

# DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA EXPERIMENTAL PARA TESTES EM SISTEMAS DE ULTRA-ALTA PRESSÃO DIESEL OPERANDO COM ETANOL

Konrad Souza Friedrich<sup>1</sup>; Rafael Hauckewitz Todaro<sup>2</sup>; Antonio Luiz Pacífico<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno de Iniciação Científica do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);

<sup>2</sup> Professor do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

**Resumo.** *Atualmente, são diversas as iniciativas de redução das emissões de gases poluentes e de efeito estufa que objetivam minimizar os efeitos inerentes ao aquecimento global e promover a melhoria da qualidade do ar em grandes metrópoles. Nesse contexto, os automóveis têm considerável parcela de contribuição, fato que torna imprescindível a busca por soluções sustentáveis para o setor de transportes. Ciente de que em certas circunstâncias o impacto do uso desses propelentes pode ser considerado nulo, é imperativo considerar o uso de biocombustíveis como fontes de energia de motores de combustão interna. Frente ao exposto, o trabalho está envolvido com o desenvolvimento de uma bancada experimental dedicada à reprodução de um sistema de ultra-alta pressão de injeção operando com etanol hidratado, contemplando eventos de atomização. A solução proposta é capaz de auxiliar pesquisadores na condução de experimentos avançados e, concomitantemente, tem viés didático, isto é, pode ser utilizada para fins instrucionais. Testes em ambiente laboratorial mostraram que a bancada permite que os eventos de nebulização de etanol ocorram até 1000 bar de pressão de injeção.*

## Introdução

Nos últimos anos, o debate em torno das mudanças climáticas e da sustentabilidade tem sido crucial para a construção de uma ampla conscientização global sobre os impactos que as atividades antrópicas exercem no planeta, o que justifica a busca por soluções que possam reduzir a emissão de gases poluentes em diversos setores (CÁRDENAS, 2016; BALDI, BENGTTSSON, et al., 2023). Em especial para o setor de transportes, torna-se evidente a necessidade de encontrar soluções que minimizem o impacto ambiental produzido por sistemas de propulsão veicular e que prometam maiores eficiências de conversão de energia, se comparado aos níveis que são encontrados em veículos automotores de passeio. Tal necessidade decorre do fato de motores de combustão interna, quando operados com combustíveis fósseis, apresentarem níveis de emissão de poluentes não mais aceitáveis (REITZ, 2019; TOWOJU e ISHOLA, 2020; MORFELDT, KURLAND, et al., 2021), afirmação que está totalmente alinhada com as premissas do programa federal Rota2030 (Lei N°13.755, de 10 de dezembro de 2018).

Por essa razão, uma das alternativas para abordar o problema em questão é a utilização de combustíveis alternativos como propelentes de motores de combustão interna operados com sistemas de ultra-alta pressão de injeção (LI, 2021; SANTOS, 2021; ONORATI, 2022). É importante salientar que estudos recentes mostraram que a combinação entre sistemas de injeção direta e a estratégia de injeção de combustível a ultra-alta pressão (> 500 MPa; UHP, sigla em inglês) promete efetividade no atendimento à atual demanda por minimização das emissões, e o faz via aprimoramento do processo de formação da mistura ar-combustível. No entanto, para otimizar tal processo é preciso ter entendimento avançado sobre o mecanismo de atomização do líquido combustível e a maneira com a qual ocorre a interação entre os fluidos participantes da combustão (LEE e PARK, 2014; JIA, LI, et al., 2016; YU, 2019; MEDINA, BAUTISTA, et al., 2021). Contudo, para ter bom discernimento sobre o processo de formação da mistura ar-combustível dentro dos cilindros, é preciso, em primeira instância, dispor de um aparato experimental exclusivamente dedicado à realização de eventos de atomização em regime UHP.

Frente ao exposto, este trabalho objetiva desenvolver um modelo de bancada experimental que atenda usuários interessados em investigar o sistema de ultra-alta pressão de injeção diesel operando com etanol, seja para qual for a finalidade específica do pesquisador. A propósito, as

expectativas descritas por Wang (2019) justificam a apresentação do presente projeto. Por fim, vale destacar que não há soluções similares, comercialmente disponíveis, para simulação de eventos de injeção em níveis de alta pressão de injeção em ambiente laboratorial, tampouco um aparato experimental que permita analisar a compatibilidade de periféricos e o comportamento da pressão de combustível quando o sistema é operado com etanol hidratado.

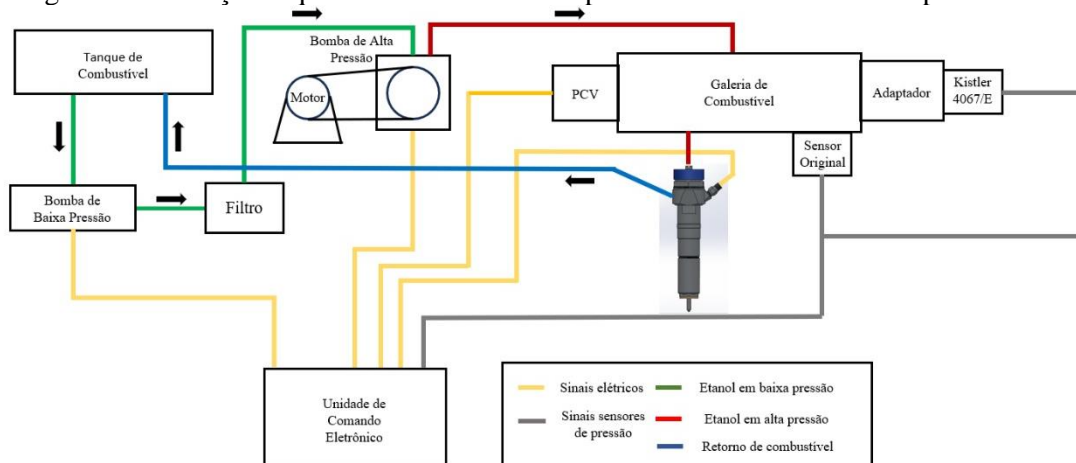
## Materiais e Métodos

Conforme o conteúdo apresentado na introdução deste artigo, há a expectativa de que maiores pressões de injeção combinadas com o uso de biocombustíveis seja uma combinação promissora para o aumento da eficiência de MCIs e redução de emissões veiculares. Por isso, devido à inexistência de um aparato experimental que permita conduzir tais eventos de nebulização, a metodologia do trabalho envolve duas principais etapas, a saber:

- proposição de um *layout* de bancada experimental para viabilizar campanhas de testes de atomização de etanol em regime de ultra-alta pressão de injeção, incluindo a montagem dos equipamentos;
- desenvolvimento de um painel de controle para operacionalização da bancada experimental em ambiente laboratorial.

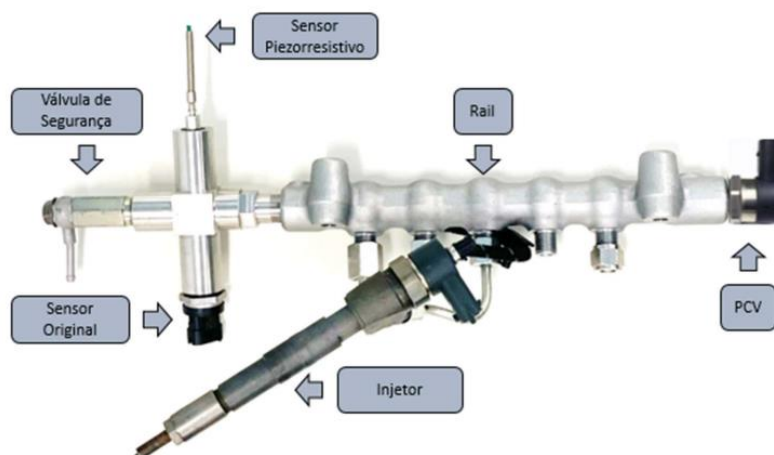
Tratando-se da primeira etapa, a bancada experimental foi construída a partir da seguinte premissa: o combustível é armazenado em um reservatório e, graças à atuação de uma bomba elétrica de baixa pressão, é transferido para uma bomba mecânica de alta pressão, por sua vez acionada por um motor elétrico controlado por um inversor de frequência. Ao ser altamente pressurizado, o combustível passa a ocupar as dependências de uma galeria (*rail*), elemento designado a manter o etanol em condição estanque, direcioná-lo ao injetor para atomização, e acomodar um dispositivo de segurança e toda a instrumentação necessária para coletar dados de pressão e temperatura do fluido em cada evento de injeção. A Figura 1 mostra uma ilustração esquemática da bancada para operar nessas condições. As bombas de combustível de baixa (3,0 bar) e alta (até 3000 bar) pressão atendem pelas especificações comerciais Bosch F.000.TE1.3X9 e Bosch 0.445.010.463 CR/CP1H3, respectivamente. O motor elétrico que aciona a bomba de alta pressão é trifásico, de 3 cv, com rotação máxima de 1700 rpm à 60 Hz, com número WEG-13-6420, e é controlado pelo inversor de frequência WEG CFW080330T2024PSZ. O último é conectado à bomba de alta pressão por um acoplamento. A galeria de combustível utilizada é a Denso SMO95600-6610 07F36222, o sensor que monitora a pressão do fluido armazenado e a PCV que controla esse parâmetro atendem pela especificação Sensata 96.753.303.80 e Bosch 0.281.006.074, respectivamente. O injetor utilizado é o modelo Bosch 0445.110.682 – CRI2-16. A Figura 2 exhibe a solução encontrada para acomodar os últimos periféricos mencionados no *rail*.

Figura 1 - Ilustração esquemática da bancada experimental em fase de testes preliminares.



Fonte: Autores.

Figura 2 - Instalação do adaptador, e os respectivos periféricos, em uma galeria de combustível em momento pré-testes exploratórios



Fonte: Autores.

Em relação à última etapa, é preciso destacar que foi utilizado como referência um sistema de controle previamente disponibilizado pela Divisão de Motores e Veículos (DMV) do Instituto Mauá de Tecnologia. Ele atua segundo um algoritmo incorporado a um microcontrolador ESP32. O código prevê a lógica de controle preliminar, básica, sobre os dispositivos e periféricos da bancada, o que inclui o controle de pressão e a operação dos injetores. Para conhecimento, a Tabela 1 apresenta os principais sinais de entrada (E) e saída (S) processados pelo sistema de controle. A estratégia de controle principal apresentada acima ocorre em malha fechada, diferentemente do controle de vazão de entrada na bomba de alta pressão pelo acionamento da válvula SCV, por sua vez realizado em malha aberta, via potenciômetro (vide E2 e S1). Em relação ao acionamento do injetor diesel instalado na bancada, o mesmo é acionado com tempo e frequência definidos em função do nível de pressão relativa da galeria (S3), que deve ser maior do que a pressão mínima de acionamento definida pelo fabricante e inserida no algoritmo de controle. Contudo, quando a pressão da galeria é maior que a pressão de segurança, variável definida na programação, o tempo e a frequência de injeção dobram para que a operação em regime de UHP se mantenha segura. Ademais, dado que o microcontrolador não tem capacidade de conduzir altos níveis de corrente e tensão, foi utilizado um *driver* de corrente S070 Pi Innovo, comercial. O *driver* é formado por placas que utilizam transistores para acionar as válvulas solenoides de acordo com os sinais enviados pelo ESP32.

Tabela 1 – Sinais principais do sistema de controle da bancada experimental.

Sinal	Descrição
E1	Entrada de tensão do sensor de pressão da galeria de alta pressão.
E2	Entrada de tensão, ajustada via potenciômetro, proporcional à vazão desejada através da válvula solenoide de controle da entrada de combustível na bomba de alta pressão.
E3	Entrada de tensão, ajustada via potenciômetro, proporcional ao <i>setpoint</i> de pressão na galeria de alta pressão;
S1	Saída PWM para atuação da válvula solenoide de controle de vazão de entrada de combustível na bomba de alta pressão
S2	Saída PWM para atuação da válvula solenoide de controle de vazão de retorno do combustível da galeria de alta pressão para o tanque de combustível;
S3	Saída PWM para atuação dos injetores de combustível através do driver de corrente S070 PI Innovo.

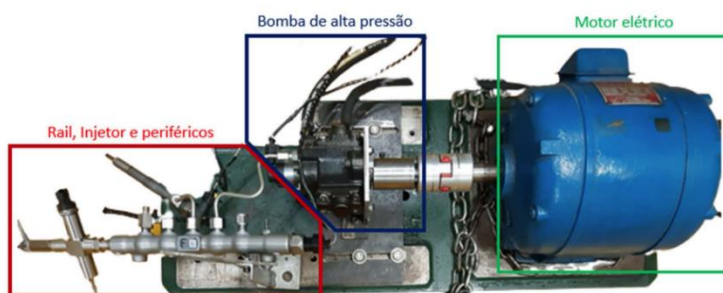
Fonte: Autores.

Em complemento ao sistema de controle acima descrito, será contribuição deste trabalho a fabricação de um painel de controle que contenha displays LCDs 16x2 com controladores HD44780 para exibição de variáveis em tempo real, potenciômetros de resistência de 100kOhms para ajuste de parâmetros e uma chave tipo *on/off* para acionamento do injetor. Tais componentes operam com tensão elétrica na faixa de 3 a 5 V.

## Resultados e Discussão

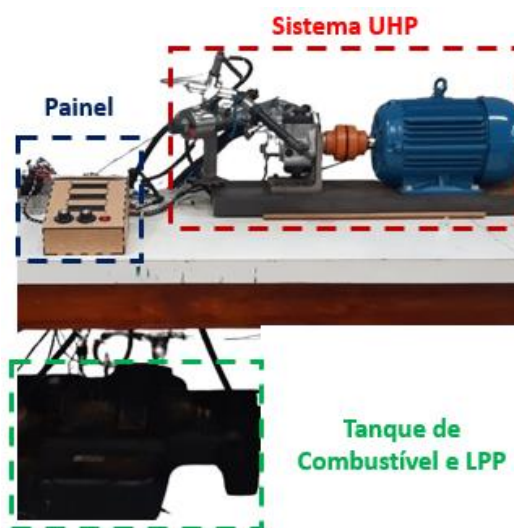
A Figura 3 mostra o aparato experimental utilizado para acomodar os dispositivos que operam em alta pressão, já devidamente montado e instrumentado, construído segundo a descrição apresentada na seção anterior. Nele, pode-se observar a presença do motor elétrico dedicado ao acionamento da bomba de combustível de alta pressão, bem como o *rail* equipado com um injetor diesel e periféricos. A Figura 4 mostra a solução encontrada para manter a bancada em uma altura adequada ao uso e contemplar um tanque de combustível para armazenar o etanol e coletar o combustível oriundo das linhas de retorno. Demais equipamentos utilizados junto à bancada são identificados na Figura 4. A Figura 5 exhibe a face de leitura do painel concebido para monitorar as variáveis importantes para a bancada e indica a função de cada elemento nele contido. Este sistema exhibe dados operacionais em tempo real e atua tanto no controle exercido pelos potenciômetros integrados ao circuito quanto no acionamento do injetor.

Figura 3 – Primeira versão da bancada experimental (parte de alta pressão).



Fonte: Autores.

Figura 4 – Instalação da bancada e disposição dos equipamentos utilizados para viabilizar a pressurização do etanol e o controle de pressão na galeria.



Fonte: Autores.

Figura 5 – Painel de controle.



Fonte: Autores.

A Figura 5 mostra ainda um registro da utilização do painel de controle integrado à bancada. Nela, pode-se notar todo o sistema em funcionamento e os *displays* exibindo o respectivo ponto de operação da bancada referente à pressão média da galeria igual a 1000 bar. Nessa condição, a SCV foi controlada com *duty cycle* de 13,28 %, a PCV está sendo acionada com *duty cycle* de 8,00 %, a pressão de segurança do sistema foi admitida como 1200 bar e o injetor foi energizado com frequência de 133,3 Hz durante 1,0 ms (condição equivalente de uma atuação de quatro injetores atuando em um motor de combustão interna aspirado mantido a 2.000 rpm). Durante os testes, todo o sistema se apresentou estanque e sem avarias.

## Conclusões

A partir dos resultados apresentados, conclui-se que a solução proposta contempla uma bancada experimental robusta e capaz de permitir a reprodução de eventos de injeção de etanol em diversas condições. Isso significa que o sistema pode ser utilizado para analisar o comportamento da pressão de combustível nas dependências do *rail*, considerando (ou não) a abertura do injetor e estudar a influência da dinâmica das válvulas e demais periféricos no escoamento. Além disso, a bancada está pronta para ser utilizada em testes experimentais de caracterização estrutural de plumas de combustível geradas com diferença de pressão relativa de até 1.000 bar. Por isso, trabalhos futuros poderão ter tema definido a partir da referida utilidade da bancada.

## Nomenclatura

DC – Duty cycle  
HPP – High pressure pump  
LPP – Low pressure pump  
MCI – Motor de combustão interna.  
SCV – Suction control valve  
PCV – Pressure control valve  
PWM – Pulse Width Modulation  
UHP – Ultra-high pressure

## Referências Bibliográficas

- BALDI, F.; BENGTSSON, S.; ANDERSSON, K. The influence of propulsion system design on the carbon footprint of different marine fuels. Low Carbon Shipping Conference, jan. 2013.
- CÁRDENAS, M et al. Performance and pollutant emissions from transient operation of a common rail diesel engine fueled with different biodiesel fuels. v. 185, p. 743–762, 1 dez. 2016.
- CATANIA, A. E. et al. Experimental Investigation of Dynamics Effects on Multiple-Injection Common Rail System Performance. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, v. 130, n. 3, p. 032806, 2008.
- JIA, T. et al. Effects of ultra-high injection pressure on penetration characteristics of diesel spray and a two-mode leading edge shock wave. Experimental Thermal and Fluid Science, n. 79, p. 126-133, jul. 2016.
- LEE, S; PARK, S. Spray atomization characteristics of a GDI injector equipped. **Fuel**, p. 50-59, 2014.
- LI, X. et al. Oxy-fuel combustion for carbon capture and storage in internal combustion engines – A review. International Journal of Energy Research, 18 ago. 2021.
- MEDINA, M. et al. The effects of injector geometry and operating conditions on spray mass, momentum and development using high-pressure gasoline. Fuel, n. 294, 2021.
- YU, Y. Experimental study on effects of ethanol-diesel fuel blended on spray. Energy, n. 186, Julho 2019.
- MORFELDT, J.; DAVIDSSON KURLAND, S.; JOHANSSON, D. J. A. Carbon footprint impacts of banning cars with internal combustion engines. Transportation Research Part D, v. 95, 1 jun. 2021.
- ONORATI, A. et al. The role of hydrogen for future internal combustion engines. International Journal of Engine Research, v. 23, n. 4, p. 529–540, 19 mar. 2022.b
- REITZ, R. D. et al. IJER editorial: The future of the internal combustion engine. International Journal of Engine Research, v. 21, n. 1, p. 146808741987799, 24 set. 2019.
- SANTOS, N.D.S. et al. Internal combustion engines and biofuels: Examining why this robust combination should not be ignored for future sustainable transportation. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 148, p. 111292, set. 2021.
- TOWOJU, O. A.; ISHOLA, F. A. A case for the internal combustion engine powered vehicle. Energy Reports, v. 6, p. 315–321, fev. 2020.
- WANG, D. et al. Pressure Control Strategy and Simulation of High Pressure Common Rail System. Journal of Physics: Conference Series, v. 1624, n. 2, p. 022061, 1 out. 2020.
- WANG, L. et al. High injection pressure diesel sprays from a piezoelectric fuel injector. Applied Thermal Engineering, v. 152, p. 807–824, 1 abr. 2019.