

# PRÊMIO AEA ESG 2026

## MOTOR BI-FUEL DE ALTA EFICIÊNCIA A ETANOL E BIOMETANO PARA APLICAÇÃO EM VEÍCULOS COMERCIAIS LEVES

### Responsáveis pelo Projeto

Alexandre Xavier<sup>1</sup>, Evandro da Cruz<sup>1</sup>, Daniel Junqueira<sup>1</sup>, Everton Silva<sup>2</sup>, Heitor Chaves<sup>2</sup>, Pedro Venancio<sup>2</sup>

### Empresa

<sup>1</sup>FPT Industrial, <sup>2</sup>MAHLE

### RESUMO

A descarbonização da mobilidade é um dos maiores desafios atuais, especialmente no transporte rodoviário, responsável por parcela relevante das emissões urbanas. No Brasil, o uso de combustíveis renováveis e tecnologias de menor impacto ambiental é essencial para reduzir emissões e fortalecer a matriz energética nacional. Entre essas alternativas, destacam-se o biometano, com baixa intensidade de carbono (8,35 gCO<sub>2</sub>eq/MJ), e o etanol, ambos significativamente menos emissores que combustíveis fósseis utilizados no transporte comercial [1].

Este projeto desenvolve um motor bi-fuel de alta eficiência para operar com etanol e biometano em veículos comerciais leves, como vans, micro-ônibus e caminhões urbanos. A partir do motor F1C-GNV, foi criada uma arquitetura otimizada, com melhorias em eficiência energética e desempenho ambiental.

O desenvolvimento envolveu modelagens matemáticas, simulações e definição de hardware, além de parceria com a UNIFEI para aprimorar infraestrutura e instrumentação avançada para análises de combustão e desempenho.

Ensaio estacionários, testes transientes e medições de emissões foram realizados nos laboratórios da MAHLE em Jundiaí, validando o funcionamento do protótipo em condições representativas. O projeto resultou em um veículo demonstrador totalmente funcional, comprovando a viabilidade da tecnologia bi-fuel e sua contribuição para uma mobilidade mais limpa e sustentável.

### APLICABILIDADE

A descarbonização da mobilidade exige soluções adaptadas a diferentes segmentos, e os biocombustíveis têm papel central nesse processo. Sistemas bi-fuel ampliam a flexibilidade operacional das frotas ao permitir o uso de combustíveis renováveis com baixa pegada de carbono, tornando a adoção mais viável em diversos contextos.

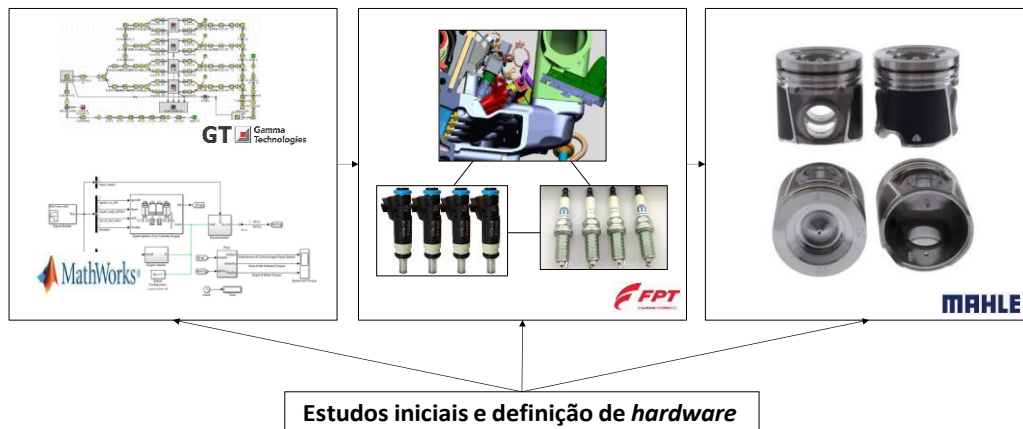
Nesse cenário, os veículos comerciais leves como vans, caminhões de entrega e micro-ônibus são especialmente relevantes, pois respondem por grande parte da movimentação urbana de cargas e do transporte de passageiros. O Brasil possui 6,1 milhões de veículos comerciais leves em circulação, segundo o Sindipeças [2], o que evidencia a importância de disponibilizar alternativas de baixa emissão para esse segmento estratégico.

## OBJETIVO

O objetivo deste projeto é desenvolver, validar e demonstrar um motor bi-fuel de alta eficiência, capaz de operar com etanol e biometano, para aplicação em veículos comerciais leves como vans, caminhões de entrega urbana e micro-ônibus. A iniciativa busca elevar a eficiência energética do conjunto motopropulsor, reduzir emissões veiculares e viabilizar uma solução tecnológica compatível com os desafios de descarbonização da mobilidade brasileira. Para isso, o projeto envolve o desenvolvimento de modelos e hardware específicos, a realização de ensaios experimentais e calibração em ambiente laboratorial e, por fim, a construção de um protótipo funcional completo, capaz de demonstrar a aplicabilidade e a maturidade da tecnologia em condições reais de uso.

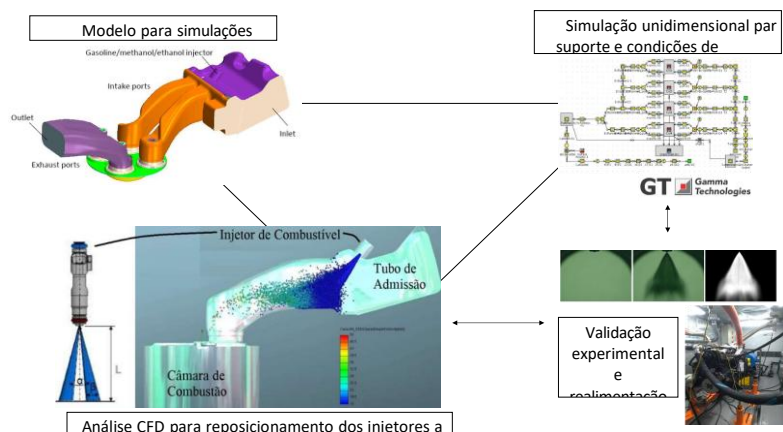
## 1. METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

A primeira etapa do projeto consistiu em estudos iniciais por meio de modelos matemáticos zero e unidimensionais para cálculos térmicos e estimativas de desempenho e eficiências do motor protótipo para operar com etanol. Como já mencionado anteriormente, o motor FPT F1C-GNV está sendo utilizado como base para o desenvolvimento do motor bi-fuel com etanol e biometano. Modelos utilizando as plataformas Matlab e GT-Suite foram desenvolvidos para definição de hardware e componentes (injetores, velas, relação volumétrica de compressão etc.). A MAHLE possui grande influência nesta etapa no desenvolvimento e fornecimento de componentes para o motor protótipo a partir dos estudos realizados, principalmente no fornecimento dos novos pistões do motor. A Figura 1 ilustra o desenvolvimento das primeiras etapas do projeto.



**Figura 1:** Estudos iniciais e definição de hardware (Fonte: Elaborada pelos autores)

Com relação às etapas de simulações numéricas, foram utilizados softwares para análise unidimensional (GT-Suite) e tridimensional (ANSYS Fluent) do motor e dos injetores. O objetivo é reposicionar os injetores de combustível líquido do motor base (originalmente são injetores para gasolina no modo recovery com baixo desempenho). Os dados obtidos experimentalmente serviram de base para a validação matemática dos modelos numéricos e são utilizados continuamente para verificação de novos resultados (Figura 2).



**Figura 2:** Procedimento de simulações computacionais (Fonte: Elaborada pelos autores)

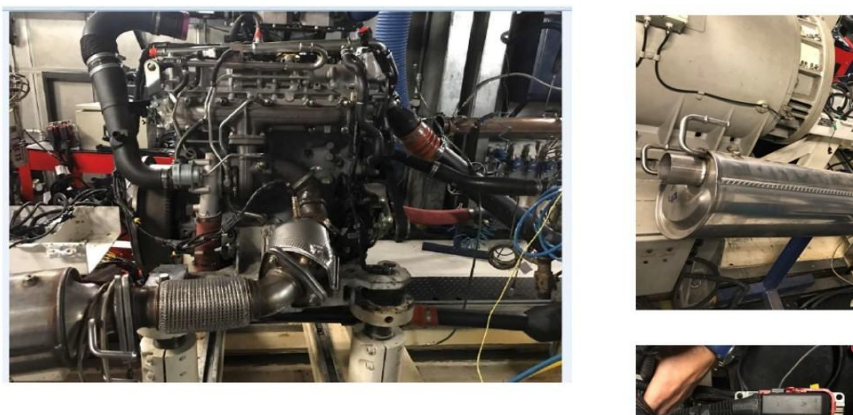
A modelagem tridimensional está sendo realizada por meio do software ANSYS Fluent. O primeiro passo foi a obtenção da geometria detalhada dos injetores e do coletor de admissão. Uma vez conhecida a geometria precisa, tais informações foram transportadas para software CAD, a fim de preparar a análise em CFD. Com uma análise conjunta entre modelo CFD, desenvolvido a partir dos modelos CAD e de formulações matemáticas selecionadas, e de análises de imagem do spray e da formação de mistura ao longo do coletor, já temos como resultado modelagens computacionais confiáveis que podem ser validadas experimentalmente. Com um modelo adequado em mãos, está sendo feita uma rotina de otimização por meio do controle das principais variáveis relativas ao posicionamento e à operação do injetor, visando o aprimoramento da mistura ar-etanol e, como objetivo final, um aumento na eficiência e redução nas emissões dos principais poluentes. Todos os dados obtidos numericamente foram validados experimentalmente por meio de modificações no injetor, sistema de admissão de ar e motor como um todo, a fim de validar os resultados propostos.

Especificações do motor base (FPT F1C-GNV) utilizado para o desenvolvimento do protótipo estão apresentadas na Tabela 3 e Figura 3, respectivamente. O motor possui central eletrônica Magneti Marelli e com comunicação com software de calibração. O motor, produzido na Europa, foi disponibilizado pela FPT Industrial e enviado para a UNIFEI, para instalação no Banco de Ensaios e realização dos testes. A Figura 4 apresenta o motor protótipo já modificado e instalado durante testes nos laboratórios da UNIFEI.

**Tabela 3:** Características do motor base para o projeto modelo FPT F1C-GNV

<b>Ciclo</b>	4 tempos de ignição por centelha, combustão estequiométrica
<b>Emissões</b>	Catalisador 3 vias - Euro VI EEV (2001/27/EC)
<b>Tipo de injeção</b>	Sequencial – multi-ponto PFI
<b>Pressão de injeção</b>	10 bar (absoluto)
<b>Sobrealimentação</b>	Turbocompressor – WG com intercooler
<b>Número de cilindros / Ordem de ignição</b>	4 / 1-3-4-2
<b>Configuração</b>	Em linha – 16 válvulas - DOHC
<b>Diâmetro / Curso / Cilindrada</b>	95,8 mm / 104 mm / 2988 cc
<b>Relação volumétrica de compressão</b>	12,5:1
<b>ECU</b>	Magneti Marelli

Fonte: Elaborada pelos autores



**Figura 3:** Motor FPT F1C-GNV utilizado como base do motor protótipo (Fonte: Elaborada pelos autores)



**Figura 4:** Motor protótipo modificado e instalado durante realização de testes (Fonte: Elaborada pelos autores)

### 1.1 Testes motor protótipo

Foram realizados testes com o motor protótipo primeiramente no modo *baseline* (motor FPT F1C-GNV funcionando com GNV e gasolina no modo *recovery*). Além disso, o uso de biometano como substituto direto do GNV está sendo investigado no motor base. Modificações no motor protótipo foram realizadas de acordo com as definições das atividades anteriores. Atividades de calibração do motor estão em andamento para atingir alta eficiência de conversão de combustível com etanol. Análises completas da combustão (fases da combustão, *knock*, pressão máxima etc.) utilizando o módulo da AVL e de desempenho e emissões utilizando toda instrumentação do Banco de Ensaio de Motores da UNIFEI é necessária. Com a calibração base do mapa completo do motor com etanol (condições estacionárias), o motor protótipo será testado nos laboratórios de motores da MAHLE em Jundiaí para checar funcionamento e calibração em regimes transientes, ciclos de homologação e emissões.

## 1.2 Análises, simulações, tratamento de dados e reports

Nesta atividade foram realizadas as análises com os dados experimentais obtidos, alimentando simulações. As metodologias para o tratamento dos dados experimentais já são conhecidas pela equipe do projeto (com base nas publicações recentes e parcerias anteriores com projeto Rota 2030 anterior).

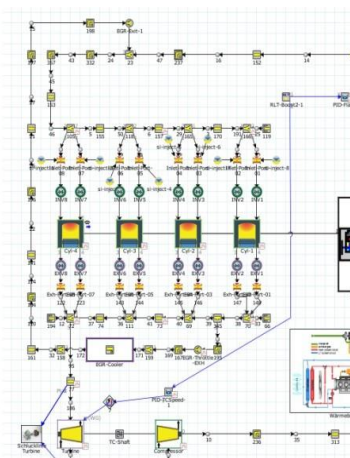
No trabalho foi avaliada a pegada de carbono que faz parte de um ACV com os combustíveis selecionados, do poço à roda, em regimes de condução relevantes e adequados à operação do motor protótipo. Para tanto, os regimes de operação são simulados via software *GT-Suite*, onde é possível, a partir dos mapas de injeção e características físicas do motor e do veículo, simular ciclos de condução e obter as emissões de poluentes esperadas para a operação do veículo.

O *GT-Suite* também permite a simulação da viabilidade de hibridização, ou seja, a partir do veículo existente com o motor protótipo, é possível adicionar configurações com arquitetura de transmissão híbridas (com motores elétricos e baterias) e realizar a simulação de ciclos de condução e obter as emissões de poluentes esperadas. Por fim, os dados obtidos das emissões reais do motor na bancada, dados obtidos a partir da simulação de emissões com o *GT-Suite*, tanto para o veículo com somente o motor protótipo e com hibridização, foram reunidos e utilizados para a avaliação da pegada de carbono, avaliação essa que será feita pelo software *SimaPro*.

## 2. RESULTADOS

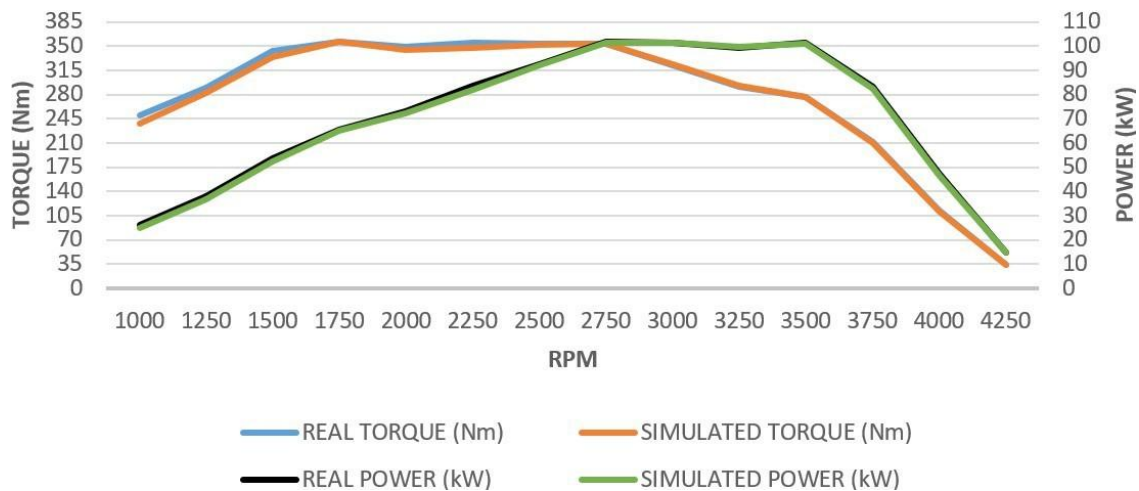
### 2.1 Simulações no GT-Suite

Para iniciar o trabalho, diversos dados experimentais foram selecionados, para o desenvolvimento, calibração e validação do modelo matemático do motor no software *GT-Suite*. A Figura 5 apresenta o modelo do motor enquanto a Figura 6 apresenta comparativo da simulação com as curvas características reais (obtidas experimentalmente) do motor funcionando com GNV. pode-se observar que as curvas se assemelham positivamente, com desvios na faixa de 0 a 2% nos valores simulados.



**Figura 5:** Modelo matemático no software *GT-Suite* do motor protótipo (Fonte: elaborada pelos autores)

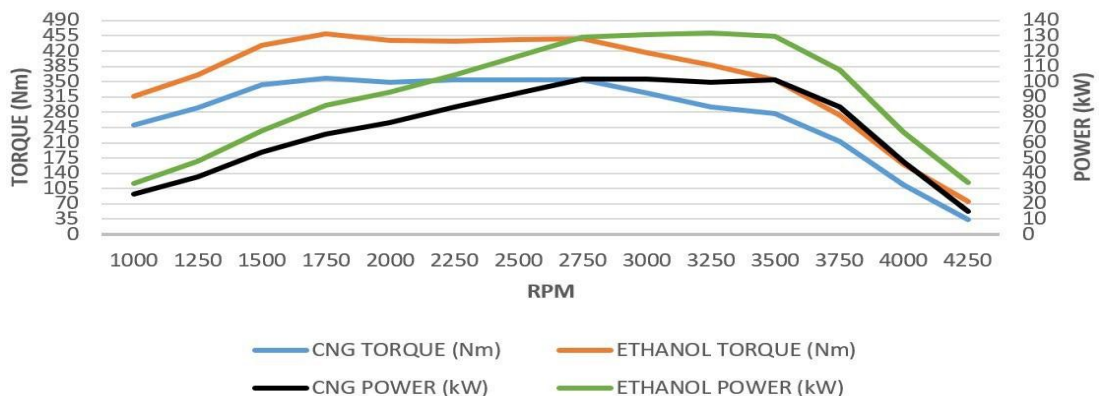
Após a validação das curvas de torque e potência, a equipe de simulação se concentrou em realizar diversas otimizações sob diferentes condições de carga e combustíveis, como etanol E100.



**Figura 6:** Comparativo das curvas de torque e potência reais com a simulação funcionando com GNV (baseline) (Fonte: Elaborada pelos autores)

## 2.2 Simulações no GT-Suite

Com o objetivo de analisar brevemente os efeitos de mudanças como relação volumétrica de compressão, pressão do turbocompressor, tempo de ignição e outros fatores no desempenho do motor F1C, as curvas de torque e potência (Figura 7) foram obtidas através de simulação alterando o combustível no modelo e alguns parâmetros de calibração. Uma análise preliminar que foi comprovada nos testes iniciais com etanol, mostra potencial de aumento de desempenho (torque e potência). É importante ressaltar que várias modificações no motor protótipo já foram consideradas e/ou realizadas experimentalmente para alimentar o modelo e validação.



**Figura 7:** Comparativo das curvas de torque e potência otimizadas da simulação funcionando com GNV e etanol (Fonte: Elaborada pelos autores).

## 2.3 Análise CFD:

As análises CFD foram desenvolvidas a partir de dois pontos:

- 1) Simulação de spray do injetor de etanol
- 2) Simulação do motor F1C

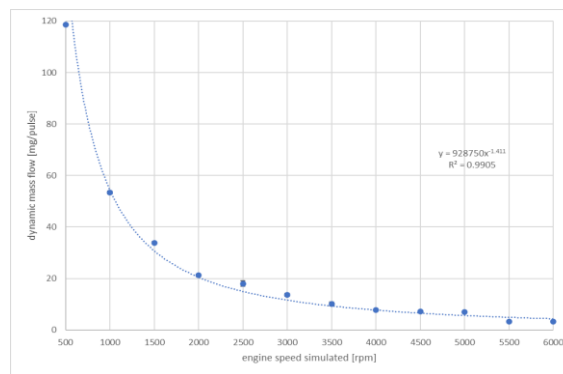
Primeiramente, foi utilizado o software Forte que está disponível na plataforma ANSYS. O software ANSYS foi escolhido pois a universidade UNIFEI dispõe de uma licença vitalícia. A geometria do injetor escolhido e considerado para simulação definida considerando os modelos matemáticos e estimativas de vazão e posicionamento. Foram obtidas curvas características como curva de

penetração do spray, variação do SMD (Sauter Mean Diameter), velocidade no decorrer no tempo de injeção e distribuição do spray nesta geometria.

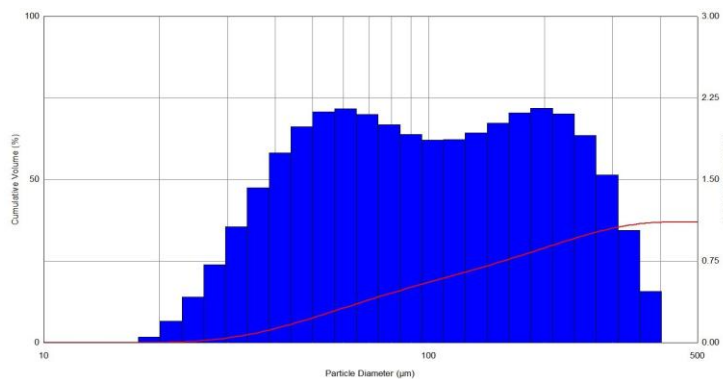
Com a colaboração do INPE/Cachoeira Paulista, foram realizados testes experimentais de pulverização, dados sobre vazões mássicas estáticas e dinâmicas, distribuição de gotas e ângulos de pulverização. Com esses dados foi feito o trabalho de comparação com o modelo para o aperfeiçoamento do mesmo. A apresentação destes resultados estão nas Figuras 8 a 14.



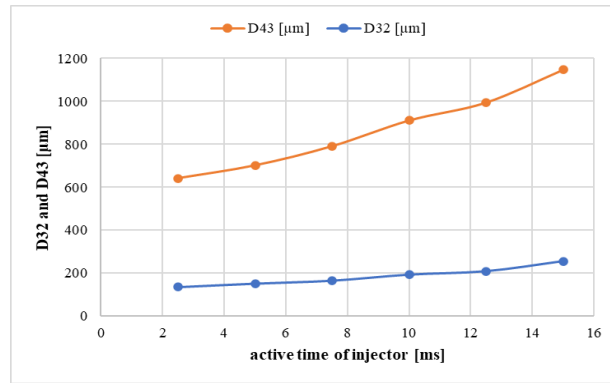
**Figura 8:** Medições experimentais de fluxo de massa estático e dinâmico de spray de etanol (Fonte: Elaborada pelos autores)



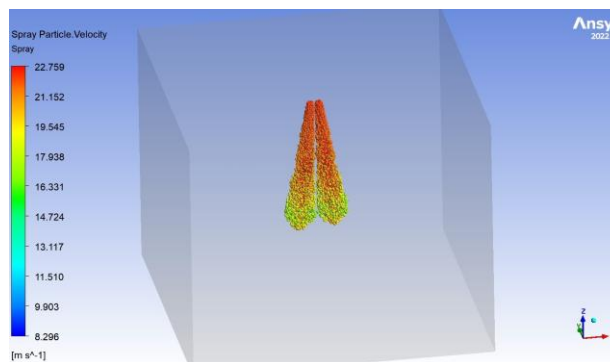
**Figura 9:** Resultados do fluxo dinâmico considerando diferentes tempos ativos do injetor simulando algumas rotações do motor (Fonte: Elaborada pelos autores)



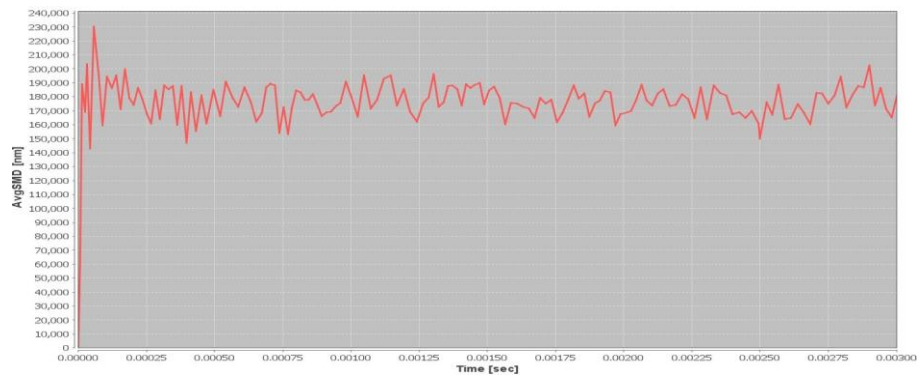
**Figura 10:** Distribuição medida do tamanho das gotas (Fonte: Elaborada pelos autores).



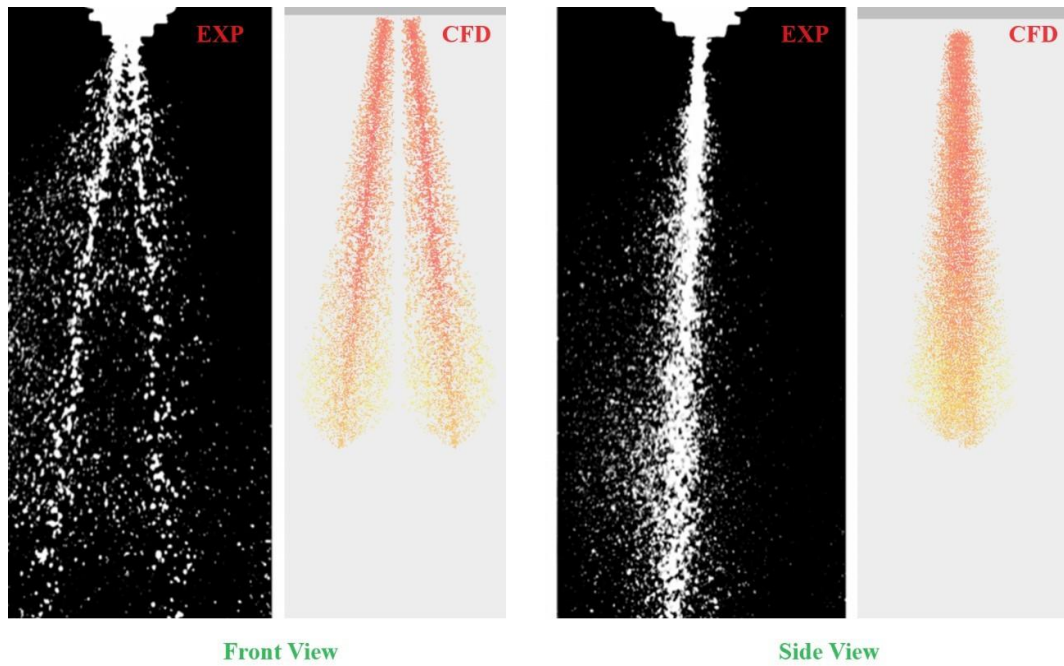
**Figura 11:** Comparação do Diâmetro Médio Sauter (D32) e D43 considerando algum tempo ativo do injetor (Fonte: Elaborada pelos autores)



**Figura 12:** Análise CFD de spray de etanol em ANSYS, representação 3D da velocidade das partículas (Fonte: Elaborada pelos autores)

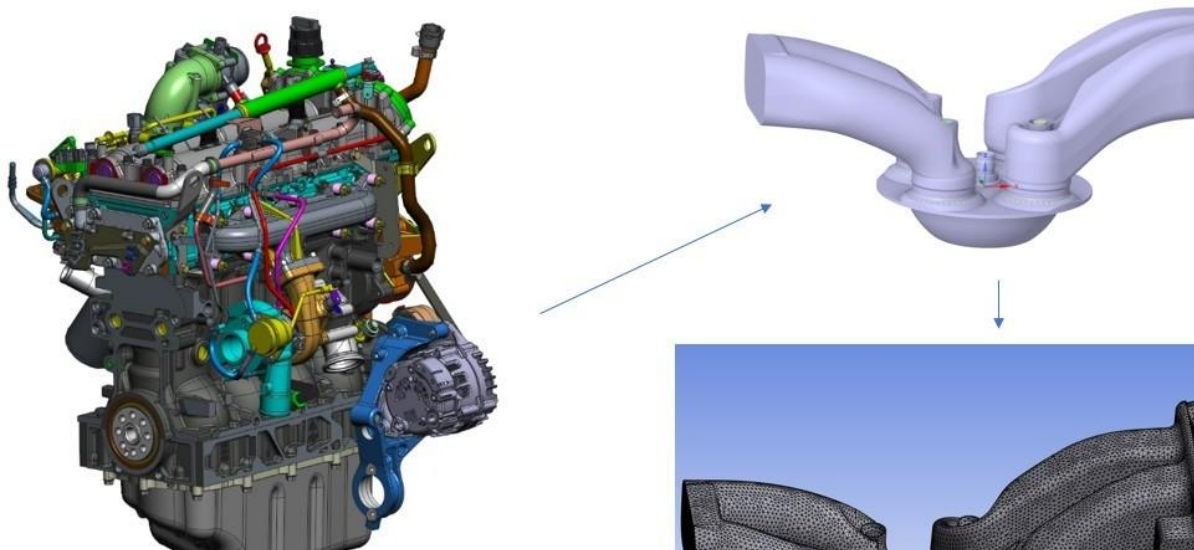


**Figura 13:** Variação do SMD ao longo do tempo obtida por simulações de CFD (Fonte: Elaborada pelos autores)



**Figura 14:** Comparação 3D de resultados experimentais (EXP) e CFD da distribuição de gotas de pulverização de etanol (Fonte: Elaborada pelos autores)

Na sequência, foram realizadas simulações CFD para melhor posicionamento dos injetores no coletor de admissão buscando maior homogeneidade da mistura e aumento de desempenho e redução de emissões. Este trabalho conta com realimentação de dados experimentais obtidos durante os testes. A Figura 15 apresenta a obtenção da geometria do motor (malha) que está sendo utilizada nas simulações.



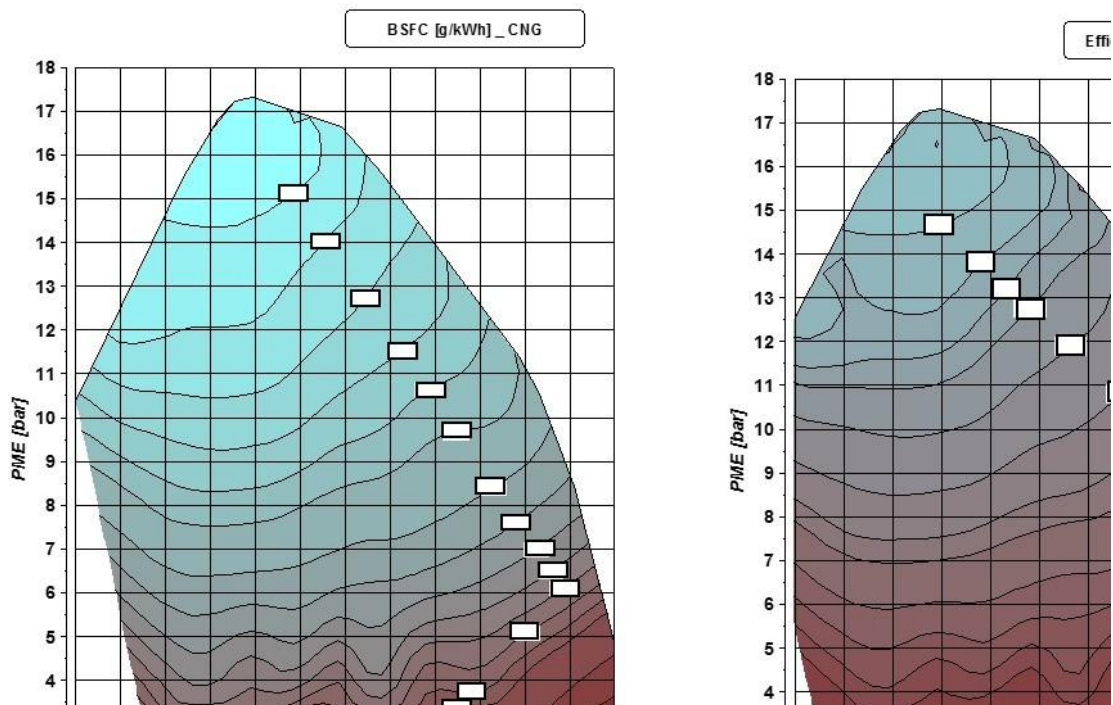
**Figura 15:** Apresentação do volume interno do motor com malha obtido do modelo CAD do protótipo para análise da injeção de etanol. (Fonte: Elaborada pelos autores)

## 2.4 Resultados experimentais preliminares

As Figuras 16 e 17 apresentam resultados preliminares do motor modificado com GNV de BSFC/eficiência e emissões de poluentes, respectivamente. Já as Figuras 18 e 19 apresentam os mesmos dados preliminares do motor modificado funcionando com etanol

O motor protótipo modificado funcionando com a mesma relação de compressão (valor confidencial) para ambos os combustíveis (GNV e etanol) apresentou consumo específico de combustível similares, sendo a eficiência para GNV em torno de 9,7 MJ//kWh entre PME de 15 a 17 bar e rotações de 1700 a 2000 rpm, enquanto o motor funcionando a etanol apresentou até agora eficiência em torno de 9,3 MJ//kWh para PME de 14 bar e rotação de 2000 rpm.

Considerando as emissões de poluentes, o motor a etanol apresentou níveis similares ou ligeiramente inferiores de emissões pré-catalizador em comparação com o motor funcionando com GNV. Adicionalmente, considerando as emissões pós catalisador, o motor continua atendendo a legislação Euro VI mesmo com as modificações até agora feitas.



**Figura 16:** BSFC e eficiência motor protótipo GNV  
(Fonte: Elaborada pelos autores)

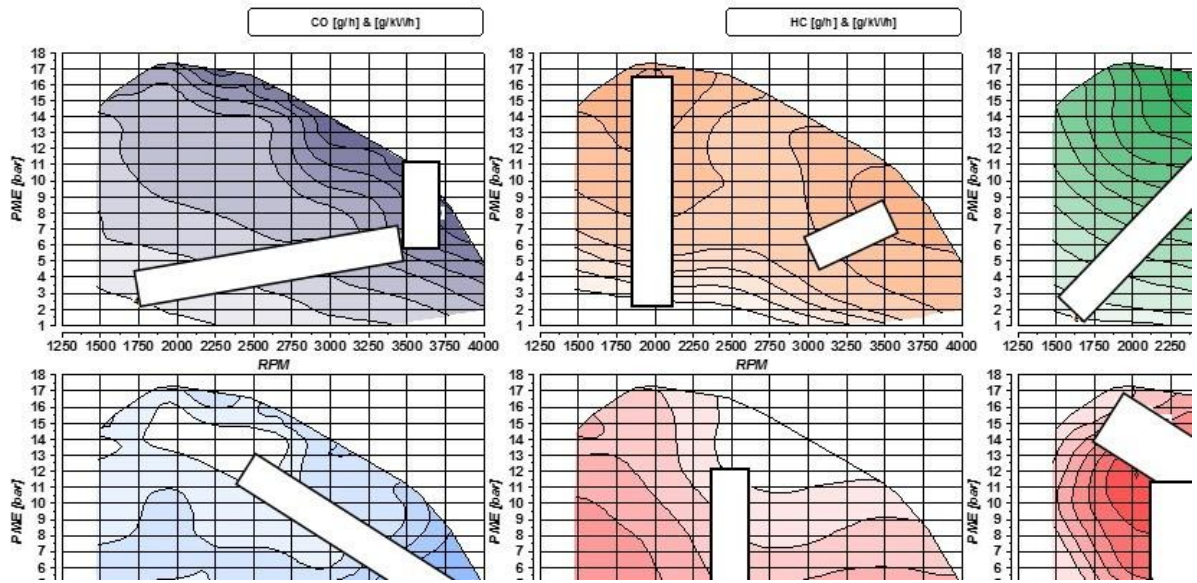


Figura 17: Emissões motor protótipo GNV (Fonte: Elaborada pelos autores).

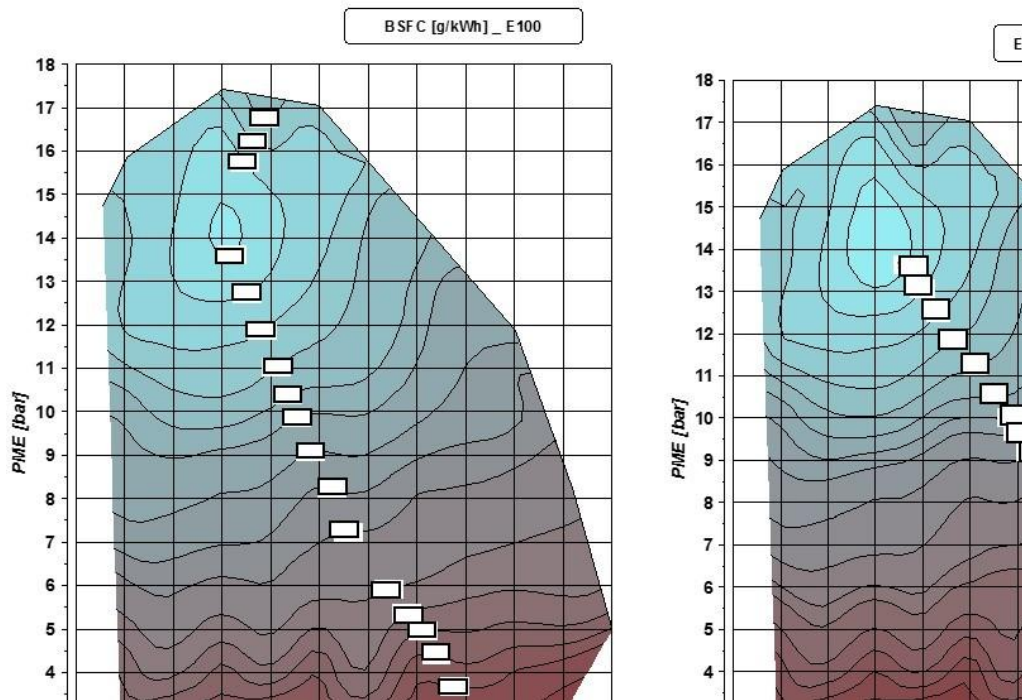
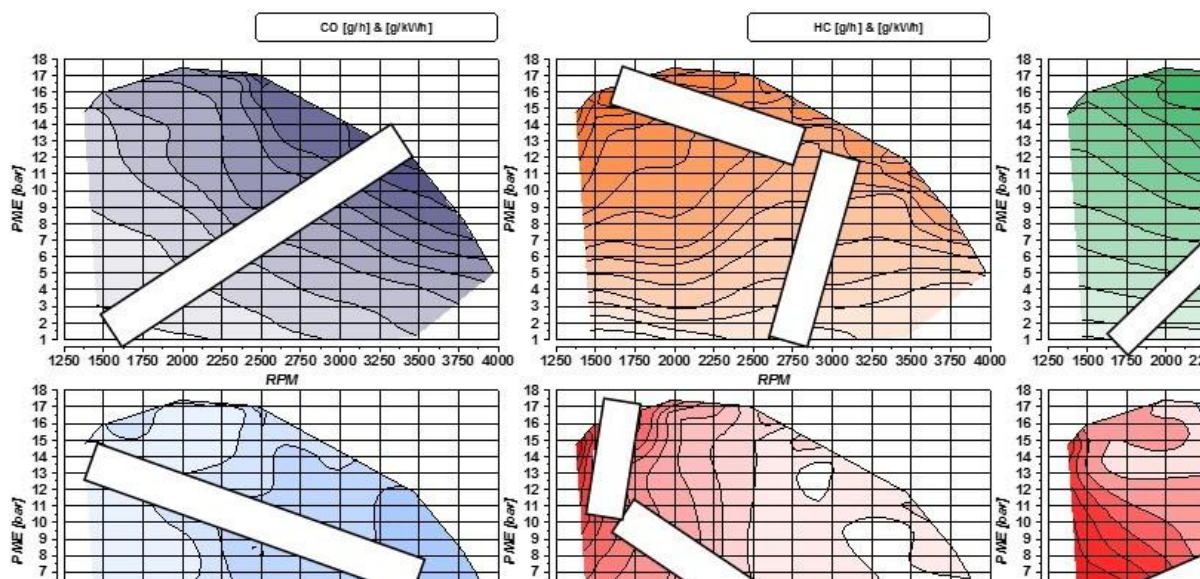


Figura 18: BSFC e eficiência motor protótipo a etanol (Fonte: Elaborada pelos autores).



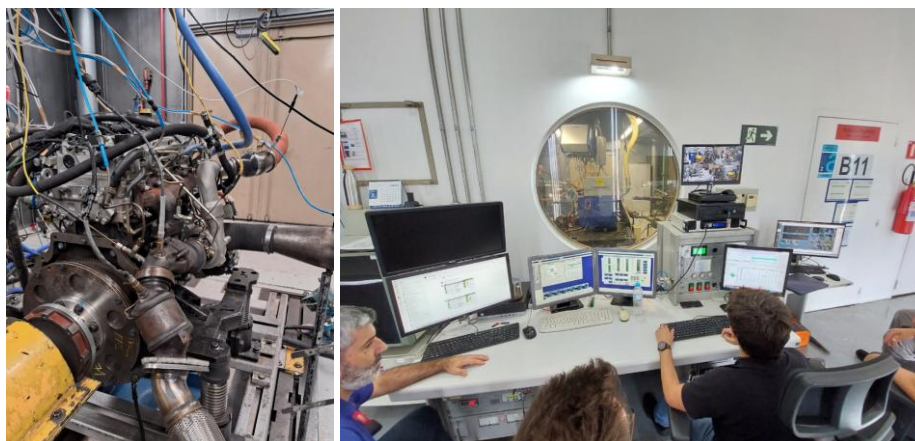
**Figura 19:** Emissões motor protótipo etanol (Fonte: Elaborada pelos autores)

Além das análises de consumo específico e emissões apresentadas nos mapas experimentais, a análise preliminar obtida por meio de testes preliminares e simulações computacionais ainda indica que o motor protótipo, quando operando com etanol, tem potencial de atingir níveis de classificação de eficiência energética (MJ/km) inferiores do que durante sua operação com GNV (-49,3%) e também menor do que o modelo FPT F1C-Ciclo Diesel (-3,9%), tanto para o ciclo urbano de homologação de veículos (*urban cycle*) quanto para o ciclo em autoestradas (*highway cycle*). Os resultados obtidos (Figura 20) são baseados nos ensaios experimentais (diesel e GNV) e em simulação computacional realimentadas (para o caso do etanol), seguindo os procedimentos estabelecidos por normas técnicas e as classificações determinadas pela Portaria n.º 377, de 29 de setembro de 2011.

Comparação entre os motores F1 operando com Diesel, GNV e Etanol					
Motor		F1A 2.3 Diesel	F1C 3.0 CNG	F1C 3.0 Ethanol	F1C 3.0 Ethanol F1A 2.3 Diesel
Teste	Unidade				Variação %
Consumo no ciclo urbano	km/l	10,90	9,99	6,3	72,7%
Consumo no ciclo em autoestrada	km/l	13,40	12,28	7,8	72,7%
Consumo de combustível de acordo com a categoria do motor (55%+45%)	km/l	11,899	10,907	6,889	72,7%

**Figura 20:** Comparação da classificação de eficiência energética do motor F1C-Etanol (simulado) com os motores análogos operando com GNV e Diesel (Fonte: Elaborada pelos autores).

Foram conduzidos ensaios completos de emissões no laboratório de motores da MAHLE, em Jundiaí, permitindo avaliar o comportamento do protótipo em condições controladas e representativas de operação real. Os testes abrangeram medições pré-catalisador e pós-catalisador, incluindo os principais poluentes regulados, como monóxido de carbono, hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio, metano, amônia, material particulado (PM) e número de partículas (PN). A realização dessas avaliações possibilitou verificar o desempenho do sistema de pós-tratamento e a efetividade das estratégias de combustão e calibração empregadas. De forma geral, os ensaios demonstraram que o conjunto bi-fuel apresenta potencial para operar com baixos níveis de emissões, reforçando a robustez do desenvolvimento e sua aderência às metas de redução de impacto ambiental no setor de transporte.



**Figura 21:** Testes de emissões realizados em dinamômetros na MAHLE (Fonte: Elaborada pelos autores).

Com a validação de emissões concluída, o projeto seguiu para a construção de um veículo demonstrador, 100% funcional, de forma a demonstrar a viabilidade e do conceito desenvolvido.



**Figura 22:** Veículo demonstrador funcional resultante do projeto (Fonte: Elaborada pelos autores).

O veículo demonstrador também desempenhou um papel importante no engajamento de outros agentes da cadeia logística e energética. Um exemplo relevante é a JBS, que tem avançado em parcerias estratégicas para promover transporte urbano de cargas de baixa emissão, como evidenciado na iniciativa conjunta entre Seara e IVECO para reduzir em até 95% as emissões nas operações urbanas por meio de tecnologias mais limpas. Além de ser uma das maiores embarcadoras do país, a JBS também atua na produção de biometano, o que reforça a lógica de fechar o ciclo da economia circular ao utilizar o combustível renovável gerado a partir de seus próprios resíduos para abastecer parte de sua frota. Assim, o uso do Daily Multifuel e de soluções bi-fuel se encaixa perfeitamente na estratégia da empresa, unindo redução de emissões, valorização de resíduos e fortalecimento de uma cadeia logística sustentável [3].

## CONCLUSÃO

O desenvolvimento do motor bi-fuel a etanol e biometano demonstra de forma concreta o potencial de soluções baseadas em biocombustíveis renováveis para acelerar a descarbonização da mobilidade no Brasil. A combinação entre modelagem avançada, simulações computacionais, validação experimental e ensaios em ambiente operacional permitiu estabelecer uma base técnica sólida para a adoção dessa tecnologia em veículos comerciais leves, um segmento de grande relevância para a logística urbana e para o transporte de passageiros.

A construção do veículo demonstrador e o engajamento de parceiros industriais reforçam a maturidade do conceito e evidenciam sua aderência às demandas atuais de sustentabilidade, economia circular e redução de emissões. Além disso, o projeto fortalece a integração entre universidade e indústria, contribuindo para a geração de conhecimento aplicado, formação de especialistas e avanço da infraestrutura nacional em pesquisa automotiva e energética.

Assim, o trabalho não apenas comprova a viabilidade técnica da solução bi-fuel, mas também aponta um caminho promissor para ampliar o uso de combustíveis renováveis, apoiar a transição energética do setor de transportes e fomentar o desenvolvimento tecnológico local, criando bases concretas para uma mobilidade mais limpa, eficiente e alinhada aos desafios ambientais e econômicos do país.

## REFERÊNCIAS

- [1] MPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Intensidade de carbono das fontes de energia no transporte rodoviário. Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-708/topico-770/NT-EPE-DPG-SDB-2025-03\\_Intensidade\\_de\\_Carbono\\_Transporte\\_Rodoviario.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-708/topico-770/NT-EPE-DPG-SDB-2025-03_Intensidade_de_Carbono_Transporte_Rodoviario.pdf)>. Acesso em: 8 abr. 2026.
- [2] SINDIPEÇAS. Frota circulante. São Paulo, 2024. Disponível em: <[https://sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2024/Frota\\_Circulante.pdf](https://sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2024/Frota_Circulante.pdf)>. Acesso em: 8 abr. 2026.
- [3] JBS. *Seara e IVECO iniciam parceria para promover transporte urbano de cargas de baixa emissão no Brasil*. 2025. Disponível em: <<https://mediaroom.jbs.com.br/noticia/seara-e-iveco-iniciam-parceria-para-promover-transporte-urbano-de-cargas-de-baixa-emissao-no-brasil>>. Acesso em: 8 abr. 2026