, sendo obtidos a partir de biomassa vegetal ou animal. Suas principais vantagens são a possibilidade de serem produzidos através de matéria prima renovável, além de gerar menos dependência mundial de combustíveis de origem fóssil, reduzindo, em certos casos, a geração de gases do efeito estufa [2].

O Brasil fabricou cerca de 34,5 bilhões de litros de etanol em 2023, apresentando um acréscimo de 80 milhões de litros em relação a 2019, ano recorde [3]. Por outro lado, o Brasil produz, em média, 49Mm³/dia de GNV [4], enquanto o diesel tem perspectiva de aumento de consumo em 2025 de 2,5%, perante os 70,5 bilhões de litros consumidos em 2024 [5].

Geralmente, para que um determinado combustível seja adequado como combustível alternativo renovável para aplicações em motores SI, ele deve atender aos requisitos e propriedades fundamentais, como o número de octanas, inflamabilidade, estabilidade de combustão, poder calorífico da mistura ar-combustível, velocidade de queima laminar, pressão de vapor, curva de ebulição e volatilidade [6].

Motores a diesel são amplamente utilizados em transporte, produção de energia e máquinas agrícolas devido à sua eficiência, confiabilidade e durabilidade. A União Europeia (UE) tem liderado as regulamentações de emissões e reforçado os limites de emissão de motores a diesel dia após dia para cumprir seus compromissos no Acordo Climático de Paris.

Os combustíveis alternativos para motores de combustão interna podem ser categorizados como biocombustíveis líquidos ou biocombustíveis gasosos. Os biocombustíveis líquidos incluem o etanol, biodiesel, HVO, combustíveis sintéticos e os biocombustíveis gasosos incluem o biogás, ou GNV.

“Veículos bicombustíveis” são veículos com dois sistemas de armazenamento de combustível separados, mas que funcionam principalmente com apenas um combustível de cada vez. “Veículos bicombustíveis a gás” são veículos bicombustíveis em que os dois combustíveis são: líquido (gasolina, etanol) e GNV, gás natural. O gás natural é considerado uma opção de descarbonização de transporte economicamente viável, especialmente para países em desenvolvimento [7].

O etanol é um combustível oxigenado com menor teor de carbono e maior velocidade de chama laminar em comparação à gasolina, portanto, a eficiência da combustão do motor pode ser aumentada.

O consumo de combustível no setor de transporte é uma das principais causas das emissões de gases de efeito estufa e das mudanças climáticas globais. De uma perspectiva global, no campo de automóveis de passageiros, o mercado automotivo está passando por uma eletrificação em larga escala, com um grande número de Veículos Elétricos Híbridos (MHEVs, HEVs) entrando no mercado.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Atualmente, as legislações estão introduzindo limites cada vez mais rigorosos para motores de combustão interna (ICE's) para garantir as menores emissões de escapamento. Em particular, a atenção está mudando para uma verificação de emissões no mundo real, com um processo de homologação que considera as verdadeiras condições de uso do veículo [8].

Por exemplo, é muito importante prever o impacto de vários períodos longos ou curtos, pois as características de um ciclo de condução usado para testar veículos têm um impacto direto no desempenho de seus motores de combustão.

Em geral, os métodos de construção de ciclos geralmente incluem as seguintes etapas: coleta de dados de condução do mundo real, segmentação dos dados de condução, construção de ciclos e avaliação e seleção do ciclo final [9].

Mais especificamente, simulações termofluidodinâmicas 1D de motores IC (*Internal Combustion*) têm sido comumente empregadas durante as últimas décadas para investigar e otimizar o desempenho e as emissões. Em trabalhos iniciais, o motor de combustão interna tem sido geralmente representado por um mapa de tabela de consulta 0D, para ser acoplado a outros modelos que representam o trem de força e o veículo [10].

O software unidimensional GT-SUITE, especificamente a plataforma GT-DRIVE, é uma ferramenta poderosa de simulação de ciclos de condução capazes de avaliar emissões, consumo específico de combustível, desempenho, entre outros resultados advindos de diferentes condições de operação.

No software, é necessária a inserção de diferentes engine maps, como consumo específico de combustível, temperatura dos gases de exaustão, emissões de interesse, fluxo de massa de ar e potência, em função da demanda de torque ou posição do acelerador, como exemplo.

Dessa forma, torna-se interessante avaliar as emissões de um veículo Bi-Fuel capaz de operar com diesel, GNV e etanol. Ademais, propõe-se observar o impacto da tecnologia híbrida leve no conjunto nas emissões de CO_2 e NO_x , além do consumo de combustível.

Metodologia

Como objeto de estudo, tem-se o motor F1C instalado em bancada dinâmométrica de 300kW situada no LMT, Laboratório de Máquinas Térmicas da UNIFEI. As principais características podem ser observadas abaixo:

Tabela 1 – Características do motor F1C.

Motor F1C

Ciclo	Otto 4 tempos
Deslocamento	2998cm ³
Diâmetro x Curso	95.8mm x 104mm
Número de cilindros	4
Configuração	Em linha, 16v, DOHC
Taxa de compressão	12.5:1
Admissão	Sobrealimentado
Máximo torque	350Nm @ 2200 RPM
Máxima potência	100 kW @ 3500 RPM

Portanto, com a intenção de obter os principais engine maps, foram realizados testes em dinamômetro de bancada e, posteriormente, os dados foram tratados em forma de tabelas, contendo, portanto, os principais pontos de operação do motor. Foram ensaiadas condições de plena carga e cargas parciais, como 75%, 50% e 25% de pedal. Após isso, os dados foram agrupados em função da rotação do motor e sua demanda de torque, visando satisfazer as condições impostas pelo processo de simulação de ciclos de condução. A imagem abaixo mostra parte dos engine maps utilizados, como BSEC (*Brake Specific Energy Consumption*) e $BSCO_2$ dos três combustíveis:

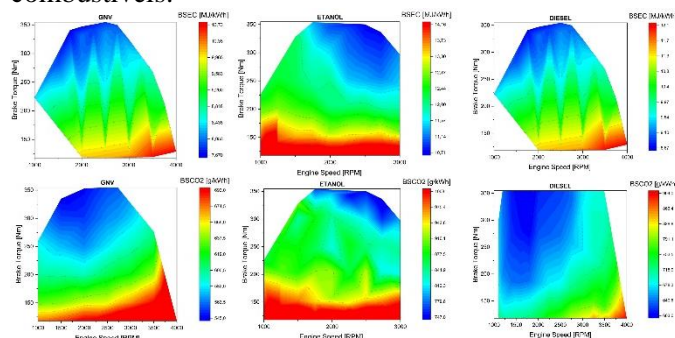


Figura 1 – Engine maps do motor F1C.

Ademais, com o objetivo de estudar um veículo comercial, foi escolhido o modelo Iveco Daily 35-160, utilitário que usa o motor F1C, o qual foi ensaiado na UNIFEI. Abaixo tem-se as principais informações:

Tabela 2 – Características do veículo de estudo.

Iveco Daily 35-160	Características
Entre-eixos	3450mm
Diâmetro dos pneus	744mm
Área frontal	4,68m ²
Transmissão	5,07/2,61/1,52/1/0,77/0,66
Peso do veículo + carga	1985kg
Velocidade máxima	128km/h

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Desse modo, com as principais informações levantadas acerca do objeto de estudo, torna-se possível a modelagem do projeto na plataforma GT-DRIVE. A imagem do modelo computacional convencional e híbrido, respectivamente, pode ser vista abaixo:

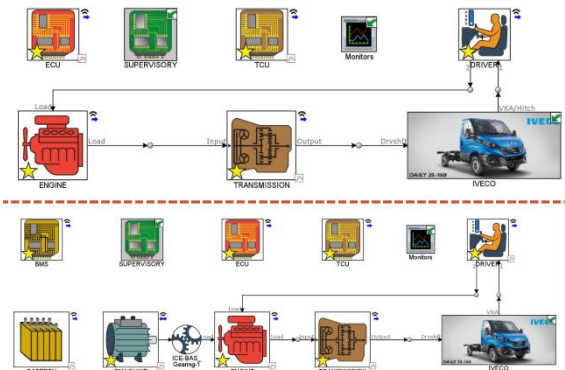


Figura 2 – Modelo de veículo convencional e híbrido.

Portanto, destaca-se na imagem acima a presença de um pack de bateria (52A-h) e um motor elétrico de 18kW acoplado ao virabrequim, caracterizando um híbrido leve tipo MILD HEV P0, o qual tem a função de auxiliar em pequenas acelerações e períodos de marcha lenta. A estratégia de controle do híbrido está abaixo:

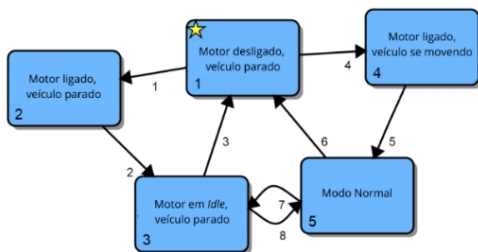


Figura 3 – Estratégia de funcionamento do híbrido leve.

O ciclo de condução FTP-75 é caracterizado por distintas condições de operação ao longo da duração do teste, como a fase de partida a frio, fase transitiente e a de partida a quente. Pode-se observar abaixo o ciclo:

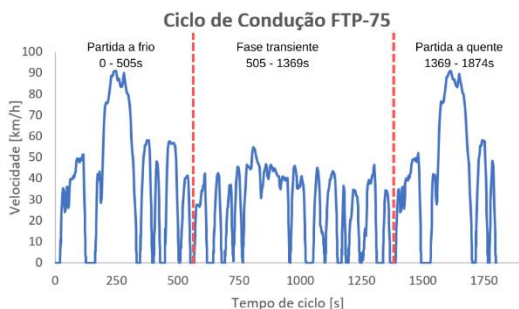


Figura 4 – Ciclo de condução FTP-75.

Dessa forma, são abordados, principalmente, o consumo de combustível e o nível de emissões de acordo com as

demandas de torque ao longo do percurso. O FTP-75 tem como distância total de teste de 17.7km, velocidade média de 34.5km/h e duração de 1874 segundos.

Portanto, será utilizado para gerar os resultados de emissões e consumo do objeto de estudo. No entanto, como é dificultoso o processo de levantamento de emissões reais em condições de cold start, foi estudado apenas a fase transitiente e partida a quente.

Com o ciclo escolhido, engine maps inutados, características físicas do veículo e modelos de controle de transmissão, motor e bateria modelados, torna-se possível obter resultados em função do tempo de trajeto.

Resultados e discussão

Os principais resultados dos processos de simulação podem ser observados abaixo:

Tabela 3 – Resultados nas fases transitiente e quente.

	Fase	Consumo [MJ/km]	CO ₂ [g/km]	NOx [mg/km]
GNV	Transiente	3,22	344,07	0,046
	Quente	2,47	269,86	0,018
GNV Híbrido	Transiente	2,01	220,18	0,028
	Quente	2,01	223,67	0,0071
Diesel	Transiente	3,85	373,98	2,14
	Quente	3,09	304,53	1,15
Diesel Híbrido	Transiente	2,29	228,13	0,23
	Quente	2,29	232,40	0,018
Etanol	Transiente	4,55	543,74	0,64
	Quente	3,33	396,69	0,33
Etanol Híbrido	Transiente	2,40	280,49	0,38
	Quente	2,66	317,77	0,25

Pode-se observar a diferença entre os resultados nas fases transitiente e quente, fato esse que se deve pelas condições de operações pouco eficientes em que o veículo é colocado à prova na fase transitória, caracterizada por alta rotação e baixa carga, ou baixa rotação e alta carga. A figura abaixo mostra resultados de consumo instantâneo, em g/s, do diesel convencional e híbrido ao longo do trajeto:

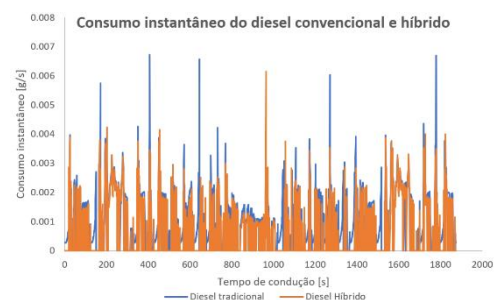


Figura 5 – Consumo instantâneo de Diesel.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

É visível que o híbrido atua diminuindo o consumo de combustível e, conseqüentemente, emissões específicas na abordagem de desligamento do motor de combustão interna em *Idle* (marcha lenta), além do auxílio em baixas velocidades. Portanto, o gráfico abaixo mostra o consumo de combustível em cada modelo e fase de operação:

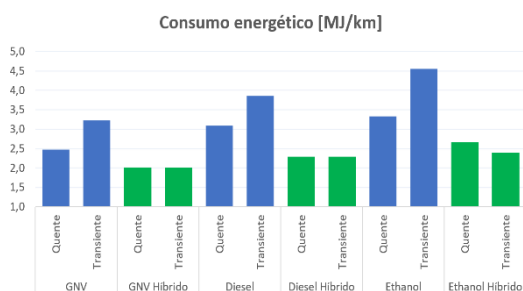


Figura 6 – Consumo médio dos modelos.

Ademais, tem-se, de forma gráfica, a emissão de CO_2 , em g/km, de cada modelo simulado:

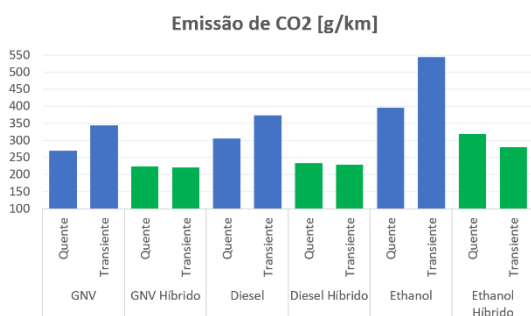


Figura 7 – Emissão de CO_2 dos modelos.

Conclusões

Com bases nos principais resultados colhidos nos processos de simulação, conclui-se que o sistema híbrido leve MHEV P0 MILD atua de maneira eficiente na mitigação de emissões e consumo de combustível:

Tabela 4 – Diferenças relativas dos resultados, em %.

Diferenças relativas (convencional e híbrido) [%]		Consumo	CO_2	NO_x
GNV	Transiente	-60,4	-56,2	-38,5
Híbrido	Quente	-22,6	-20,7	-61,0
Diesel	Transiente	-40,5	-63,9	-89,2
Híbrido	Quente	-25,8	-31,0	-84,1
Etanol	Transiente	-89,8	-93,9	-40,7
Híbrido	Quente	-24,9	-24,8	-25,2

Além disso, é clara a diferença entre as emissões e consumo de combustível diante de diferentes condições de operação no veículo convencional. Desse modo, esta pesquisa serve de base para um estudo aprofundado sobre regimes em transiente no desenvolvimento de estratégias de calibração em motores de combustão interna. Dessa forma, visa-se atenuar regiões de baixa eficiência.

Destaca-se a habilidade do sistema híbrido em contornar as regiões de operação de maior consumo e emissões do veículo equipado com o motor FIC, de modo a diminuir, fortemente, as emissões de CO_2 e NO_x atribuídas, também, à temperatura de exaustão, já que em *Idle* o motor desliga, além de auxiliar em acelerações.

Por fim, a tecnologia híbrida é capaz de proporcionar a sistemas de alto impacto emissivo, como motores à combustão interna, uma sobrevida comercial e ambiental.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha gratidão ao Professor Christian Jeremi Coronado Rodriguez pela confiança depositada em mim, agradecer aos meus amigos do GETEC, à Universidade Federal de Itajubá – a qual me faz ser melhor a cada dia – e ao CNPq pelo incentivo ao longo desse ano.

Referências

- [1] Yamaka, Woraphon, et al. “Economic and Energy Impacts on Greenhouse Gas Emissions: A Case Study of China and the USA.” *Energy Reports*, vol. 7, no. 2, Sept. 2021, pp. 240–247, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.040>;
- [2] Heywood, J.B., 2018. “Internal Combustion Engine Fundamentals”. McGraw Hill Education, 2nd edition;
- [3] EBC, 2024. Produção de biodiesel e etanol bate recorde no Brasil. <https://agenciabrasil.ebc.com.br/radioagencia-nacional/economia/audio/2024-08/producao-de-biodiesel-e-etanol-bate-recorde-no-brasil>;
- [4] ANP, 2025. Relatório Executivo. <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-contudo/dados-estatisticos/de/re/2025/maio.pdf>;
- [5] IBP, 2025. IBP discute perspectivas para o setor de combustíveis em 2025. <https://www.ibp.org.br/noticias/ibp-discute-perspectivas-para-o-setor-de-combustiveis-em-2025/>;
- [6] Awogbemi, Omojola, et al. “An Overview of the Classification, Production and Utilization of Biofuels for Internal Combustion Engine Applications.” *Energies*, vol. 14, no. 18, 9 Sept. 2021, p. 5687, <https://doi.org/10.3390/en14185687>;
- [7] Wang, Xin, et al. “Tracing the Regulated Emissions of Field-Aged Gasoline/Natural Gas Bi-Fuel Taxis from New to 160,000 Km: Deterioration and Environmental Implications.” *Fuel*, vol. 362, no. 8, 4 Jan. 2024, pp. 130863–130863, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.130863>;
- [8] Joumard, R, et al. “Influence of Driving Cycles on Unit Emissions from Passenger Cars.” *Atmospheric Environment*, vol. 34, no. 27, Jan. 2000, pp. 4621–4628, [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(00\)00118-7](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(00)00118-7);
- [9] André, Michel. “The ARTEMIS European Driving Cycles for Measuring Car Pollutant Emissions.” *Science of the Total Environment*, vol. 334-335, Dec. 2004, pp. 73–84, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.04.070>;
- [10] Andrea Massimo Marinoni, et al. “Real Driving Cycle Simulation of a Hybrid Bus by Means of a Co-Simulation Tool for the Prediction of Performance and Emissions.” *Energies*, vol. 16, no. 12, 15 June 2023, pp. 4736–4736, <https://doi.org/10.3390/en16124736>;