

Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Engenharia Automotiva

# **Estudo dos parâmetros de medição dos fluxos de ar, água e combustível, para bancadas de ensaio de motores de combustão interna**

Autor: Fernando Pavie Frejat  
Orientador: Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa

Brasília, DF  
2023



Fernando Pavie Frejat

**Estudo dos parâmetros de medição dos fluxos de ar, água e combustível, para bancadas de ensaio de motores de combustão interna**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva .

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa

Brasília, DF

2023

---

Fernando Pavie Frejat

Estudo dos parâmetros de medição dos fluxos de ar, água e combustível, para bancadas de ensaio de motores de combustão interna/ Fernando Pavie Frejat. – Brasília, DF, 2023-

65 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA , 2023.

1. Medição. 2. Fluxo. I. Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Estudo dos parâmetros de medição dos fluxos de ar, água e combustível, para bancadas de ensaio de motores de combustão interna

CDU 02:141:005.6

---

Fernando Pavie Frejat

# **Estudo dos parâmetros de medição dos fluxos de ar, água e combustível, para bancadas de ensaio de motores de combustão interna**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva .

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 11 de julho de 2023:

---

**Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Fábio Alfaia da Cunha**  
Convidado 1

---

**Prof. Dr. Felipe Chagas Storti**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2023

*Dedico este trabalho a Deus, pela capacidade que me deu para realizá-lo, a Maria, minha mãe do céu, que me deu forças, ao meu pai Rodrigo, minha mãe Solange, meu irmão Rafael e meu avô Aloisio, por todo o apoio, paciência e amor que tiveram comigo durante todos esses anos. Tanto sonharam em me ver formando e, hoje, pude concluir esta etapa, graças a todos eles. Dedico também aos meus avós que estão no céu, que seguem cuidando de mim: Myriam, Antônio e Elaine.*

# Agradecimentos

Primeiramente, agradecer a Deus pelo dom da vida, oportunidades, saúde e bênçãos recebidas desde sempre. Também agradeço à Maria, mãe de Deus, que sempre me acompanha e me protege. Se estou aqui, é graças aos dois. Para a minha família, meus agradecimentos por todo o suporte, paciência e investimento que depuseram em mim. São meus pilares e fonte de toda a força que eu precisei. Meu pai, que sempre me apoiou e me ajudou, minha mãe que sempre me ajudou a não desistir do meu sonho, meu avô, que sempre quis me ver formar e nunca desistiu de mim e meu irmão, que sempre me ouviu quando precisava, além do apoio de sempre.

Agradeço à UnB/FGA, por ter feito parte da minha história, por me proporcionar diversos momentos únicos e por me dar a oportunidade de estar aqui hoje. Agradeço aos meus amigos que fiz pelo caminho, tanto na escola, quanto na faculdade e na vida, todos os momentos bons vividos dentro e fora da universidade. Ao professor Fábio Lisboa, meu orientador de PIBIC, TCC e estágio, que sempre teve paciência e sempre me ajudou quando precisei, me orientando e aconselhando.

*“Não vos amoldeis às estruturas deste mundo,  
mas transformai-vos pela renovação da mente,  
a fim de distinguir qual é a vontade de Deus:  
o que é bom, o que Lhe é agradável, o que é perfeito.  
(Bíblia Sagrada, Romanos 12:2)*

# Resumo

A redução de emissões do escapamento de veículos automotores ainda é pauta em todo o mundo. Os combustíveis fósseis, ainda presentes na grande maioria dos veículos automotivos, são um dos fatores das emissões de gás carbônico na atmosfera. Sua substituição por fontes renováveis de combustíveis foi o principal motivo para o surgimento do Projeto Biogás, do Programa Rota 2030. O Projeto propõe a substituição do etanol, atual combustível do motor EA 211 1.0L MPI, da Volkswagen, para o biometano. Para que essa substituição seja possível, deve-se entender os parâmetros do motor, para que seja possível alterar sua performance e eficiência a partir de ensaios na bancada de testes. Primeiramente, o motor foi instalado na bancada, depois foi feita a adaptação para que recebesse GNV (Gás Natural Veicular) como combustível alternativo. A partir disto, os parâmetros estudados são as vazões de ar, combustível líquido e gasoso, e fluido de arrefecimento. O sistema de medição de vazão de ar foi implementado e calibrado utilizando uma caixa amortecedora de pulsos, placa de orifício, manômetro diferencial e aparato com fluxo constante. A medição do fluxo de etanol utilizou-se a medição gravimétrica. O fluxo de combustível gasoso foi obtido a partir do software de injeção. O fluido de arrefecimento foi calculado a partir da bomba d'água presente no motor. Durante o ensaio, a *FuelTech*, ECU presente no laboratório, obteve dados dos sensores de pressão e temperatura do ar, além da vazão de combustível e relação ar-combustível da mistura. Após os resultados obtidos, os valores calculados experimentalmente e os apresentados pela ECU foram comparados e foi calculado o desvio padrão. Os resultados do fluxo de ar convergiram com os apresentados pela ECU. Os dados de vazão de etanol divergiram dos apresentados pela *FuelTech* nas rotações 3000 e 4000 RPM. Nas demais rotações, os valores convergiram. Já o ensaio de GNV teve seus valores de  $\lambda$  com grandes oscilações em baixas rotações, até 3000 RPM. Para as rotações mais altas, os dados foram estáveis, mantendo uma mistura rica. Concluiu-se do trabalho que o ensaio de vazão de ar foi concluído pois o sistema foi calibrado e os dados convergiram com os dos sensores do motor. O ensaio de combustível teve seu sistema de medição aplicado, porém ocorreram erros em duas rotações, indicando algum erro na injeção ou na leitura da sonda  $\lambda$ . O ensaio de GNV foi bem sucedido apenas em altas rotações, mostrando que o sistema necessita de correções para as baixas.

**Palavras-chaves:** Fluxo mássico. Sistema de medição. Vazão. Coeficiente de descarga. Parâmetros do motor.



# Abstract

The reduction of exhaust emissions from motor vehicles is still an agenda around the world. Fossil fuels, still present in the vast majority of automotive vehicles, are one of the factors of carbon dioxide emissions into the atmosphere. Its replacement by renewable fuel sources was the main reason for the emergence of the Biogas Project of the Rota 2030 Program. The Project proposes the replacement of ethanol, the current fuel used in the EA 211 1.0L MPI engine, by Volkswagen, for biomethane. For this replacement to be possible, the engine parameters must be understood so that it is possible to change its performance and efficiency from tests on the test bench. First, the engine was installed on the bench, and the adaptation was made to receive GNV (Gás Natural Veicular) as an alternative fuel. From this, the parameters to be studied are the airflow rates, liquid and gaseous fuel, and coolant fluid. The airflow measurement system was implemented and calibrated using a pulse-dampening box, orifice plate, differential manometer, and apparatus with constant flow. Ethanol flow measurement used gravimetric measurement. The gaseous fuel flow was obtained from the injection software. The coolant fluid was calculated from the water pump present in the engine. During the test, *FuelTech*, the ECU present in the laboratory, obtained data from the air pressure and temperature sensors, as well as fuel flow and air-fuel ratio of the mixture. After the obtained results, the calculated values experimentally were compared with those presented by the ECU, and the standard deviation was calculated. The airflow results converged with those presented by the ECU. Ethanol flow data differed from those presented by *FuelTech* at 3000 and 4000 RPM rotations. In the other rotations, the values converged. Test running GNV had lambda values with large oscillations at low rotations, up to 3000 RPM. For the highest revs, the data was stable, maintaining a rich mixture. It was concluded from the work that the airflow test was completed because the system was calibrated, and the data converged with those of the engine sensors. The fuel test had its measurement system applied, but errors occurred in two rotations, indicating an error in the injection or the reading of the lambda probe. The GNV test was successful only at high speeds, showing that the system needs corrections for low speeds.

**Key-words:** Mass flow. Measuring system. Flow rate. Discharge coefficient. Engine parameters.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – (a) Experimento para ilustrar o tipo de escoamento. (b) Listras típicas de corante . . . . .	16
Figura 2 – Representação da <i>vena contracta</i> . . . . .	17
Figura 3 – Escoamento interno através de um bocal genérico . . . . .	20
Figura 4 – Placa de orifício . . . . .	21
Figura 5 – Tubo venturi . . . . .	22
Figura 6 – Bocal convergente . . . . .	23
Figura 7 – Sinais de entrada da ECU . . . . .	25
Figura 8 – Método de Coriollis para consumo de combustível . . . . .	28
Figura 9 – Motor EA 211 1.0 MPI Volkswagen na bancada de testes . . . . .	31
Figura 10 – Painel da ECU <i>FuelTech</i> FT550 . . . . .	32
Figura 11 – Motor EA 211 1.0 MPI Volkswagen na bancada de testes . . . . .	34
Figura 12 – Disposição esquemática para a medida do consumo de ar para o motor . . . . .	35
Figura 13 – Diagrama do sistema implementado para medição da vazão de ar no motor . . . . .	36
Figura 14 – Tanque de combustível contendo etanol sobre balança para ensaio de medição gravimétrica . . . . .	38
Figura 15 – Unidade de controle eletrônica do Kit Gás . . . . .	39
Figura 16 – Gráfico da potência de atrito e bsfc pelas rotações do motor operando sem carga . . . . .	45
Figura 17 – Manômetro digital utilizado no experimento . . . . .	55
Figura 18 – Anemômetro utilizado para medir velocidade . . . . .	56
Figura 19 – Diagrama de instalação do kit gás no motor . . . . .	57
Figura 20 – Log da <i>FuelTech</i> com resultados do ensaio . . . . .	61

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Coeficiente determinado de forma empírica para cada tipo de ponto singular . . . . .	19
Tabela 2 – Características do GNV . . . . .	28
Tabela 3 – Características do biogás e seus valores . . . . .	29
Tabela 4 – Dados técnicos do motor em estudo . . . . .	31
Tabela 5 – Dados a serem utilizados no cálculo do fluxo de combustível etanol . . . . .	40
Tabela 6 – Variáveis do equacionamento para fluxo mássico de ar, coeficientes de descarga e seus valores . . . . .	41
Tabela 7 – Dados obtidos para fluxo mássico de ar a partir do ensaio . . . . .	42
Tabela 8 – Dados obtidos de leituras da <i>FuelTech</i> do fluxo de ar a partir do ensaio . . . . .	43
Tabela 9 – Dados obtidos para fluxo de combustível a partir do ensaio . . . . .	44
Tabela 10 – Dados obtidos da razão ar-combustível e da razão estequiométrica . . . . .	44
Tabela 11 – Comparativo entre vazão de ar obtida experimentalmente e na <i>FuelTech</i> . . . . .	48
Tabela 12 – Comparativo entre vazão de etanol obtida experimentalmente e na <i>FuelTech</i> . . . . .	48
Tabela 13 – Dados obtidos a partir do ensaio de etanol . . . . .	62
Tabela 14 – Dados obtidos para fluxo mássico de ar a partir do ensaio . . . . .	63

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	Objetivos Gerais	14
1.2	Objetivos Específicos	14
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>15</b>
2.1	Escoamento turbulento plenamente desenvolvido	15
2.2	Medidores de vazão de restrição para regime permanente plenamente desenvolvido	19
2.3	Admissão e a mistura ar-combustível nos motores de combustão interna por faísca	23
2.4	Injeção de combustível	24
2.5	Combustíveis em motores de combustão interna por faísca	26
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>31</b>
3.1	Medição de fluxo de ar	35
3.2	Medição de vazão de combustível	37
3.3	Medição do fluxo de fluido de arrefecimento	38
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>40</b>
4.1	Calibração	40
4.2	Fluxo de ar	41
4.3	Fluxo de combustível	43
4.3.1	Etanol	43
4.3.2	GNV	45
4.4	Fluxo do fluido de arrefecimento	47
4.5	Comparativo entre resultados analíticos e Log da FuelTech	47
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>49</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>51</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>53</b>
	<b>ANEXO A – IMAGENS DO APARATO EXPERIMENTAL</b>	<b>54</b>
	<b>ANEXO B – MEMORIAL DE CÁLCULO DO FLUXO DE AR</b>	<b>58</b>

<b>ANEXO C – DADOS OBTIDOS NO ENSAIO . . . . .</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO D – EQUAÇÕES RELATIVAS AO ENSAIO DE ETANOL</b>	<b>64</b>

# 1 Introdução

Durante a década de 1970, as crises do petróleo motivaram a busca por fontes de energia alternativas, inclusive no Brasil. O álcool anidro começou a ser utilizado como combustível em veículos, apresentando menores índices de emissão de gases poluentes. A demanda por esse tipo de combustível, obtido a partir da cana-de-açúcar, foi significativa até os anos 1980. Atualmente, sua presença no mercado internacional recebeu um novo impulso com o desenvolvimento dos veículos bicombustíveis, ou, popularmente conhecidos como "flex". Nas últimas décadas, a preocupação com os impactos ambientais resultantes da emissão de gases poluentes marcou uma fase sem precedentes na história dos combustíveis (SOUSA, 2023).

Com o passar dos anos, novas tecnologias foram surgindo e os motores de combustão interna foram sofrendo evoluções, como a adição de componentes eletrônicos, centrais inteligentes, sensores mais precisos e novas formas de redução no consumo de combustível. Essas melhorias permitiram que os motores possuam um desempenho melhor que os mais antigos, tanto em potência como em resposta a um comando, além de uma maior economia de combustível (BRUNETTI, 2012a).

Um motor consumir menos combustível implica em menos gastos financeiros para o utilitário e redução na quantidade de gases poluentes emitidos pelo escapamento devido o motor ligado, como  $CO$ ,  $CH_n$  e  $NO_x$ . Algumas alternativas para a redução desses gases são: veículos híbridos, que consiste na adição de um motor elétrico no veículo, para que reduza a necessidade do motor à combustão; veículos elétricos, pois possuem apenas motores elétricos, não emitindo gases; novas alternativas de combustíveis renováveis com baixas emissões de poluentes (BRUNETTI, 2012a).

A ideia de substituir a gasolina por um combustível alternativo que polua menos exige que sejam realizados diversos testes no motor, adaptações para o novo combustível, alteração de parâmetros e calibrações de sensores para garantir a confiabilidade do sistema de medição.

No Brasil, o Programa Rota 2030 incentiva empresas do ramo automotivo a investirem em pesquisa e desenvolvimento a fim de obter benefício fiscal. Com isso, surgiu o Projeto Biogás, que visa a inserção de biocombustível, no caso, biometano em um motor EA211 1.0L MPI, da Volkswagen. O Projeto Biogás busca a operação de um motor comercial alimentado por biometano, proveniente de processos de biodigestão. Para a operação deste tipo de motor e sua evolução para performance, são necessárias várias alterações mecânicas e de controle dele, sendo a instrumentação e medição de fluxos o alvo deste projeto.

O projeto se desenvolve no laboratório de ensaio de motores da UnB Campus Gama (LEM-FGA). Neste laboratório, sistemas de medição para fluxos de ar, combustível e fluido de arrefecimento já estão instalados, sendo possível o estudo dos parâmetros de medição e sua influência nos resultados finais. Assim, são aplicadas equações teóricas de fluxos que, posteriormente, serão comparados aos experimentais para certificar que as formas de medições, como sensores e instrumentos, estão corretas.

Portanto, este projeto de conclusão de curso se justifica na necessidade de levantar os parâmetros de funcionamento do motor EA211 1.0L, atualmente instalado na bancada e garantir a exatidão do sistema medição de vazão de fluidos. Os valores medidos por este sistema servirão para a calibração e validação dos sensores do motor, podendo servir para estudos em outros motores que forem instalados no mesmo laboratório. A proposta de implementar um sistema de medição capaz de medir os fluxos mencionados para outros tipos de motores pode auxiliar em posteriores estudos de desempenho ou de calibração de sistemas.

## 1.1 Objetivos Gerais

O objetivo principal deste trabalho é implementar um sistema de medição dos fluxos mássicos de ar, fluido de arrefecimento, no caso a água, e combustíveis líquidos e gasosos no Laboratório de Ensaio de Motores.

## 1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho podem ser divididos em:

- Especificar os dispositivos de medição de fluxos de ar, capazes de atender à demanda do laboratório;
- Estudar e selecionar os melhores métodos para medição de fluxos de ar, água e combustível;
- Calcular o coeficiente de descarga para a placa de orifício e o bocal calibrado, atualmente instalados no laboratório;
- Confrontar a massa de combustível apontada na ECU programável e a medida por diferença gravimétrica;
- Estabelecer equações para cálculo de vazão do fluido de arrefecimento.

## 2 Fundamentação Teórica

A fundamentação teórica apresenta toda a base da teoria utilizada no trabalho. Como o trabalho aborda bastante a dinâmica dos fluidos, como escoamento turbulento, este será o primeiro tema apresentado. Em seguida, estão informações acerca da medição de vazão de ar. Assim, pode-se entender toda a parte que abrange a medição de fluxo de ar. Seguindo com a sequência lógica, é abordada a mistura ar-combustível em um motor de combustão interna, até a injeção do combustível. Conclui-se com os combustíveis em motores de combustão interna, citando principalmente suas propriedades. Dentre estes, os que terão maior foco são etanol e GNV, pois serão utilizados no ensaio do motor. Por fim, o capítulo se encerra para que seja abordada a metodologia.

### 2.1 Escoamento turbulento plenamente desenvolvido

Na dinâmica dos fluidos, a turbulência ou fluxo turbulento é caracterizado pela variação significativa e irregular do campo de velocidade do fluido no tempo e em sua posição. Já o laminar, a velocidade do fluido não varia com o tempo, além das suas linhas de corrente serem paralelas com o eixo do tubo em que o fluido percorre (POPE, 2011). A turbulência, ainda de acordo com o mesmo autor, é comumente observada em fenômenos cotidianos, como fumaça de chaminé, água em uma cachoeira, rios de fluxo rápido, dentre outros. Para saber se um escoamento é laminar ou turbulento, pode-se observar visualmente seu comportamento, com vórtices e um comportamento não-linear. O número de Reynolds determina essa característica.

O número de Reynolds é a razão entre as forças inerciais e as forças viscosas dentro de um fluido que está sujeito a movimento interno relativo, devido a diferentes velocidades do fluido (FALKOVICH, 2018; FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2014). A Figura 1 mostra o experimento de Reynolds com corante usado para identificar o tipo de escoamento. Este experimento foi o primeiro passo para identificar sua existência. Segundo Pope (2011), que explica o experimento, Reynolds injeta tinta na parte central de um tubo que possui um fluxo de água. À medida que o número de Reynolds aumenta, essa tinta começa a adquirir características turbulentas.



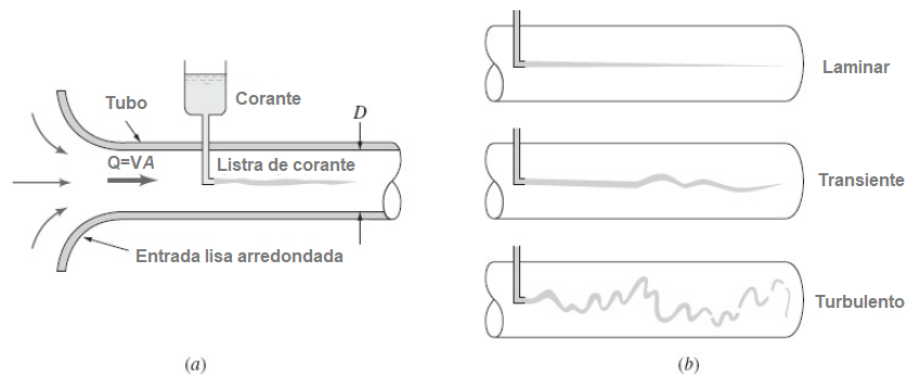


Figura 1 – (a) Experimento para ilustrar o tipo de escoamento. (b) Listras típicas de corante. Adaptado de Moran e Shapiro (2005)

Observando os diferentes tipos escoamentos apresentados por Reynolds no experimento, é possível tirar algumas conclusões dos fluxos laminar e turbulento, de acordo com Hall (2015):

- O fluxo laminar ocorre em baixos números de Reynolds, onde as forças viscosas são dominantes, e é caracterizado pelo movimento suave e constante do fluido;
- o fluxo turbulento ocorre em altos números de Reynolds e é dominado por forças inerciais, que tendem a produzir redemoinhos caóticos, vórtices e outras instabilidades de fluxo.

Assim, o número de Reynolds, apresentado para caracterizar o fluido, apresentado por Sommerfeld (1909) é definido como:

$$Re = \frac{uL}{\nu} = \frac{\rho uL}{\mu}, \quad (2.1)$$

onde:

- $\rho$  é a densidade do fluido [ $kg/m^3$ ]
- $u$  é a velocidade do fluxo [ $m/s$ ]
- $L$  é uma dimensão linear característica [ $m$ ]
- $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido [ $kg/(m \cdot s)$ ]
- $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido [ $m^2/s$ ].

De acordo com Brunetti (2008), essa expressão se chama número de Reynolds e mostra que o tipo de escoamento depende do conjunto de grandezas  $u$ ,  $L$  e  $\nu$ , e não somente

de cada uma delas. Reynolds verificou que, no caso de tubos lisos, sem trepidações e com condições ideais, seriam observados os seguintes valores:

$Re < 2000$ : escoamento laminar

$2000 < Re < 2400$ : escoamento de transição

$Re > 2400$ : escoamento turbulento

No estudo dos fluidos, além do número de Reynolds, outro ponto importante é o coeficiente de contração. Ele é definido como a relação entre a área da seção contraída ( $A_2$ ) e a área do orifício ( $A_1$ ), de acordo com a Eq. 2.2.

$$C_C = \frac{A_2}{A_1} \quad (2.2)$$

Netto e Fernández (2015), Oliveira et al. (2018) constataram experimentalmente que, onde está presente um tubo com coeficiente de contração, os filetes líquidos tocam as bordas do orifício e continuam a convergir, depois de passarem pelo mesmo, até uma seção  $A_2$ , na qual o jato tem área sensivelmente menor que a do orifício. A Figura 2 indica as áreas e ilustra a constatação.

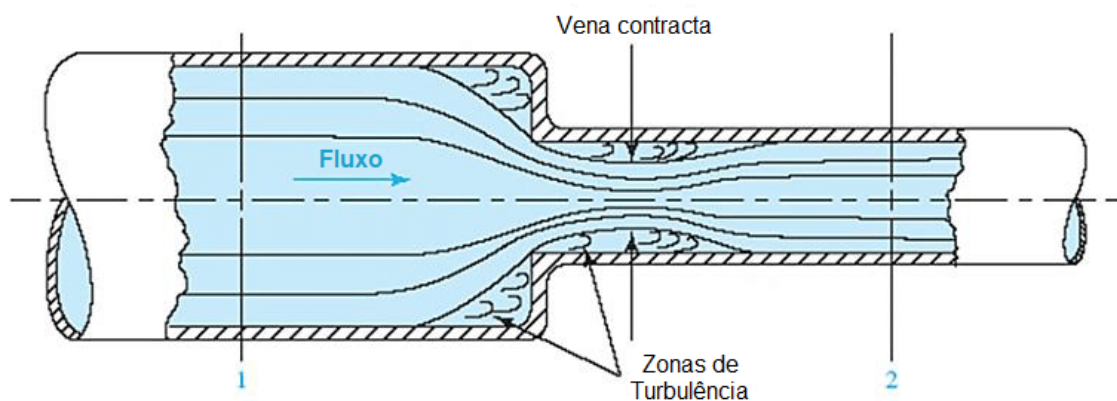


Figura 2 – Representação da *vena contracta* (HAASE; WODTKE, 2017)

Outro tópico importante na dinâmica de fluidos é a perda de carga,  $h_L$ , que está presente nos escoamentos turbulentos. Ela pode ser considerada a conversão irreversível de energia mecânica em energia interna devida ao atrito (MORAN; SHAPIRO, 2005). Baseada nas fórmulas matemáticas, ou semi-empíricas, sendo seus dados apresentados adimensionalmente, são feitas as análises de escoamento turbulento em tubo. Um sistema padrão de tubos consiste em diversos segmentos retilíneos de tubos intercalados com vários tipos de componentes (como curvas ou válvulas). Como mostra o mesmo autor, a perda de carga global no sistema de dutos é a soma das perdas normais ( $h_{L_{nor}}$ ), causada pelos efeitos viscosos nas regiões retilíneas, e das localizadas ( $h_{L_{loc}}$ ) nos vários componentes. A Eq. 2.3 mostra a perda de carga global ( $h_L$ ),

$$h_L = h_{L_{nor}} + h_{L_{loc}} \quad (2.3)$$

sendo que as perdas normais são associadas aos efeitos de atrito (viscosos) à medida que o fluido escoar através de um tubo reto, podendo ser representada em forma de função como

$$h_{L_{nor}} = F(V, D, \ell, \epsilon, \mu, \rho) \quad (2.4)$$

onde:

- $V$  é a velocidade média;
- $\ell$  é o comprimento do tubo;
- $D$  é o diâmetro do tubo;
- $\epsilon$  é um comprimento que caracteriza a rugosidade da parede do tubo.

Apesar das perdas de carga no escoamento laminar em tubos não dependerem da rugosidade do tubo, o escoamento turbulento exige que seja necessário incluir esse parâmetro. Logo, as perdas devidas aos componentes dos sistemas de tubos que não são retos, são denominadas perdas localizadas e pode ser apresentada em função do coeficiente de perda, adimensional,  $K_L$ , como:

$$h_{L_{loc}} = K_L \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (2.5)$$

com o coeficiente de perda sendo:

$$K_L = F \cdot \frac{L}{D} \quad (2.6)$$

onde:

- $h_{L_{loc}}$  = perda de carga localizada;
- $F$  = coeficiente de perda de carga distribuída, ou fator de atrito de Darcy;
- $L$  = comprimento da tubulação (tubos + acessórios);
- $V$  = velocidade média da água, antes ou depois do ponto singular, conforme o caso;
- $K_L$  = Coeficiente determinado de forma empírica para cada tipo de ponto singular;
- $D$  = diâmetro da seção;

- $g$  = aceleração da gravidade.

Como a perda de carga está presente no escoamento de fluidos em tubos, é importante analisar as diferenças de tamanhos, seções e se os tubos possuem curvatura. Existem diversos sistemas de tubos contendo seções de transição, cujo diâmetro do tubo varia de um tamanho para outro. Toda variação na área de escoamento contribui com perdas que nunca são consideradas por conta do atrito. Alguns casos extremos envolvem o escoamento no interior de um tubo a partir de um reservatório (entrada do sistema) ou a saída de um tubo em um reservatório (MORAN; SHAPIRO, 2005).

Segundo Bird, Stewart e Lightfoot (2004), outra categoria importante de componentes de sistemas de dutos é a das conexões comercialmente disponíveis como joelhos, têes, redutores, válvulas e filtros. Os valores de  $K_L$  para esses componentes dependem predominantemente do formato do componente e um pouco do número de Reynolds nos escoamentos comumente com  $Re$  elevados. Logo, o coeficiente de perda para um joelho de  $90^\circ$  depende de as conexões do tubo serem rosqueadas ou flangeadas, mas, dentro da precisão dos dados, é bastante independente do diâmetro do tubo, da vazão ou das propriedades do fluido, isto é, independente do número de Reynolds. Valores típicos de  $K_L$  para tais componentes são fornecidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Coeficiente determinado de forma empírica para cada tipo de ponto singular

Tipo de singularidade	$K_L$
Válvula de comporta totalmente aberta	0,2
Válvula de comporta metade aberta	5,6
Curva de $90^\circ$	1,0
Curva de $45^\circ$	0,4
Válvula de pé	2,5
Emboque (entrada em um tubo)	0,5
Saída de um tubo	1,0
Alargamento brusco	$(1 - (D_1/D_2))^2$
Redução brusca de seção (Contração)	$0,5 \cdot (1 - (D_1/D_2))^2$

Fonte: Adaptado de Filho (2006).

## 2.2 Medidores de vazão de restrição para regime permanente plenamente desenvolvido

Os medidores de vazão de restrição são baseados na aceleração de uma corrente fluida através do bocal do medidor. Segundo Fox, McDonald e Pritchard (2014), a variação na velocidade do escoamento do fluido causa uma variação na pressão do mesmo, e essa variação na pressão ( $\Delta p$ ) pode ser medida com um manômetro diferencial. O fluido, após passar pelo bocal, continua a acelerar na chamada zona de recirculação e, após passar por esta zona, desacelera para preencher todo o duto.

Segundo a Figura 3, separando em duas zonas um tubo com bocal, a zona 1 se localiza antes do bocal e a zona 2 após o bocal, onde o fluido tem máxima aceleração, que é justamente onde a zona de recirculação é maior.

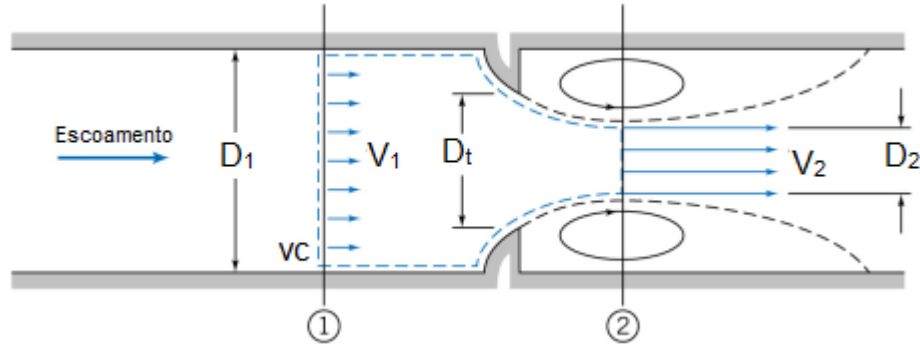


Figura 3 – Escoamento interno através de um bocal genérico. Adaptado de Fox, McDonald e Pritchard (2014)

Aplicando as equações da continuidade, de Bernoulli e fazendo algumas considerações, como escoamento permanente, incompressível, ao longo de uma linha corrente, sem atrito, velocidades uniformes e alturas iguais, obtém-se a equação final de fluxo mássico, apresentada por último na Eq. 2.7 (MORAN; SHAPIRO, 2005).

$$\begin{aligned}
 A_1 \cdot v_1 &= A_2 \cdot v_2 \\
 p_1 + \rho V g h_1 + \frac{\rho V v_1^2}{2} &= p_2 + \rho V g h_2 + \frac{\rho V v_2^2}{2} \\
 \dot{m}_{\text{teórico}} &= \frac{C_D A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)}
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Sendo:

- $\rho$ : massa específica [kg/m];
- A: geometria do medidor correspondente (relacionando com o diâmetro apresentado na Figura 3) [ $m^2$ ];
- p: pressão na região correspondente [Pa];
- v: velocidade do fluido [ $m/s^2$ ];
- V: volume do fluido [ $m^3$ ];
- h: altura do líquido do manômetro diferencial [m];
- $C_D$ : coeficiente de descarga.

O coeficiente que está presente na Eq. 2.7 é chamado de coeficiente de descarga ( $C_D$ ), e é o que inclui nos cálculos o desvio da média de vazão, ao aplicar-se Bernoulli. Este coeficiente é levado em consideração em bocais medidores e, para bocais padronizados, o  $C_D$  é tabelado (BRUNETTI, 2012a). O  $C_D$  é a razão da descarga real para a descarga teórica, ou seja, a razão da taxa de fluxo de massa na extremidade de descarga do bocal para a de um bocal ideal que expande um fluido de trabalho idêntico das mesmas condições iniciais para as mesmas pressões de saída. A Eq. 2.8 apresenta uma forma de calcular o coeficiente através do fluxo mássico de ar.

$$\dot{m}_a = C_{D_a} \cdot \dot{m}_{aT} \quad (2.8)$$

- $C_{D_a}$ : coeficiente de descarga;
- $\dot{m}_a$ : fluxo de ar [kg/s];
- $\dot{m}_{aT}$ : fluxo de ar teórico [kg/s].

Tendo em mente sobre os medidores de vazão e seus princípios de funcionamento, os medidores de vazão principais que podem ser utilizados neste trabalho são: placa de orifício, venturi e bocal convergente. De acordo com Fox, McDonald e Pritchard (2014), a placa de orifício é uma placa fina que se encontra entre flanges de tubos. Essa placa diminui o diâmetro do escoamento, causando uma diferença de velocidade. Na Figura 4 está apresentada a placa de orifício e o fluxo do fluido passando por ela.

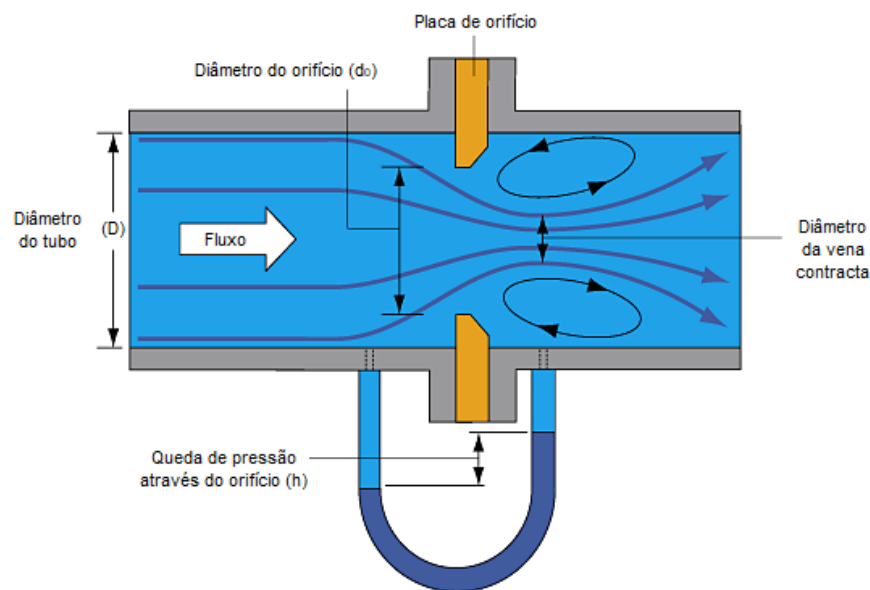


Figura 4 – Placa de orifício. Adaptado de Mohamed, Mansour e Dekam (2017)

Segundo Brunetti (2008), a fórmula da vazão de um fluido passando por uma placa de orifício é apresentada nas Eq. 2.9.

$$Q = k A_0 \sqrt{2g \frac{p_1}{\gamma}}$$

$$k = \frac{C_D}{\sqrt{1 - C_C^2 \left(\frac{D_0}{D_1}\right)^4}} \quad (2.9)$$

Sendo:

- $Q$ : vazão [ $m^3/s$ ];
- $\gamma$ : peso específico [ $N/m^3$ ];
- $g$ : aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ];
- $k$ : coeficiente adimensional que depende do número de Reynolds de aproximação;
- $C_C$ : coeficiente de contração;
- $\frac{D_0}{D_1}$ : razão dos diâmetros de um escoamento interno em um bocal [ $m/m$ ];
- $(C_D)$ : coeficiente de descarga.

Ainda segundo Brunetti (2008), os tubos Venturi, Figura 5, são constituídos de um tubo convergente, garganta e tubo divergente. O convergente, mostrado como região 1, atinge uma seção mínima, chamada garganta, região 2. Depois, a seção aumenta de forma que o tubo se torna divergente. Na figura, o tubo Venturi é representado com um manômetro diferencial acoplado.

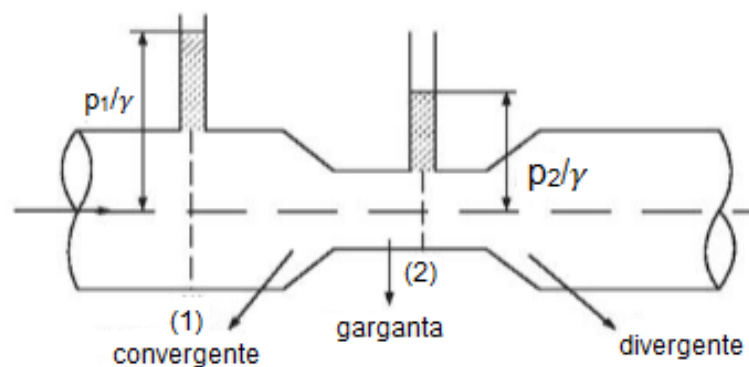


Figura 5 – Tubo venturi. Adaptado de Brunetti (2008)

Sua fórmula matemática está descrita na Eq. 2.10. As variáveis já vistas são as mesmas de equações anteriores.

$$Q = \frac{C A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4}} \sqrt{2g \left(\frac{p_1 - p_2}{\gamma}\right)} \quad (2.10)$$

Com:

- C: coeficiente dependente de Reynolds e de  $\frac{D_0}{D_1}$ ;

O bocal convergente se parece com um sistema de placa de orifício, porém, as paredes do local com diâmetro reduzido convergem, formando uma espécie de funil. Nele, é formado um descolamento do escoamento, o que faz surgir uma região de fluido, sem movimento de translação. Seu perfil é apresentado na Figura 6.

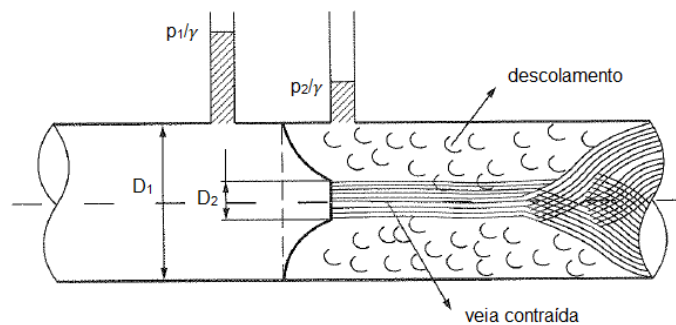


Figura 6 – Bocal convergente. Adaptado de Brunetti (2008)

A Eq. 2.11 traz o cálculo de vazão. As variáveis já vistas são as mesmas de equações anteriores.

$$Q = k A_2 \sqrt{2g \left( \frac{p_1 - p_2}{\gamma} \right)} \quad (2.11)$$

### 2.3 Admissão e a mistura ar-combustível nos motores de combustão interna por faísca

A admissão e a mistura ar-combustível estão relacionadas, pois o ar utilizado nessa mistura vem do meio externo, por meio da admissão. Já o combustível, que estava reservado no tanque, é acionado pela bomba de combustível, chegando assim no bico injetor para que chegue na câmara (injeção indireta) ou no cilindro (injeção direta).

Na admissão, o movimento do pistão do ponto morto superior (PMS) ao ponto morto inferior (PMI) causa uma sucção, gerando um fluxo de gases. Com a válvula aberta, o cilindro preenche-se com a mistura ar-combustível no caso da injeção indireta. Na injeção direta, o cilindro é preenchido com ar, e o combustível injetado diretamente. O coletor de admissão é um subsistema que distribui o ar de forma igualitária a todos os cilindros do motor (BRUNETTI, 2012a).



A relação ar-combustível, ou razão ar-combustível ( $\lambda$ ), utilizada por montadoras norte-americanas (no Brasil, é comum ser combustível-ar), é a relação de massa de ar e a massa de combustível (ou vazões em massa), sendo apresentadas na Eq. 2.12 (BRUNETTI, 2012a).

$$\lambda = \frac{1}{F} = \frac{m_a}{m_c} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_c} \quad (2.12)$$

Com:

- $\lambda$ : relação ar-combustível;
- $F$ : relação combustível-ar;
- $m_a$ : massa de ar [kg];
- $m_c$ : massa de combustível [kg];
- $\dot{m}_a$ : fluxo da massa de ar [kg/s];
- $\dot{m}_c$ : fluxo da massa de combustível [kg/s];

Ainda segundo Brunetti (2012a), a relação ar-combustível estequiométrica ( $\lambda_e$  ou A/C Estequiométrica) para a gasolina é de  $\lambda_e = 15:1$ , e para o etanol,  $\lambda_e = 9,4:1$ . Assim, é possível obter a fração relativa ( $\lambda_R$ ) de ar-combustível, apresentada na Eq. 2.13, que é a relação entre a medida no motor e a estequiométrica previamente apresentada:

$$\lambda_R = \frac{\lambda_e}{\lambda} \quad (2.13)$$

Sendo:

- mistura pobre:  $\lambda_R > 1$ ;
- mistura estequiométrica:  $\lambda_R = 1$ ;
- mistura rica:  $\lambda_R < 1$

## 2.4 Injeção de combustível

Visto a relação de ar-combustível, a injeção é a forma que o combustível é colocado no motor, para que se misture com o ar e seja queimado, gerando o movimento do motor. Essa mistura nem sempre é estequiométrica, apesar de sempre estar próxima disso. O sistema de injeção proporciona a variação da massa de combustível admitida, levando em

conta também a posição da borboleta aceleradora ( $\alpha$ ) e a rotação do motor ( $n$ ) e para que a relação adequada para aquele instante seja alcançada (BRUNETTI, 2012a).

Atualmente, o carburador entrou em desuso, devido sua baixa eficiência na mistura estequiométrica. Com o crescente uso de sistemas eletrônicos no veículo, a injeção eletrônica foi um dos componentes implementados. A central de injeção controla a quantidade de combustível injetado, a partir das informações recebidas pela sonda lâmbda, que indica se a mistura está rica ou pobre, corrigindo sempre que necessário a quantidade de combustível a ser misturado com o ar admitido.

Diferente do motor a Diesel, o motor de ciclo Otto necessita de uma taxa de compressão mais baixa para que o combustível não seja inflamado neste tempo do motor. Portanto, a ignição é comandada pela faísca. Por existirem duas formas de injeção (direta: junto à válvula de admissão e indireta: no coletor de admissão e succionado para a câmara), o injetor não precisa ser de alta pressão (BRUNETTI, 2012a). Segundo o mesmo autor, de forma a se obter uma propagação de chama adequada, se faz necessário um sensor de fluxo de ar, para que se saiba quanto de ar está entrando e a ECU (*Engine Control Unit*), controle a quantidade de combustível a ser injetada. A Figura 7 mostra os sinais de entrada da ECU para a dosagem adequada de combustível.

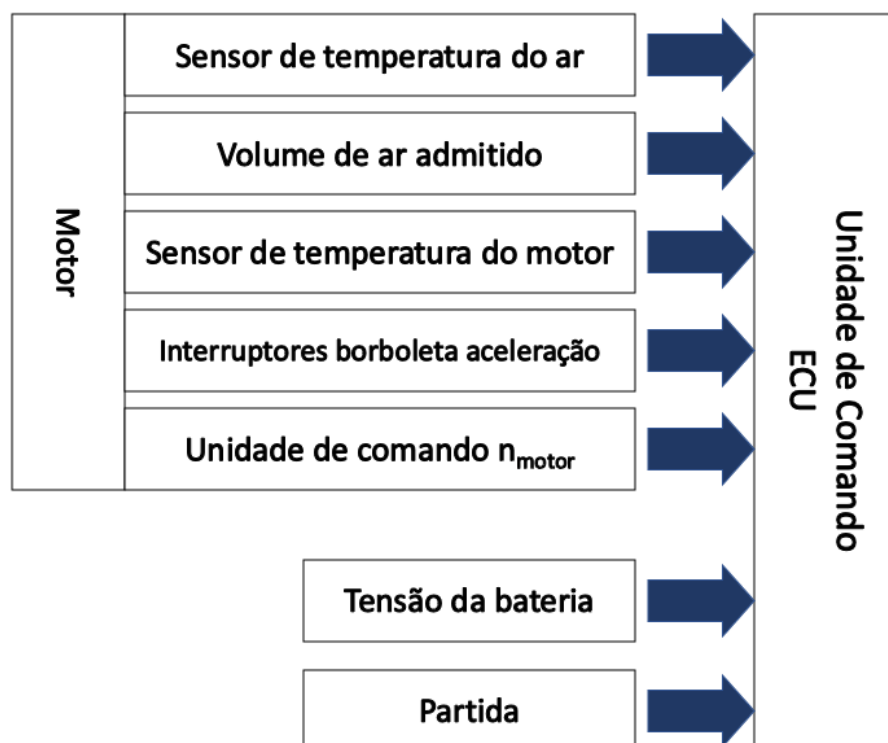


Figura 7 – Sinais de entrada da ECU. Adaptado de Brunetti (2012a)

Atualmente, existem ECU's programáveis, permitindo controlar os atuadores do motor, bem como funções de transferência dos sensores nele conectados. Por ser uma central, toda a informação do motor estão concentradas nela. Para um estudo de motor

de bancada, são usadas essas ECU's para alterar os parâmetros do sensor ou até um atuador. A FuelTech FT550 é um exemplo. Ela é um módulo de controle para sistema de injeção eletrônica em veículos automotores. Os dados de sensores são apresentados em sua interface, e quaisquer alterações de dados podem ser obtidos em seu software, chamado de FT Manager.

Durante os testes no motor com a *FuelTech*, os dados coletados são registrados em logs, que incluem informações como os mapas gerados a partir dos dados de abertura do pedal, pressão no sensor MAP, temperatura do motor, valor de lâmbda, RPM, vazão dos injetores e tempo de injeção, durante todo o período de gravação dos logs. Esses registros permitem analisar detalhadamente o funcionamento e desempenho do motor, utilizando os diversos parâmetros fornecidos. A Figura 20, do Anexo C, mostra como o Log é apresentado no computador.

## 2.5 Combustíveis em motores de combustão interna por faísca

Muitos combustíveis atualmente são usados para motores rotativos, como gasolina, diesel, etanol, butanol, gás natural, hidrogênio e outros biocombustíveis. Dentre eles, o gás natural é considerado mais adequado como combustível alternativo para motores rotativos (FAN et al., 2022).

Poder calorífico é a quantidade de calor que pode ser liberada por um combustível por unidade de massa do mesmo, quando queimado completamente a uma certa temperatura. Em um motor de combustão interna, o desempenho energético é proveniente do poder calorífico em volume (BRUNETTI, 2012a).

Utilizando uma bomba calorimétrica, é possível medir o poder calorífico superior (PCs). O mesmo autor mostra que, como o produto da combustão ocorre a uma alta temperatura, o vapor de água, que encontra-se na mistura, ou é produzido através da reação química na câmara, não é condensado, o que retém o calor latente de vaporização. Portanto, para o cálculo do poder calorífico inferior (PCi), é necessário considerar o valor do PCs subtraindo o vapor d'água, obtendo a quantidade de energia disponível da combustão. A Equação 2.14 apresenta o cálculo para o poder calorífico inferior.

$$PCi = PCs - L_{H_2O} \cdot m_{H_2O} \quad (2.14)$$

Sendo:

- $L_{H_2O}$ : calor latente de condensação da água, a uma determinada temperatura;
- $m_{H_2O}$ : massa de água resultante por unidade de massa da mistura.

De acordo com [Martins \(2006\)](#), o poder calorífico de um combustível é medido a partir da quantidade de calor extraída durante a sua combustão. A indicação do poder calorífico de um combustível pode ser incerta, na medida em que é possível um combustível apresentar poder calorífico elevado, quando comparado a outros. Na mistura com o ar, seu poder calorífico pode ser inferior.

O calor latente de vaporização também é uma propriedade relevante nos combustíveis fósseis, significando o calor necessário para vaporizar uma determinada massa de combustível. Essa propriedade interfere no quanto o motor é preenchido, pois, quanto maior o calor latente de vaporização, mais calor é retirado do ar na admissão do motor e, portanto, mais massa de ar-combustível é aspirada, gerando maior energia a cada combustão ([BRUNETTI, 2012b](#)).

Devido às políticas e preocupações com o meio ambiente, as leis estão mais rigorosas em relação às emissões. Por isso, um dos fatores da escolha dos combustíveis está relacionada com os gases provenientes de sua combustão, como o  $CO_2$ , e sua emissão é de um parâmetro imprescindível, principalmente visando produção de combustível e uso em larga escala. Ao se comparar com os combustíveis derivados de petróleo, os gasosos, como gás natural e hidrogênio, apresentam níveis pequenos de produção de gás carbônico, relacionados diretamente à relação Hidrogênio/Carbono ([MARTINS, 2006](#)).

A gasolina é produzida a partir da destilação do petróleo bruto, sendo o índice de octano (octanagem) sua característica mais importante. Este índice indica velocidade de combustão e taxa de compressão. Um maior índice de octano possibilita uma queima mais eficiente ([MARTINS, 2006](#)). O percentual de iso-octano ( $C_8H_{18}$ ) e n-heptano ( $C_7H_{16}$ ) variam sua taxa de compressão entre 8:1 e 10,5:1. Algumas características são: PCI = 44,31 MJ/kg; razão ar-combustível: 15:1; temperatura de ignição:  $\sim 400^\circ C$  ([BRUNETTI, 2012a](#)).

O etanol ( $C_2H_5OH$ ) é um hidrocarboneto oxigenado. Sua taxa de compressão varia entre 11,5:1 e 14,5:1. É obtido através da fermentação natural de açúcares (álcool de 1ª geração) ou pela hidrólise enzimática da celulose (álcool de 2ª geração) ([MARTINS, 2006](#); [BRUNETTI, 2012a](#)). Suas propriedades são: PCI = 26,8 MJ/kg; razão ar-combustível: 9:1; temperatura de ignição:  $\sim 362^\circ C$ .

Existem três formas de medir fluxo mássico tanto do etanol quanto da gasolina: medição gravimétrica, que é comparando a massa inicial e final do combustível após um determinado tempo de teste; medidor de vazão, que é acoplado na linha de combustível do tanque até o motor e observando a vazão correspondente para cada rotação. A outra forma é uma medição volumétrica via software, sendo possível realizar a conversão, por meio da medição instantânea da temperatura do fluido, associada a mapas de massa específica, como apresentado na Figura 8. Nela, o combustível passa por um tubo em "U", antes de ir para o motor, e sua pressão exerce forças na vertical, causando uma oscilação, captada

pelos sensores e, assim, indicando a vazão mássica no tubo (BRUNETTI, 2012a).

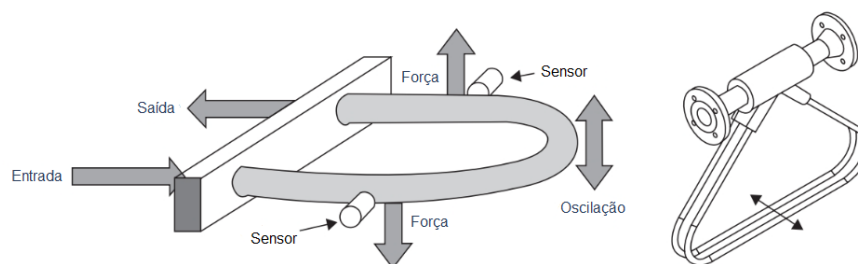


Figura 8 – Método de Coriolis para consumo de combustível (BRUNETTI, 2012a)

Já os combustíveis gasosos, como o caso do GNV (Gás Natural Veicular) é um gás utilizado em alguns veículos como fonte alternativa de combustível. Para que seja utilizado, é necessário fazer uma adaptação no veículo, incluindo um cilindro-tanque para seu armazenamento. De acordo com Xavier (2016), este gás é proveniente do petróleo e, de todos os combustíveis fósseis, é o menos poluente. Arelado a esta ideia, o uso de gás como combustível é uma opção positiva para o meio ambiente. E, partindo deste princípio, pode-se considerar uso de outros gases.

O GNV utilizado neste trabalho é fornecido pela CEB Gás e, em sua página na internet, os dados são apresentados como na Tabela 2.

Tabela 2 – Características do GNV

Parâmetro	Valor
Poder Calorífico Superior [kcal/m <sup>3</sup> ]	9400
Poder Calorífico Inferior [kcal/m <sup>3</sup> ]	8500
Temperatura de ignição [°C]	537
Densidade relativa, para 20°C e 1 atm [kg/m <sup>3</sup> ]	0,63
Massa específica, para 20°C e 1 atm [g/mol]	0,78
Fator de Compressibilidade R-K, a 20°C e 1 atm	0,9973
Viscosidade [cP]	0,010816
C <sub>p</sub> /C <sub>v</sub>	1,2816
Ponto de ignição [°C]	482 a 632
Limite inferior de inflamabilidade da mistura, a 20°C e 1 atm	5% do volume de ar
Composição	%
CH <sub>4</sub>	89,24
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	7,86
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,24
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> e mais pesados	0,05
N <sub>2</sub>	1,34
CO <sub>2</sub>	1,25
O <sub>2</sub>	0,02
H <sub>2</sub> S [mg/m <sup>3</sup> ]	0,4
SO <sub>2</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	8,4

Fonte: Adaptado de CebGás (2008).

De acordo com Fábio (SOUSA, 2020), é possível medir fluxo de gás natural de quatro maneiras diferentes. Uma delas é utilizando a placa de orifício, já citada. Desta forma, é um método válido para se obter o fluxo mássico deste gás.

O biogás é outro combustível gasoso, sendo uma fonte de energia limpa e renovável, produzido a partir da digestão anaeróbica de uma ampla gama de matérias-primas, incluindo resíduos biodegradáveis. Os substratos podem incluir diversos tipos de biomassa ou resíduos. Também é gerado de aterros e pântanos (KUKOYI et al., 2016).

O biometano é um tipo de biogás. No projeto, existem dois biometanos que podem ser usados para a medição de fluxo: MODELO ANP e MODELO 2, como foram chamados. O modelo ANP consiste em um gás cuja matéria-prima são resíduos agrossilvopastorais, enquanto que, no modelo 2, sua matéria-prima são resíduos orgânicos. O biogás utilizado no projeto é similar ao apresentado por Ardolino, Parrillo e Arena (2018), o que permitiu utilizar as informações já obtidas anteriormente. A Tabela 3 traz mais informações acerca deste tema.

Tabela 3 – Características do biogás e seus valores

Características	Biometano
Vazão volumétrica [ $\text{Nm}^3/\text{h}$ ]	400
Vazão volumétrica [ $\text{kg}/\text{h}$ ]	511
Pressão [mbarg]	5
Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]	37 - 39
Temperatura de ignição [ $^{\circ}\text{C}$ ]	537
Poder calorífico inferior [ $\text{MJ}/\text{Nm}^3$ ]	18,2
Composição	% volume
$\text{CH}_4$	50,83
$\text{CO}_2$	44,59
$\text{H}_2\text{S}$	0,01
$\text{N}_2$	0,38
$\text{O}_2$	0,10
$\text{NH}_3$	<0,01
$\text{H}_2\text{O}$	4,09

Fonte: Adaptado de Ardolino, Parrillo e Arena (2018).

Onde:

- $\text{CH}_4$ : Porcentagem de metano na amostra;
- $\text{CO}_2$ : Porcentagem de dióxido de carbono na amostra;
- $\text{H}_2\text{S}$ : Porcentagem de sulfeto de hidrogênio na amostra;
- $\text{N}_2$ : Porcentagem de nitrogênio na amostra;

- $O_2$ : Porcentagem de oxigênio na amostra;
- $NH_3$ : Porcentagem de amônia na amostra;
- $H_2O$ : Porcentagem de água na amostra.

Apesar de serem gases diferentes, o sistema de medição de fluxos do biometano pode ser realizado da mesma maneira que o GNV.

### 3 Metodologia

Baseando-se na fundamentação teórica apresentada, a metodologia apresenta as maneiras de implementação dos sistemas de medições para os fluxos de ar, combustíveis e fluido de arrefecimento, além de como rodar o ensaio no motor para se obter os fluxos desejados. Este ensaio foi feito no motor EA211 MPI 1.0 Volkswagen. Os dados técnicos do motor podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados técnicos do motor em estudo

Parâmetros	Motor EA211 1.0 MPI VW
Desenho	3 cilindros em linha
Volume deslocado total	999 $cm^3$
Diâmetro dos cilindros	7,45 cm
Curso	7,64 cm
Válvulas por cilindro	4
Taxa de compressão	11,5:1
Potência máxima	55 kW [G] / 60 kW [A] a 6200 RPM
Torque máximo	95 Nm / 102 Nm de 3000 a 4300 RPM
Combustível original	Bi-combustível (gasolina e etanol)

Fonte: Adaptado de (WEB, 2020).

O motor presente no laboratório para se realizar os ensaios apresentados está mostrado na Figura 9.

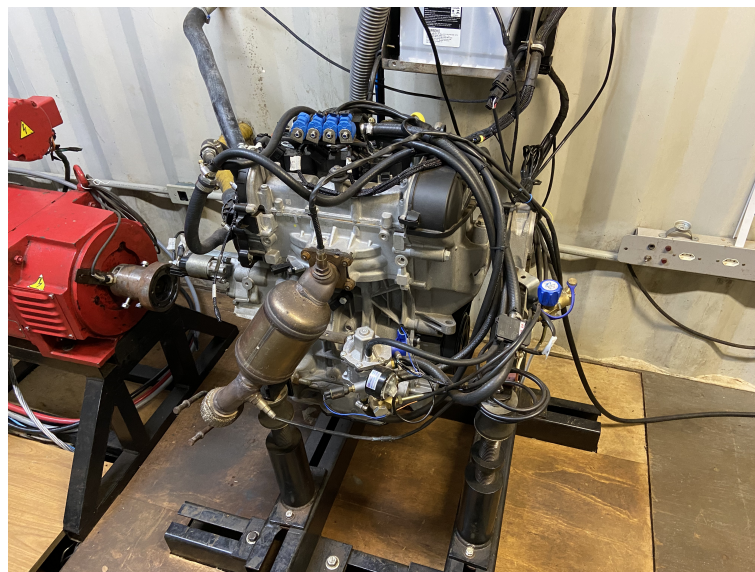


Figura 9 – Motor EA 211 1.0 MPI Volkswagen na bancada de testes



Todos os fluxos que se deseja obter do motor para este trabalho foram medidos no laboratório cujo motor está instalado na bancada. O laboratório possui todos os aparatos necessários para implementar o sistema de medição do fluxo de ar, calibrá-lo e testá-lo. Os demais fluxos, como o de combustível e fluido de arrefecimento, também estão presentes. Todos os resultados podem ser obtidos a partir de um único ensaio. Cada medição está apresentada de forma detalhada nas seções deste capítulo.

Para que o motor funcione em uma bancada, é necessário que exista uma central e uma ECU juntas do motor. A central utilizada é a FuelTech (FT), onde todos os dados de sensores e atuadores estão conectados. Através dela é possível observar os dados coletados instantaneamente durante os testes. Os dados obtidos experimentalmente serão comparados posteriormente com a FuelTech. A Figura 10 mostra o painel da FuelTech, onde pode-se observar alguns parâmetros em tempo real.



Figura 10 – Painel da ECU *FuelTech* FT550

A central original do motor foi substituída pela FT550. Para garantir o correto funcionamento do sistema e otimizar a interação com os parâmetros do motor e seus sensores, em conjunto com a ECU FT 550, foi necessária a instalação do chicote ao motor, onde todas as entradas e saídas do sistema foram indicadas. Esses sensores acoplados ao motor são:

- Sonda lambda wide band, responsável por verificar a concentração de oxigênio em relação ao combustível na mistura ar-combustível. O motor possui apenas uma, localizada no coletor de escapamento. Este tipo de sonda lambda permite analisar

a mistura a partir de uma curva característica, e não apenas se a mistura é rica ou pobre;

- Sensor MAP, do inglês Manifold Absolute Pressure. Sensor acoplado ao sistema de admissão de ar, capaz de coletar o valor de pressão absoluta no coletor de admissão;
- Sensor de posição de borboleta, responsável por verificar a porcentagem de abertura da válvula borboleta, a partir do acelerador;
- Sensor de fase, responsável por verificar a posição do eixo do comando de válvulas;
- Sensor de knock, responsável por verificar a possível detonação na câmara de combustão;
- Sensor de temperatura do motor, responsável por coletar dados acerca da temperatura, visando um funcionamento seguro do motor.

Foi rodado apenas um teste, em que se obteve todos os dados para a realização deste trabalho. Primeiro, ligou-se o motor e deixou estabilizar as rotações. Após a estabilização, foi marcado um minuto para uma rotação em marcha lenta, que era de 1130 RPM. Em seguida, foi feito o mesmo: marcado um minuto, porém para uma rotação de 2000 RPM. Depois foi feito o mesmo para 3000, 4000, 5000 e 6000 RPM. O motor estava sem carga durante o ensaio.

A Figura 11 apresenta um esquemático de toda a disposição do aparato experimental presente no laboratório para que o teste seja realizado.

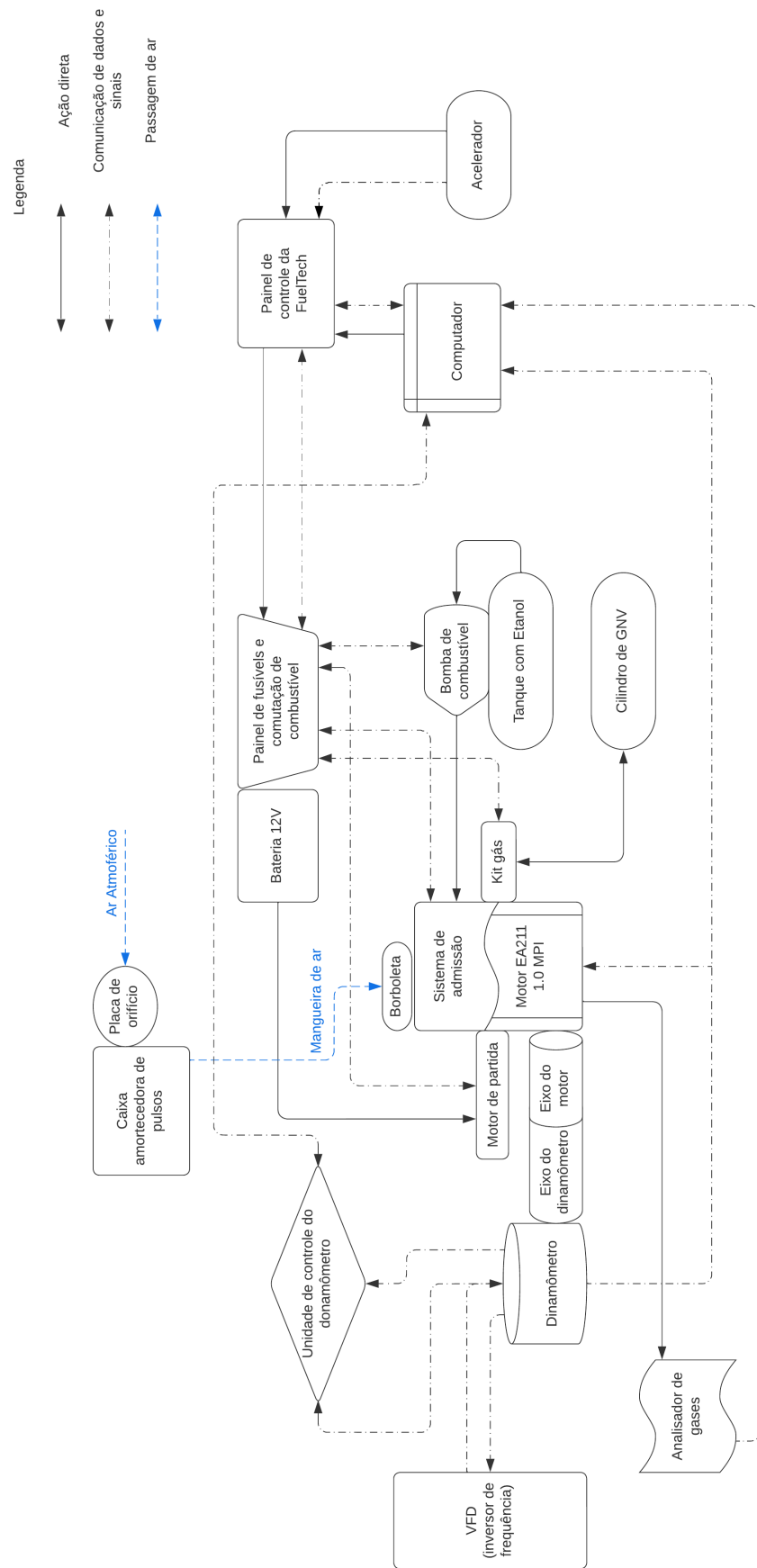


Figura 11 – Motor EA 211 1.0 MPI Volkswagen na bancada de testes

### 3.1 Medição de fluxo de ar

A maneira de se medir o fluxo de ar no laboratório é através da placa de orifício, localizada na caixa amortecedora. Para que sejam obtidos resultados coerentes, foi feita a calibração do sistema. Essa calibração consistiu na montagem do sistema e obtenção do coeficiente de descarga, para se obter o fluxo de ar desejado.

A caixa amortecedora, ou tanque de estabilização, se localizava dentro do laboratório, ao lado do motor, evitando perdas de cargas devido a distância do motor. Em uma parede da caixa está a placa de orifício, sendo o canal da passagem de ar para dentro da caixa. Na placa, existe uma conexão para que seja ligada à ela um manômetro diferencial, localizado dentro do laboratório e com água dentro de seu tubo em "U". Na parede oposta da caixa, há um curto tubo de seção circular saindo da caixa. Ele é a saída para essa passagem de ar. Nele, foi encaixado um tubo pouco maleável para conectar na TBI conectada na admissão do motor, que se encontrava dentro do laboratório. Segundo Brunetti (2012a), o sistema de medição de consumo de ar induzido para um motor pode ser conforme apresentado na Figura 12. Este sistema foi instalado, de forma bastante similar, no laboratório, permitindo seguir a mesma rotina de cálculo indicada pelo autor.

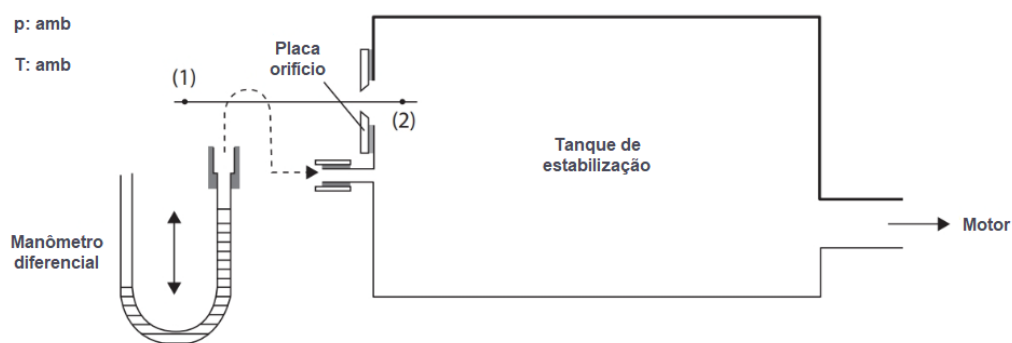


Figura 12 – Disposição esquemática para a medida do consumo de ar para o motor. Adaptado de Brunetti (2012a)

Para rodar o teste no motor, foi necessário, primeiramente, calibrar o sistema recém instalado. Uma forma encontrada para isto foi utilizando um aparato que gerasse fluxo constante, para que assim, pudesse ser obtido o coeficiente de descarga desse sistema. Na Figura 12, em uma das extremidades do tanque de estabilização, conecta-se a admissão do motor. Para a calibração do sistema, o motor foi substituído pelo aparato de fluxo constante. Este aparato era um aspirador de pó Universal BT-VC 1250 S-220. Seu fluxo foi obtido a partir do diâmetro da seção transversal, utilizando um paquímetro Eccofer, e da velocidade do fluxo, apresentada através de um anemômetro, mostrado na Figura 18, Anexo A. Utilizaram-se as Eq. B.5 e B.6 do Anexo B para o fluxo de ar do aparato. Adaptando o aspirador ao sistema e removendo possíveis vazamentos de ar, este foi ligado

e foi observada uma diferença de altura no manômetro diferencial. Isto ocorreu devido à pressão negativa causada pela sucção do aspirador.

Com a vazão conhecida no sistema, foi possível obter o coeficiente de descarga do bocal (tubo) através da Eq. 2.7 e conectar o motor EA211 MPI novamente no sistema. Após a calibração, o manômetro diferencial foi substituído por um digital Dwyer Series 477, como o mostrado na Figura 17, do Anexo A. O teste foi realizado e os dados foram registrados. A Figura 13 apresenta o diagrama da caixa conectada no motor, juntamente do manômetro digital, após a calibração do sistema e pronta para o ensaio. A calibração foi realizada apenas com o manômetro diferencial devido à equação utilizada para tal fim, além do sistema de medição ter capacidade para apenas um manômetro.

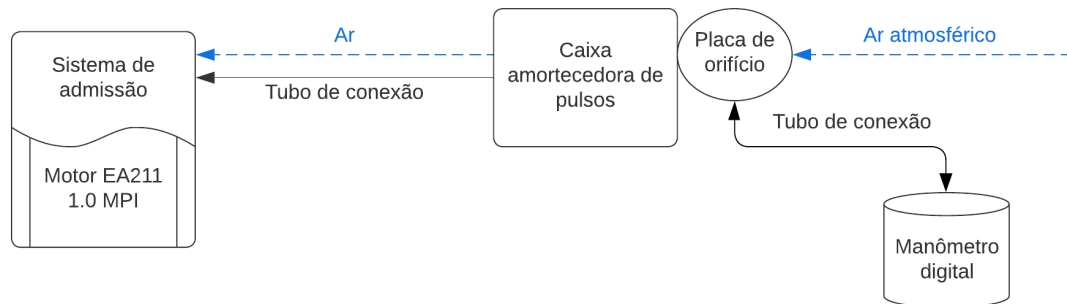


Figura 13 – Diagrama do sistema implementado para medição da vazão de ar no motor

Os resultados da calibração estão apresentados no Anexo B, com suas equações e incógnitas, apresentadas da Eq. B.1 à B.10, no Anexo B. Com eles, foi possível também obter os valores de coeficientes de descarga tanto do bocal quanto da placa, calculados a partir da velocidade do ar, seções transversais das áreas da placa e do bocal, além das vazões de ar.

A vazão de ar na admissão do motor é encontrada através do cálculo do fluxo por meio do modelo densidade de velocidade (speed density), segundo Brunetti (2012a) e apresentada na Eq. 3.1. Este modelo utiliza de dados obtidos a partir dos sensores do motor, como pressão e temperatura, que são lidos pela *FuelTech*. O resultado obtido a partir deste método deve ser comparado com o medido anteriormente buscando convergência ou divergência.

$$\dot{m}_{ar} = \frac{\rho \cdot V \cdot n}{2} \cdot \eta_v \quad (3.1)$$

$$\rho = \frac{p}{RT}$$

Com:

- $\rho$ : densidade do ar atmosférico local [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];
- $V$ : volume do ar [ $\text{m}^3$ ];
- $n$ : rotações do motor [RPM];
- $\eta_v$ : eficiência volumétrica do motor;
- $p$ : pressão [Pa];
- $R$ : constante universal dos gases =  $0,287$  [ $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ];
- $T$ : temperatura média ambiente [K].

## 3.2 Medição de vazão de combustível

Existem alguns métodos de medição de vazão de combustível no motor, seja ele líquido ou gasoso. Para o etanol, será utilizada a medição gravimétrica. Outras formas de medições foram descartadas devido a inviabilidade do laboratório para estes outros métodos.

O fluxo mássico de combustível, a partir da medição gravimétrica, é obtido a partir da diferença de massa. Inicialmente, é preenchido o tanque de combustível com etanol. O tanque é colocado em cima da balança Toledo modelo 9094C/5, resolução de 5 dígitos. Em seguida, foi iniciado o teste. No início e fim de cada minuto marcado no teste, foi anotada a massa apresentada na balança. Esta diferença de massa ( $\Delta g$ ) é dividida por 60s e tem-se a vazão real em kg/s. A Figura 14 apresenta o tanque contendo etanol sobre a balança. Os dados serão posteriormente comparado com os obtidos na *FuelTech*.

Considerando que o motor a combustão utilizado é originalmente configurado para funcionar exclusivamente com gasolina e etanol como combustíveis, é necessário realizar adaptações nos sistemas de injeção de combustível e de ignição, além de outros parâmetros essenciais para garantir a eficiência no uso do gás GNV. Essa adaptação, juntamente com os componentes necessários para corrigir os tempos de injeção, é denominada "Kit Gás" neste estudo. O "kit gás" é instalado com o propósito de ajustar os tempos de injeção e o avanço do motor. O esquemático da Figura 19, Anexo A, foi obtido no manual de instalação do kit, fornecido pela STAG. Os principais instrumentos presentes são: válvula reguladora de pressão, válvula de cilindro, cilindro de GNV, central eletrônica do gás, sensor  $T_{MAP}$ , manômetro e bicos injetores.

O módulo de controle Autogas ECU STAG 200 Gofast é uma central eletrônica versátil que oferece suporte à injeção de gás em diferentes modos: sequencial, semi-sequencial

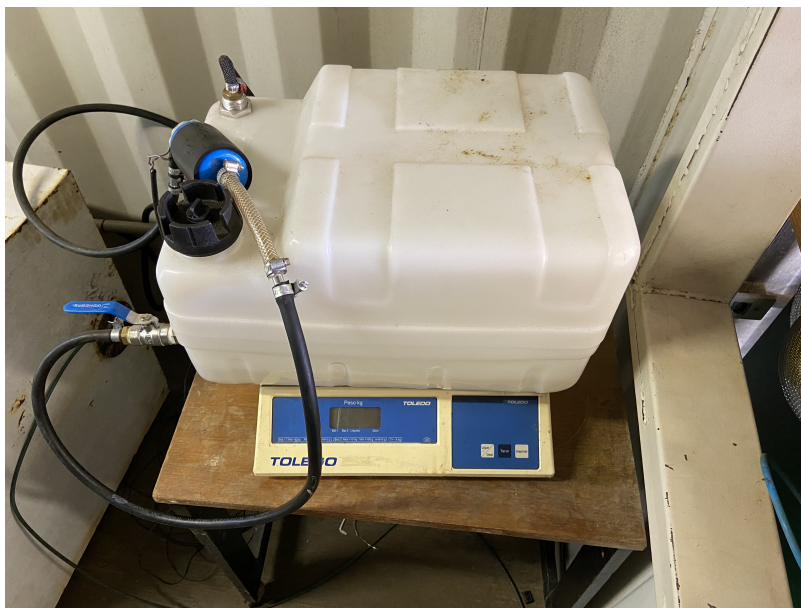


Figura 14 – Tanque de combustível contendo etanol sobre balança para ensaio de medição gravimétrica

e direta. Ela trabalha em conjunto com a FT550, e não funciona de maneira isolada, sendo necessária a FT550 funcionando como central principal do motor. Ela pode ser vista na Figura 15. Ao ser instalado e conectado ao motor através de um software especializado, a ECU STAG assume o controle da injeção de gás, garantindo o desempenho adequado do motor. Ela leva em consideração fatores como temperatura do gás, duração da abertura dos injetores durante cada ciclo e pressão do gás nos dutos para otimizar o funcionamento geral. Ao medir o tempo de injeção de gás no cilindro, multiplica-se pelo número de bicos (no caso do motor em estudo, três), vezes a vazão de cada bico, que é pré-definida pela marca. Com isso, tem-se o fluxo de gás no motor.

Para este experimento, realizam-se os mesmos passos dos combustíveis líquidos: após estabilização do motor ligado, realizar medições em 60 segundos para as rotações já mencionadas, com exceção de 6000 RPM. Maiores detalhes sobre a operação com GNV consultar o trabalho apresentado por [Garcia \(2022\)](#).

### 3.3 Medição do fluxo de fluido de arrefecimento

O arrefecimento do motor em estudo é feito por meio líquido em circuito fechado. Para se contabilizar a quantidade de calor rejeitado neste sistema, a medição da temperatura e do fluxo mássico é requerida. A forma de medir a vazão de água, que é o fluido de arrefecimento do motor no laboratório, é através da equação apresentada por [Brunetti \(2012b\)](#), onde a vazão de uma bomba d'água, em motor de combustão interna, em função da queda de temperatura no trocador de calor e da potência efetiva do motor, conforme



Figura 15 – Unidade de controle eletrônica do Kit Gás

a Eq. 3.11 a seguir:

$$\dot{V}_w = \frac{632 \cdot Ne \cdot fs}{\Delta T} \quad (3.2)$$

sendo as incógnitas:

- $\dot{V}_w$ : vazão de água [L/min]
- $\Delta T$ : queda de temperatura do radiador [°C]
- Ne: potência efetiva do motor [cv]
- fs: fator de segurança (recomendado) = 1,05%

Devido a inviabilidade no laboratório, não foi possível acoplar um rotâmetro na linha de arrefecimento para medir vazão da água. Portanto, foi utilizado apenas a equação de vazão da bomba d'água.

Finalizando toda a metodologia de ensaio do motor para obter as respectivas vazões, os resultados encontrados e suas análises estão apresentadas no Capítulo 4.



## 4 Resultados

A partir dos procedimentos apresentados no capítulo anterior, foram obtidos resultados dos fluxos de ar, combustíveis e fluido de arrefecimento. Para isto, este capítulo está dividido em cinco seções, sendo a primeira os resultados de calibração do sistema, em seguida os fluxos e, por fim, o comparativo com os dados da FuelTech. A Tabela 5 apresenta alguns dados iniciais para o cálculo do fluxo de combustível.

Tabela 5 – Dados a serem utilizados no cálculo do fluxo de combustível etanol

Variável	Valor
Volume do motor	0,000999 [ $m^3$ ]
Vazão dos injetores	0,0065 [kg/s]
Densidade do etanol	811 [kg/ $m^3$ ]
Número de injetores	3
Razão ar-combustível estequiométrico ( $\lambda_e$ )	9
Constante universal dos gases (R)	0,287 [kJ/kg · K]
PCI etanol	7 [kWh/kg]

Fonte: o autor.

### 4.1 Calibração

A calibração do sistema foi feita de acordo com a metodologia apresentada na seção 3.1. Para isto, a Tabela 6 apresenta os valores obtidos desta calibração. O memorial de cálculo dos dados obtidos na tabela está apresentado da Eq. B.1 à Eq. B.10, no Anexo B.

Tabela 6 – Variáveis do equacionamento para fluxo mássico de ar, coeficientes de descarga e seus valores

Variável	Valor
$T_{amb}$	$27,0 \pm 0,05^\circ C$
$p_m$	$102kPa$
$\rho_{ar}$	$1,2929kg/m^3$
$p_{bocal}$	$8,0 \pm 0,05Pa$
$D_b$	$0,0889 \pm 5 \cdot 10^{-5} m$
$D_T$	$0,0445 \pm 5 \cdot 10^{-5} m$
$D_a$	$0,032 \pm 5 \cdot 10^{-4} m$
$v_t$	$12,58 \pm 5 \cdot 10^{-3} m/s$
$v_{bocal}$	$3,542 \pm 5 \cdot 10^{-4} m/s$
$v_{ar}$	$41 \pm 0,5m/s$
$A_b$	$6,21 \cdot 10^{-3} \pm 5 \cdot 10^{-6}m^2$
$A_t$	$1,556 \cdot 10^{-3} \pm 5 \cdot 10^{-6}m^2$
$A_a$	$8,04 \cdot 10^{-4} \pm 5 \cdot 10^{-6}m^2$
$\dot{m}_{ar}$	$0,042 \pm 5 \cdot 10^{-4} kg/s$
$\dot{m}_{ar_t}$	$0,025 \pm 5 \cdot 10^{-4} kg/s$
$\dot{m}_{ar_b}$	$0,028 \pm 5 \cdot 10^{-4} kg/s$
$C_{D_{placa}}$	$0,595 \pm 5 \cdot 10^{-4}$
$C_{D_{bocal}}$	$0,667 \pm 5 \cdot 10^{-4}$

Fonte: o autor.

A calibração do sistema permitiu obter os dados apresentados na Tabela 6. Com a obtenção dos valores dos coeficientes de descarga, é possível obter os resultados do fluxo de ar do motor em diferentes rotações. A validação deste método de calibração ocorrerá após o ensaio, com a convergência dos dados obtidos através dos sensores e dos resultados analíticos.

Os dados obtidos no Log da FuelTech apresentaram 10400 linhas de dados para todo o ensaio, incluindo alguns parâmetros que não são necessários neste estudo. Para que sejam analisados apenas os dados importantes, foi calculado o desvio padrão do fluxo de combustível obtido na FT550, sendo este de 3%. Para as demais medidas, como temperatura ambiente, pressão no manômetro digital e massa do etanol, foi utilizada a incerteza tipo B, pois foi realizado apenas um ensaio, e o erro considerado foi a metade da menor divisão da escala do instrumento.

## 4.2 Fluxo de ar

A Eq. 2.7 foi utilizada para a obtenção do coeficiente de descarga utilizando o manômetro diferencial. Para o cálculo do fluxo mássico de ar no motor, foi utilizada a Eq. 4.1, apresentada por Brunetti (2012a).

$$\dot{m}_{ar} = C_{D_P} \cdot A_P \cdot \sqrt{-2 \cdot \rho_a \cdot p_2} \quad (4.1)$$

Sendo:

- $\dot{m}_{ar}$ : fluxo mássico de ar [kg/s];
- $C_{DP}$ : coeficiente de descarga da placa;
- $A_P$ : área da placa de orifício [ $m^2$ ];
- $\rho_a$ : densidade do ar [ $kg/m^3$ ];
- $p_2$ : pressão na placa de orifício lida pelo manômetro [Pa].

Os resultados obtidos a partir do experimento estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados obtidos para fluxo mássico de ar a partir do ensaio

Rotações (RPM)	Coefficiente de Descarga ( $C_D$ )	Área da placa de orifício ( $m^2$ )	Densidade do ar ( $kg/m^3$ )	Pressão média lida no manômetro digital (Pa)	Vazão de ar (kg/s)
1130	0,595	0,00155179	1,205	-1,5	0,001755629
2000	0,595	0,00155179	1,210	-6,5	0,00366178
3000	0,595	0,00155179	1,209	-26,5	0,007391128
4000	0,595	0,00155179	1,208	-36,5	0,008672083
5000	0,595	0,00155179	1,208	-63	0,011389369
6000	0,595	0,00155179	1,207	-128	0,016228816

Fonte: o autor.

Durante o ensaio, foi obtido o valor da razão ar-combustível apresentado pela sonda lâmbda, sensor que mostra a riqueza da mistura. Com este dado e a vazão de combustível, apresentado seu método de cálculo na próxima seção, obteve-se a vazão de ar na FuelTech. Sua equação está apresentada na Eq. 4.2.

$$\dot{m}_{ar} = AF_{estequiométrico} \cdot \lambda_{FT} \cdot \dot{m}_{comb} \quad (4.2)$$

Sendo:

- $\dot{m}_{ar}$ : vazão de ar [kg/s];
- $AF_{estequiométrica}$ : razão ar-combustível estequiométrica;
- $\lambda_{FT}$ : razão ar-combustível apresentada na FuelTech;
- $\dot{m}_{comb}$ : vazão de combustível [kg/s].

Os resultados da vazão de ar obtidos a partir de leituras da FT estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Dados obtidos de leituras da *FuelTech* do fluxo de ar a partir do ensaio

Rotações (RPM)	$\lambda_e$	Lâmbda FuelTech	Vazão de combustível (kg/s)	Vazão de ar - FuelTech (kg/s)
1130	9,0	1,002	0,000192026	0,001731691
2000	9,0	1,008	0,000384828	0,003491157
3000	9,0	1,009	0,000793303	0,007203983
4000	9,0	0,943	0,001069344	0,009075523
5000	9,0	0,977	0,001223121	0,010754902
6000	9,0	0,977	0,001759344	0,015469913

Fonte: o autor.

## 4.3 Fluxo de combustível

Por se tratar de diferentes combustíveis, os resultados obtidos do ensaio com etanol estão apresentados na subseção 4.3.1, enquanto que a subseção 4.3.2 apresenta os resultados do ensaio com GNV.

O fluxo de combustível foi analisado para combustível líquido, sendo o etanol, e gasoso, sendo o GNV. Assim, esta seção foi dividida em duas subseções para que os resultados sejam melhores organizados.

### 4.3.1 Etanol

Seguindo com os dados do experimento, a vazão de combustível foi obtida a partir da medição gravimétrica. Sua equação é apresentada a seguir.

$$\dot{m}_{comb} = \frac{m_i - m_f}{t_{real}} \quad (4.3)$$

Com as seguintes variáveis:

- $\dot{m}_{comb}$ : fluxo mássico de combustível [kg/s];
- $m_i$ : massa inicial no ensaio [kg];
- $m_f$ : massa final no ensaio [kg];
- $t_{real}$ : tempo real de ensaio [s].

Os valores da massa inicial e final de combustível para cada rotação estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Dados obtidos para fluxo de combustível a partir do ensaio

Massa etanol (kg)			Tempo real (s)	Vazão de combustível (kg/s)
Massa inicial	Massa final	Diferença		
9,025	9,010	0,015	78	0,00019
9,680	9,645	0,035	86	0,00041
9,610	9,555	0,055	67	0,00082
9,520	9,450	0,070	69	0,00101
9,400	9,300	0,100	78	0,00128
9,260	9,110	0,150	80	0,00188

A razão de ar combustível pode ser expressa como a razão da massa de ar pela massa de combustível. Outra maneira de ser expressa é o fluxo mássico de ar pelo fluxo mássico de combustível. Portanto, é possível obter a razão ar-combustível através dos fluxos mássicos obtidos no teste rodado. Dividindo  $\lambda$  por  $\lambda_e$ , é possível obter a fração relativa do ensaio ( $\lambda_R$ ). A Tabela 10 apresenta os valores de  $\lambda$ ,  $\lambda_e$  e  $\lambda_R$ .

Tabela 10 – Dados obtidos da razão ar-combustível e da razão estequiométrica

Rotações (RPM)	Vazão de ar (kg/s)	Vazão de combustível (kg/s)	$\lambda$	$\lambda_e$	$\lambda_R$
1130	0,001755629	0,00019	9,129	9,0	1,014
2000	0,00366178	0,00041	8,998	9,0	1,000
3000	0,007391128	0,00082	9,004	9,0	1,000
4000	0,008672083	0,00101	8,548	9,0	0,950
5000	0,011389369	0,00128	8,884	9,0	0,987
6000	0,016228816	0,00188	8,655	9,0	0,962

Os resultados obtidos também permitem obter o gráfico apresentado na Figura 16, que mostra a potência de atrito e a eficiência do combustível (bsfc) pelas rotações do motor. Nele, é possível observar que, a medida que as rotações aumentam, a potência de atrito aumenta até se estabilizar, a partir de 4000 RPM, enquanto que bsfc tem uma queda até os 4000 RPM, e depois volta a subir. Isto indica que o consumo do combustível em questão reduz na faixa de 2500 a 4000 RPM, aumentando em seguida. A Tabela 14, no Anexo C apresenta os demais resultados do ensaio de combustível, obtidos pelo tempo de injeção. Seus equacionamentos foram apresentados no Anexo D.

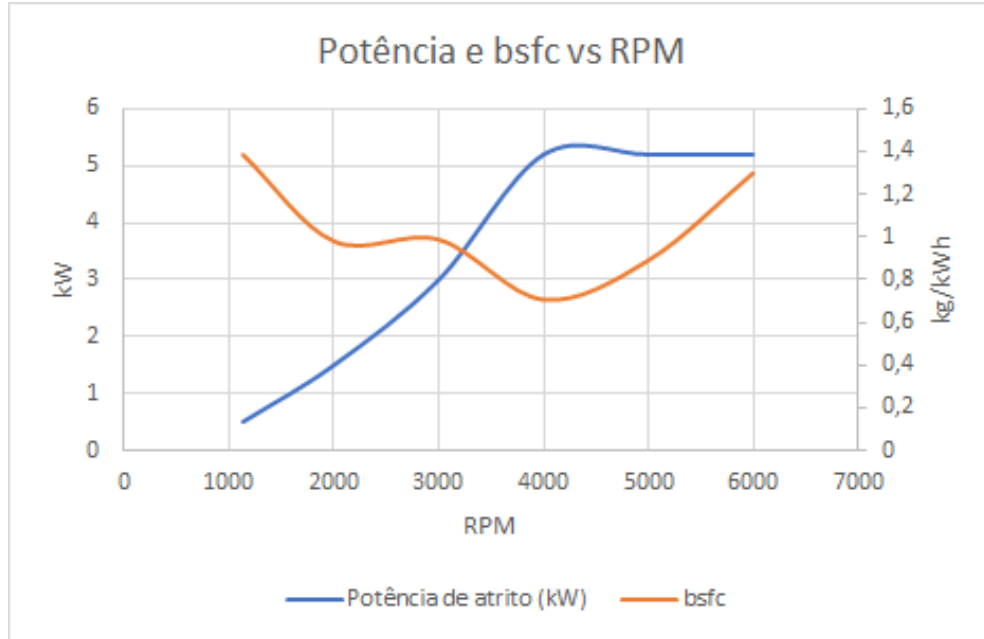


Figura 16 – Gráfico da potência de atrito e bsfc pelas rotações do motor operando sem carga

Ao obter o fluxo de combustível, foi necessário encontrar esse fluxo na FT. Para isto, utilizou-se a Eq. 4.4.

$$\dot{m}_{comb_{FT}} = \frac{n_{injetores} \cdot \dot{Q}_{etanol_{FT}} \cdot \lambda_{FT}}{\lambda_e} \quad (4.4)$$

Onde

- $\dot{m}_{comb_{FT}}$ : vazão de combustível calculada a partir de dados obtidos pela FT [kg/s];
- $n_{injetores}$ : número de injetores;
- $\dot{Q}_{etanol_{FT}}$ : vazão de etanol apresentado pela FT [kg/s];
- $\lambda_{FT}$ : razão ar-combustível apresentada pela FT;
- $\lambda_e$ : razão ar-combustível estequiométrica.

### 4.3.2 GNV

O teste realizado no laboratório para o GNV foi o mesmo realizado pelo autor Garcia (2022). Seus resultados foram utilizados neste trabalho para a obtenção do fluxo de combustível gasoso para diferentes rotações. Como o teste mencionado no capítulo anterior foi o mesmo realizado em ambos os trabalhos, seus resultados serão apresentados aqui.

A avaliação ocorre através da observação de cada um dos diferentes modos de rotação sugeridos, registrados em intervalos de cerca de 60 segundos, dependendo da qualidade da coleta de dados durante o teste. É importante destacar que a qualidade da coleta de dados está relacionada ao tempo em que o modo de rotação foi mantido e ao desempenho resultante do motor. Por último, alguns valores médios obtidos para cada modo de rotação são mostrados na Tabela 13, no Anexo C (GARCIA, 2022).

Foi notado por Garcia (2022), para a marcha lenta, aproximadamente 1170 RPM, que a pressão manteve uma variação entre -0,78 bar e -0,77 bar, equivalente a -78 kPa e -77 kPa, respectivamente. Os valores de  $\lambda$  variaram entre 0,89 e 1,08. Isto indica que a mistura teve uma oscilação, sendo rica em alguns momentos, e pobre em outros. Esta variação indica uma possível falha no envio de informações da central de injeção para a ECU, ou até mesmo uma dificuldade no acerto da injeção do sistema para que a mistura se mantenha mais constante, apontando que a adaptação para GNV precisa de mais correções de injeção ou transmissão de informações entre centrais.

A pressão para 2000 RPM foi levemente maior, resultando em -80 kPa. A válvula borboleta estava aberta aproximadamente 2,8% para este ensaio. Já a razão apresentada por  $\lambda$  seguiu apresentando variação, entre 0,86 e 1,12, indicando mistura rica e pobre, respectivamente. A justificativa para esta alta variação é a mesma utilizada para a marcha lenta.

Ao aumentar a abertura da válvula borboleta, aumenta a quantidade de ar admitida nos cilindros, o que implica um aumento na pressão admitida pelo motor. Consequentemente, a rotação do motor aumenta. E foi isto que o ensaio com 3000 RPM apresentou: o aumento na rotação para 3000 RPM, aumento na pressão admitida para -84 kPa e maior abertura da válvula borboleta, para 5,1%.

Em contrapartida, o  $\lambda$  apresentado continua variando com valores de 0,88 a 1,08. Isto mostra que a mistura segue alternando entre rica e pobre, indicando erro na injeção adequada de GNV nos cilindros. Porém, é possível observar uma redução na amplitude dos valores apresentados, indicando que, com uma rotação mais alta, a injeção do gás se mantém levemente mais estável, quando comparado com os dados anteriores.

Para o ensaio de 4000 RPM, houve uma pequena variação na pressão, fluando entre -84 kPa e -85 kPa. A válvula borboleta aumentou sua abertura para 7,5%, o que é esperado para o aumento de rotação e pressão admitida. A mistura neste ensaio variou entre 0,93 e 0,97, reduzindo a alta amplitude de valores e, desta vez, se mantendo a mistura rica. Isto mostra que, para rotações cada vez maiores, o sistema de injeção, junto da central e dos sensores, tende a se manter estável.

Os dados apresentados para 5000 RPM apresentaram uma diminuição da pressão admitida, de -82 kPa, em oposição à válvula borboleta, que teve um aumento de sua aber-

tura para 9,7%. O  $\lambda$  teve uma leve variação, de 0,93 a 0,95, indicando uma estabilização nos valores da mistura rica.

Em rotações elevadas, notou-se que a injeção de GNV no motor foi mais estável, apresentando apenas mistura rica. No entanto, o ensaio para rotações abaixo de 4000 RPM indicou muita estabilidade na mistura do combustível, sendo ora mistura pobre, ora mistura rica em cada ensaio. Isso mostrou que o sistema de injeção é bastante irregular nestas rotações, indicando alguma irregularidade na unidade de controle ou até mesmo no próprio sistema de injeção.

A definição de que o problema pode ser um destes dois fatores se dá pelo fato de que o erro foi na injeção do combustível e não na quantidade de ar admitida, visto que o sistema de medição do fluxo de ar foi calibrado e obteve valores sólidos. Além disso, os valores do sensor MAP indicando a pressão do ar exercida no motor indicou estabilidade nos seus valores, excluindo assim qualquer falha na admissão do ar.

#### 4.4 Fluxo do fluido de arrefecimento

Os resultados para o fluido de arrefecimento são obtidos através da Eq. 3.2. Para se obter a vazão de água da bomba d'água, foi necessário obter a potência efetiva do motor (82 cv), fator de segurança (1,05%) e a temperatura foi a mesma para todas as rotações (89°C). Assim, a vazão de água foi de 6,11 L/min. Como o volume do fluido de arrefecimento é muito maior que 1L no seu sistema, o fluido percorre todo o sistema de arrefecimento em menos de 10 segundos.

#### 4.5 Comparativo entre resultados analíticos e Log da FuelTech

A importância de se comparar os dados obtidos e calculados com os apresentados na FuelTech é importante pois pode-se observar a convergência ou divergência dos dados. A convergência dos dados mostra que os métodos aplicados para os cálculos de vazão de ar e combustível estão próximos das medições dos sensores, o que indica a validade dos métodos aplicados no laboratório para análise dos parâmetros do motor.

A validação do ensaio para fluxo de ar partiu da comparação dos resultados calculados e dos apresentados na FT550. Esta comparação pode ser vista na Tabela 11.



Tabela 11 – Comparativo entre vazão de ar obtida experimentalmente e na *FuelTech*

Rotações (RPM)	Vazão de ar <i>FuelTech</i> (kg/s)	Vazão de ar Real (kg/s)	Desvio no fluxo de ar
1130	0,001731691	0,001755629	1%
2000	0,003491157	0,00366178	5%
3000	0,007203983	0,007391128	3%
4000	0,009075523	0,008672083	5%
5000	0,010754902	0,011389369	6%
6000	0,015469913	0,016228816	5%

Observando o desvio no fluxo de ar, percebe-se valores baixos quando comparados entre si. Isto indica que os dados calculados foram próximos dos apresentados pela ECU programável. Com esta convergência de dados, pode-se concluir que o sistema foi calibrado de maneira correta e o ensaio de fluxo de ar trouxe valores fidedignos.

Os resultados obtidos a partir do Log da FuelTech para o fluxo de combustível foram apresentados na Tabela 12. O fluxo de etanol apresentado na FT, em kg/s, foi obtido a partir da conversão dos dados obtidos na própria FT, em lb/h. Também foi apresentado o  $\lambda$  na FT e comparado com o  $\lambda$  real.

Tabela 12 – Comparativo entre vazão de etanol obtida experimentalmente e na *FuelTech*

Rotações (RPM)	Vazão de combustível <i>FuelTech</i> (kg/s)	Vazão de combustível Real (kg/s)	Desvio no fluxo de combustível
1130	0,000192026	0,000192308	0%
2000	0,000384828	0,000406977	5%
3000	0,000793303	0,001014493	22%
4000	0,001069344	0,001282051	17%
5000	0,001223121	0,001282051	5%
6000	0,001759344	0,001875	6%

O resultado da vazão de combustível observado na FT pode ser calculado como número de injetores vezes  $\lambda$  medido na FT vezes o fluxo de etanol apresentado, dividido por  $(\lambda_e + 1)$ . Este resultado, quando comparado com a vazão de combustível real, mostra o desvio no fluxo de combustível do ensaio. Em paralelo, a vazão de ar na FT foi calculado a partir da multiplicação entre  $\lambda_e$ , o fluxo de etanol na FT e o  $\lambda$  medido na FT. Ao comparar com a vazão de ar real, obteve-se o desvio no fluxo de ar.

Analisando os dados do desvio, notou-se uma convergência nos valores abaixo de 3000 RPM e acima de 4000 RPM. Para estas duas rotações, houve uma certa divergência nos resultados, atingindo quase 25% de desvio, o que indica erro no ensaio para essas rotações. Problemas como injeção do combustível ou até erro em comunicação das centrais podem ser um dos motivos. Como 66% dos dados obtidos apresentaram convergência, é descartado um erro de injeção ou de ensaio. Possivelmente, erro humano no momento do ensaio ou até mesmo alguma falha do sistema para estas rotações podem ter sido a causa da diferença nos valores.

## 5 Conclusão

Após os resultados obtidos do ensaio apresentado na metodologia, foi possível analisar os resultados e concluir que, de maneira geral, o ensaio apresentou resultados coerentes e dentro do esperado, convergindo em sua grande maioria com os apresentados na *FuelTech*.

Primeiramente, os sistemas de medição de vazão de ar e combustível líquido tiveram que ser implementados no laboratório, e o sistema da medição do fluxo de ar, calibrado. Feito isto, estavam pronto para funcionar. Ao realizar o ensaio, para o fluxo de ar, foi observado a partir do manômetro digital os valores da pressão exercida pelo motor no sistema. Estes resultados permitiram calcular a vazão de ar neste sistema. Em paralelo, os sensores de pressão e temperatura do ar estavam obtendo dados na *FuelTech* deste mesmo ensaio. Utilizando o método de *speed density*, foi possível obter a vazão de ar a partir destes sensores.

Comparando os resultados dos dois métodos, foi observada convergência nos resultados. Para o ensaio na marcha lenta, 2000, 3000, 4000, 5000 e 6000 RPM, os resultados convergiram, obtendo um desvio padrão de, respectivamente, 1%, 5%, 3%, -5%, 6% e 5%. Estes valores mostram que o ensaio, como um todo, convergiu, indicando que o sistema de medição está calibrado e os dados obtidos estão coerentes.

O ensaio de combustível também ocorreu para as mesmas rotações. Os resultados obtidos do fluxo de combustível para a medição gravimétrica foram comparados com a vazão de combustível apresentada pela *FuelTech*. O desvio padrão para cada rotação, seguindo a mesma ordem do ensaio do fluxo de ar foi: 0%, 5%, 22%, 17%, 5% e 6%. Estes resultados mostraram que não houve convergência em todo o ensaio. Para as rotações 3000 e 4000 RPM, houve um desvio muito alto, indicando que o sistema não obteve resultados coerentes. Isto pode ter ocorrido por diversos motivos, como erro na injeção do combustível, erro na comunicação entre centrais, sonda lâmbda enviando dados errados.

O ensaio para o fluido de arrefecimento mostrou a vazão da bomba d'água. Como a temperatura da água foi considerada a mesma para todo o ensaio, não houve diferença de vazão por parte dela. O resultado obtido indica a capacidade de rotação da bomba, e seu método de medição pode ser utilizado em outros ensaios, tanto com diferentes combustíveis, quanto com diferentes motores de bancada.

Por fim, os sistemas de medição de vazão de ar, combustível (etanol) e fluido de arrefecimento foram implementados no laboratório, todos apresentando resultados e sendo validados posteriormente. O sistema utilizado para o fluxo de ar teve que ser previamente calibrado. Ao realizar o ensaio, foram obtidos, em paralelo, os dados provenientes dos

sensores do motor, apresentados pela *FuelTech*. Estes resultados obtidos experimentalmente foram confrontados com os da FT, observando a convergência nos dados da vazão de ar para todas as rotações do ensaio. Para o ensaio do combustível líquido, houve um pequeno desvio com algumas rotações, enquanto que o restante dos dados convergiram. Os resultados para a vazão da bomba d'água indicaram sua capacidade de vazão com a água a 89 °C. O GNV apresentou certa instabilidade em baixas rotações, e a medida que foram aumentando, a mistura ar-combustível foi se mantendo mais estável e perto da mistura estequiométrica. Apesar disto, a média obtida para cada rotação do ensaio foi muito próxima da estequiométrica, sendo 0,94 para 5000 RPM e 0,99 para 1170 e 2000 RPM.

A implementação destes sistemas de medição no laboratório permite um estudo mais detalhado de motores de bancada que necessitem de validação dos dados ou alteração de seus parâmetros. Para o Projeto Biogás, o próximo passo será a substituição do combustível gasoso, GNV, para o biometano. Hoje, o laboratório está apto para medir a vazão de ar admitido em um motor de bancada, bem como a vazão de combustível líquido e do fluido de arrefecimento, pois os sistemas foram calibrados e validados.

# Referências

- ARDOLINO, F.; PARRILLO, F.; ARENA, U. Biowaste-to-biomethane or biowaste-to-energy? an lca study on anaerobic digestion of organic waste. *Journal of Cleaner Production*, v. 174, p. 462–476, 2018. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617326240>>. Citado na página 29.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. *Fenômenos de Transporte*. [S.l.]: LTC, 2004. ISBN 8521613938. Citado na página 19.
- BRUNETTI, F. *Mecânica Dos Fluidos*. PRENTICE HALL BRASIL, 2008. ISBN 9788576051824. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=QDiQPgAACAAJ>>. Citado 4 vezes nas páginas 16, 21, 22 e 23.
- BRUNETTI, F. *Motores de Combustão Interna*. [S.l.]: Editora Blucher, 2012. v. 1. ISBN 9788521207085. Citado 11 vezes nas páginas 13, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 35, 36 e 41.
- BRUNETTI, F. *Motores de Combustão Interna*. Editora Blucher, 2012. v. 2. ISBN 9788521212942. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=CQm2DwAAQBAJ>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 38.
- CEBGÁS. *Gás Natural*. 2008. Url<https://www.cebgas.com.br/gas-natural>. Citado na página 28.
- FALKOVICH, G. Fluid mechanics. In: \_\_\_\_\_. 2. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2018. p. i–iv. ISBN 978-1-107-12956-6. Citado na página 15.
- FAN, B. et al. Computational study of hydrogen injection strategy on the combustion performance of a direct injection rotary engine fueled with natural gas/hydrogen blends. *Fuel*, v. 328, p. 125190, 2022. ISSN 0016-2361. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236122020294>>. Citado na página 26.
- FILHO, W. B. *Fenômenos de Transporte Para Engenharia*. [S.l.]: LTC, 2006. ISBN 8521614721. Citado na página 19.
- FOX, R.; MCDONALD, A.; PRITCHARD, P. *Introdução à mecânica dos fluidos*. LTC, 2014. ISBN 9788521614685. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=WUCGAAAACAAJ>>. Citado 4 vezes nas páginas 15, 19, 20 e 21.
- GARCIA, M. P. R. *Estudo de desempenho de motor três cilindros alimentado com GNV como combustível*. 118 f. Bacharelado — Universidade de Brasília, Brasília, 2022. Citado 3 vezes nas páginas 38, 45 e 46.
- HAASE, M.; WODTKE, M. *Numerical Analysis and Design of Hydrostatic Thrust Bearing for the Laboratory Test Rig*. Tese (Doutorado), 11 2017. Citado na página 17.
- HALL, N. *Boundary Layer*. 2015. Retrieved 17 September 2022. Disponível em: <<https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/boundary-layer/>>. Citado na página 16.

- KUKOYI, T. O. et al. Biogas use as fuel in spark ignition engines. In: *2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1064–1069. Citado na página 29.
- MARTINS, J. *Motores de Combustão Interna*. [S.l.: s.n.], 2006. Citado na página 27.
- MOHAMED, S.; MANSOUR, M.; DEKAM, E. A 5-30 kg/s orifice plate cooling water flow meter design. 03 2017. Citado na página 21.
- MORAN, M.; SHAPIRO, N. *Introdução à engenharia de sistemas térmicos: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor*. Livros Técnicos e Científicos, 2005. ISBN 9788521614463. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=5GtsMwAACAAJ>>. Citado 4 vezes nas páginas 16, 17, 19 e 20.
- NETTO, J. M. A.; FERNÁNDEZ, M. F. y. *Manual de hidráulica*. 9. ed. [S.l.]: Blucher, 2015. Citado na página 17.
- OLIVEIRA, S. et al. Determinação do coeficiente de descarga para orifícios de parede delgada considerando números de reynolds reduzidos. *Revista DAE*, v. 67, p. 24–34, 04 2018. Citado na página 17.
- POPE, S. B. *Turbulent flows*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2011. Disponível em: <<https://cds.cern.ch/record/1346971>>. Citado na página 15.
- SOMMERFELD, A. *Ein Beitrag zur hydrodynamischen Erklärung der turbulenten Flüssigkeitsbewegungen (A Contribution to Hydrodynamic Explanation of Turbulent Fluid Motions)*. 3. ed. [S.l.: s.n.], 1909. 116-124 p. Citado na página 16.
- SOUSA, F. P. d. *PROJETO BÁSICO DE UMA ESTAÇÃO DE MEDIÇÃO DE GÁS NATURAL*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Fluminense, 2020. Citado na página 29.
- SOUSA, R. G. História dos combustíveis. *Brasil Escola*, 2023. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/historia/historia-dos-combustiveis.htm>>. Citado na página 13.
- STAG, A. S. *Connection and programming manual for STAG 200 GoFast controller*. Poland: [s.n.], 2021. v. 1.7. Disponível em: <<https://www.ac.com.pl>>. Citado na página 57.
- WEB, C. na. Ficha técnica volkswagen up 1.0 mpi. *Carros na Web*, 2020. Citado na página 31.
- XAVIER, B. H. *Aspectos termodinâmicos, ecológicos e econômicos de sistemas de cogeração com motores de combustão interna operando com gás natural, biogás e gás de síntese*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista - UNESP, 2016. Citado na página 28.

# Anexos

# ANEXO A – Imagens do aparato experimental



Figura 17 – Manômetro digital utilizado no experimento





Figura 18 – Anemômetro utilizado para medir velocidade

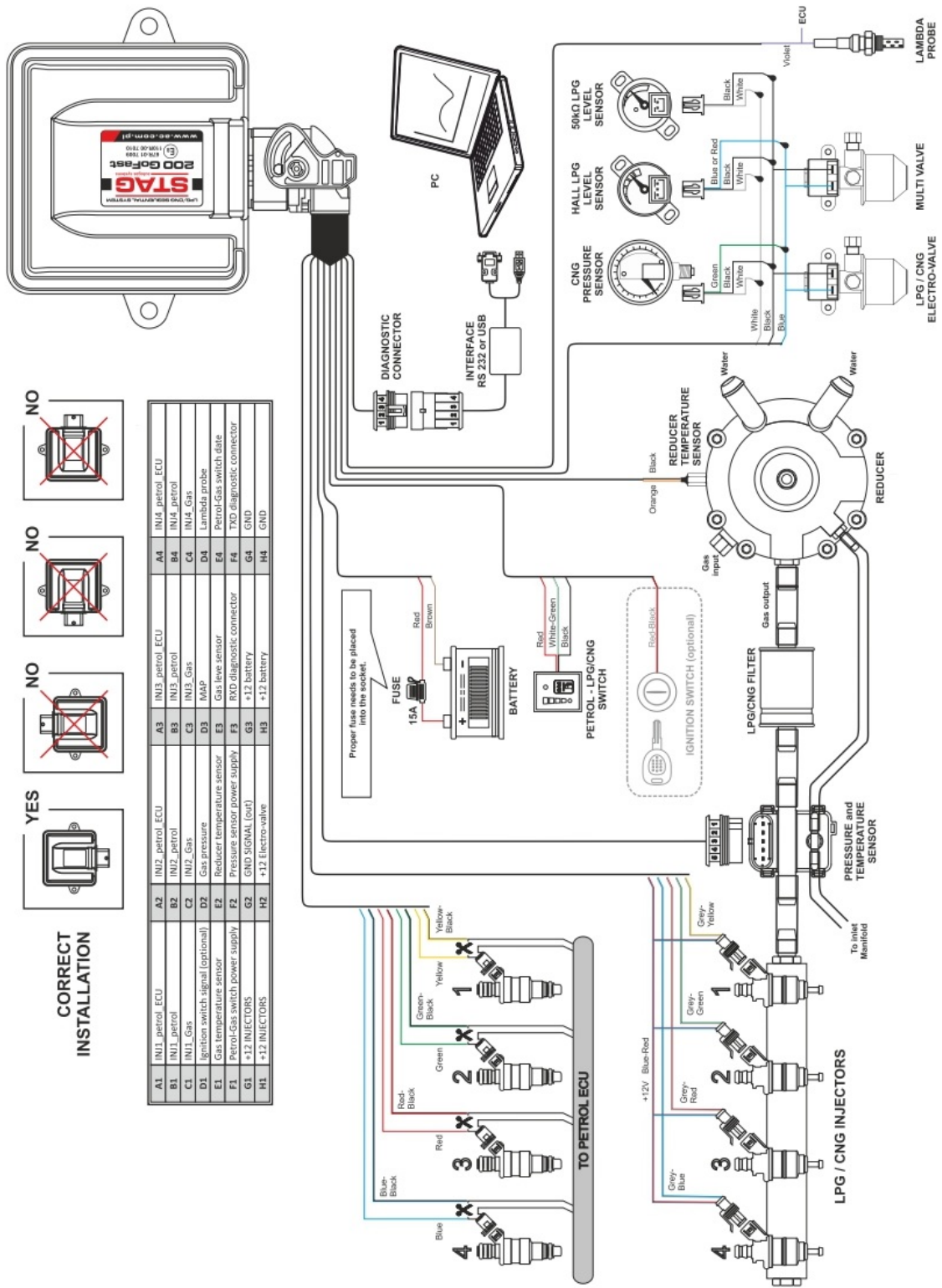


Figura 19 – Diagrama de instalação do kit gás no motor. Fonte: Adaptado de (STAG, 2021).

## ANEXO B – Memorial de cálculo do fluxo de ar

$$v_t = \sqrt{2 \cdot \frac{p_m}{\rho_{ar}}} \quad (\text{B.1})$$

$$v_{bocal} = \sqrt{2 \cdot \frac{p_{bocal}}{\rho_{ar}}} \quad (\text{B.2})$$

$$A_b = \frac{\pi \cdot D_b^2}{4} \quad (\text{B.3})$$

$$A_t = \frac{\pi \cdot D_T^2}{4} \quad (\text{B.4})$$

$$A_a = \frac{\pi \cdot D_a^2}{4} \quad (\text{B.5})$$

$$\dot{m}_{ar} = \rho_{ar} \cdot v_{ar} \cdot A_a \quad (\text{B.6})$$

$$\dot{m}_{ar_t} = v_t \cdot \rho_{ar} \cdot A_t \quad (\text{B.7})$$

$$\dot{m}_{ar_b} = v_{bocal} \cdot \rho_{ar} \cdot A_b \quad (\text{B.8})$$

$$CD_{placa} = \frac{\dot{m}_{ar_t}}{\dot{m}_{ar}} \quad (\text{B.9})$$

$$CD_{bocal} = \frac{\dot{m}_{ar_b}}{\dot{m}_{ar}} \quad (\text{B.10})$$

Sendo:

- $p_{amb}$ : pressão ambiente [kPa];
- $T_{amb}$ : temperatura ambiente [°C];
- $D_b$ : diâmetro na seção do bocal [m];

- $D_T$ : diâmetro na seção da placa de orifício [m];
- $D_a$ : diâmetro da mangueira do aspirador de pó [m];
- $v_{ar}$ : velocidade do ar na mangueira do aspirador de pó [m/s];
- $p_m$ : pressão lida no manômetro de coluna [Pa];
- $p_{bocal}$ : pressão lida no manômetro digital na seção do bocal [Pa];
- $\rho_{ar}$ : densidade do ar [ $kg/m^3$ ];
- $v_t$ : velocidade do ar no tubo da caixa amortecedora [m/s];
- $v_{bocal}$ : velocidade do ar no bocal [m/s];
- $A_b$ : área na seção do bocal [ $m^2$ ];
- $A_t$ : área na seção da placa de orifício [ $m^2$ ];
- $A_a$ : área na seção do aspirador de pó [ $m^2$ ];
- $\dot{m}_{ar}$ : fluxo de massa de ar no aspirador de pó [kg/s];
- $\dot{m}_{ar_t}$ : fluxo de massa de ar na placa de orifício [kg/s];
- $\dot{m}_{ar_b}$ : fluxo de massa de ar no bocal [kg/s];
- $C_{D_{placa}}$ : coeficiente de descarga da placa de orifício [adimensional];
- $C_{D_{bocal}}$ : coeficiente de descarga do bocal [adimensional].

## ANEXO C – Dados obtidos no ensaio

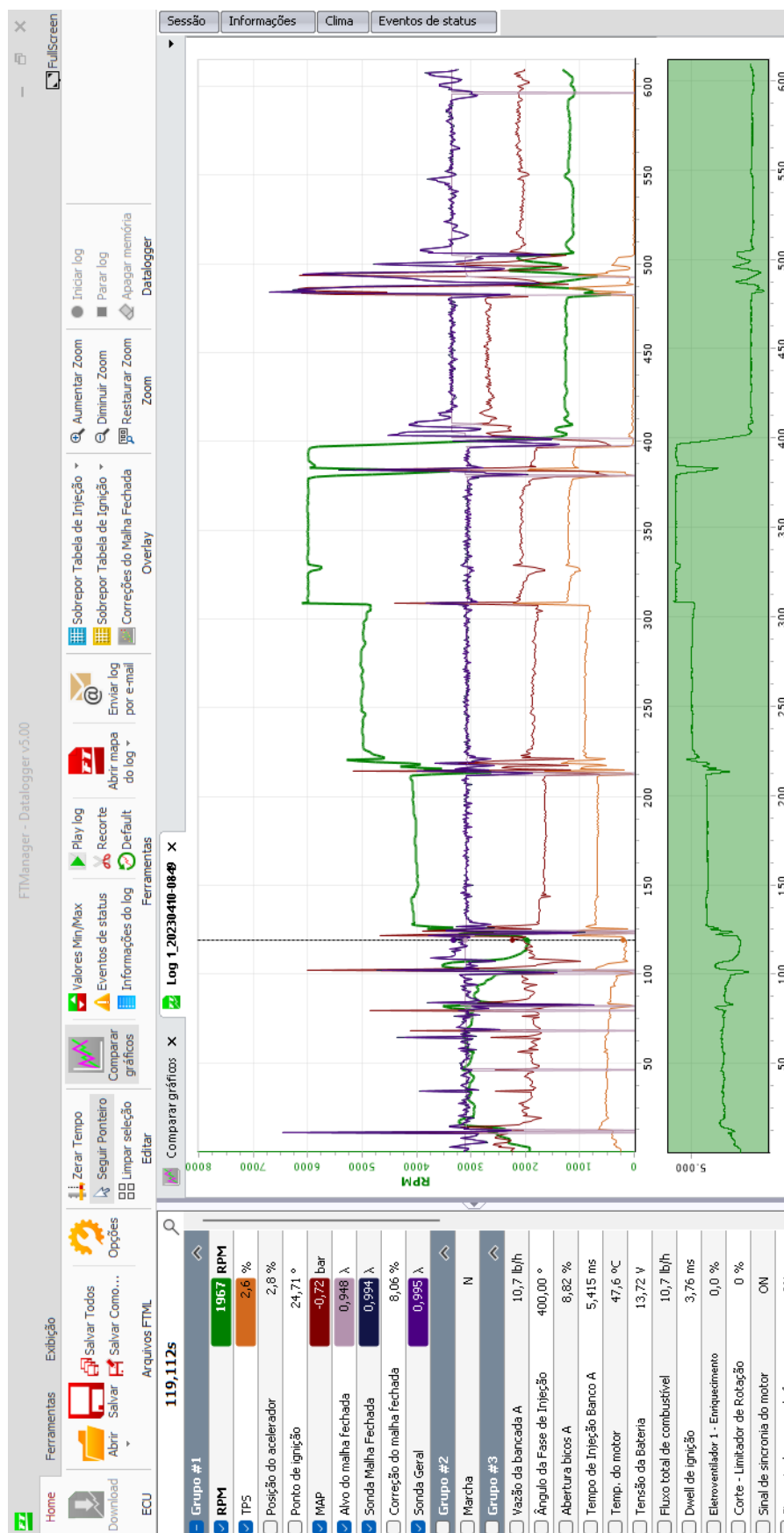


Figura 20 – Log da FuelTech com resultados do ensaio

Tabela 13 – Dados obtidos a partir do ensaio de etanol

Rotações (RPM)	Pressão manômetro digital (mBar)		FuelTech (Bar)		Temperatura ambiente (°C)		Massa etanol (kg)			Tempo real (s)	Temperatura da água (°C)
	Pressão inicial	Pressão final	Pressão inicial	Pressão final	Temperatura inicial	Temperatura final	Massa inicial	Massa final	Diferença		
1130	0,01	0,02	-0,74	-0,72	21,8	22	9,025	9,010	0,015	78	89
2000	0,07	0,06	-0,7	-0,7	20,7	20,8	9,680	9,645	0,035	86	89
3000	0,28	0,25	-0,77	-0,77	20,9	21	9,610	9,555	0,055	67	89
4000	0,38	0,35	-0,79	-0,79	21	21,2	9,520	9,450	0,070	69	89
5000	0,63	0,63	-0,77	-0,77	21,3	21,3	9,400	9,300	0,100	78	89
6000	1,28	1,28	-0,74	-0,74	21,4	21,6	9,260	9,110	0,150	80	89

Tabela 14 – Dados obtidos para fluxo mássico de ar a partir do ensaio

Rotações [RPM]	Densidade de mistura [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	Tempo de injeção [ms]	Vazão de mistura [ $\text{kg}/\text{s}$ ]	Eficiência volumétrica	Potência de atrito [kW]	BSFC	Rendimento
1130	1,34	4,06773521	0,014965049	0,84	0,5	1,384615385	10%
2000	1,34	3,950975261	0,026778502	0,84	1,5	0,976744186	15%
3000	1,34	4,394071351	0,039644796	0,85	3	0,985074627	15%
4000	1,35	4,760781549	0,052949041	0,85	5,2	0,702341137	20%
5000	1,34	4,448144414	0,066085049	0,85	5,2	0,887573964	16%
6000	1,35	4,362808508	0,079856845	0,84	5,2	1,298076923	11%



## ANEXO D – Equações relativas ao ensaio de etanol

$$\dot{m}_f = \frac{m_1 - m_o}{t} \quad (\text{D.1})$$

$$\rho_m = \frac{M_m}{\frac{M_m \cdot Q_f}{\rho_f} + \frac{M_m \cdot Q_a}{\rho_a}} \quad (\text{D.2})$$

$$t_i = \frac{\rho_a \cdot \left(\frac{p_i}{p_o}\right) \cdot \left(\frac{T_o}{T_i}\right) \cdot V_d \cdot e_v}{f \cdot n_i \cdot (A/C)} \quad (\text{D.3})$$

$$\dot{m}_m = \frac{\rho_m \cdot V_d \cdot N}{e_v \cdot x} \quad (\text{D.4})$$

$$e_v = \frac{(0,95 \cdot p_i) - 0,08}{p_i} \quad (\text{D.5})$$

$$bsfc = \frac{3600 \cdot \dot{m}_f}{Pot_{at}} \quad (\text{D.6})$$

$$\eta_e = j \cdot \frac{1}{bsfc \cdot PCI} \quad (\text{D.7})$$

Sendo:

- $\dot{m}_f$ : vazão de combustível [kg/s];
- $m_1$ : massa inicial de combustível [kg];
- $m_o$ : massa final de combustível [kg];
- $t$ : tempo real do ensaio [s];
- $\rho_m$ : densidade da mistura [kg/m<sup>3</sup>];
- $M_m$ : razão ar combustível + 1;
- $Q_f$ : 1/razão ar combustível
- $\rho_f$ : densidade do combustível (etanol) [kg/m<sup>3</sup>];

- $Q_a$ : (AC/AC+1);
- $\rho_a = \rho_o$ : densidade do ar [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];
- $t_i$ : tempo de injeção [ms];
- $p_i$ : média da pressão na FuelTech [bar];
- $p_o$ : pressão atmosférica [kPa];
- $T_o$ : temperatura ambiente no início do teste [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- $T_i$ : temperatura ambiente no final do teste [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- $V_d$ : volume do motor [ $\text{m}^3$ ];
- $e_v$ : eficiência volumétrica;
- $f$ : vazão dos injetores [ $\text{kg}/\text{s}$ ];
- $n_i$ : número de injetores;
- $A/C$ : razão ar combustível;
- $\dot{m}_m$ : vazão de mistura [ $\text{kg}/\text{s}$ ];
- $N$ : rotações do motor [RPM];
- $x$ : metade do número de tempos do motor;
- $bsfc$ : eficiência do combustível [ $\text{kg}/\text{kWh}$ ];
- $Pot_{at}$ : potência de atrito [kW];
- $\eta_e$ : rendimento [%];
- $PCI$ : poder calorífico do etanol [ $\text{kWh}/\text{g}$ ].