

CONEM2026- ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO DE AR NA ADMISSÃO DE UM MOTOR DIESEL UTILIZANDO UM TUBO DE PITOT.

João Vitor da Silva Santos, joao.santos486@academico.ufgd.edu.br¹
Ramon Eduardo Pereira Silva, ramonsilva@ufgd.edu.br²

¹ Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD. Rodovia Dourados/Itahum, km 12; Caixa postal:364 – CEP:79.804-970 – Dourados – MS.

² Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD. Rodovia Dourados/Itahum, km 12; Caixa postal:364 – CEP:79.804-970 – Dourados – MS.

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise experimental do escoamento de ar na admissão de um motor diesel por meio da aplicação dos conceitos da Mecânica dos Fluidos. O estudo teve como objetivo determinar parâmetros fluidodinâmicos do escoamento, como pressão, velocidade e vazão de ar, e avaliar sua variação em diferentes condições de operação. A realização deste tipo de análise é importante para a compreensão do comportamento dos fluidos em sistemas de admissão, contribuindo para a avaliação do desempenho e da eficiência de motores de combustão interna. A metodologia empregada baseou-se na obtenção de dados experimentais de pressão e temperatura, utilizados para o cálculo das variáveis de interesse e para a caracterização do escoamento. Os resultados obtidos demonstraram que o aumento da demanda operacional do sistema promove alterações significativas nas características do fluxo de ar, resultando em maiores valores de velocidade e vazão. A comparação entre os dados experimentais e os fundamentos teóricos permitiu verificar a consistência da metodologia adotada e a aplicabilidade dos conceitos estudados para a análise de escoamentos internos. Dessa forma, conclui-se que a abordagem experimental utilizada possibilitou a obtenção de resultados coerentes com o comportamento esperado do escoamento, contribuindo para a compreensão dos fenômenos fluidodinâmicos envolvidos e para a aplicação prática dos conhecimentos de Mecânica dos Fluidos em sistemas de engenharia.

Palavras-chave: *Tubo de Pitot, Pressão Dinâmica e Pressão estática.*

1. INTRODUÇÃO

A medição da vazão mássica de ar em sistemas de admissão de motores a diesel é um fator essencial para a análise de desempenho, eficiência energética e controle da combustão. A ausência de sistemas de monitoramento acessíveis e precisos ainda representa uma limitação significativa em estudos experimentais e aplicações práticas, dificultando a obtenção de dados confiáveis sobre o comportamento do fluxo de ar em diferentes condições operacionais.

Entre os dispositivos utilizados para a determinação da velocidade de escoamentos fluidos, destaca-se o tubo de Pitot, amplamente empregado em aplicações industriais e experimentais. Seu funcionamento baseia-se na diferença entre a pressão total (de estagnação) e a pressão estática do fluido, conforme estabelecido pelo princípio de Bernoulli, permitindo a obtenção da velocidade do escoamento a partir dessa relação (Çengel; Cimbala, 2018; Fox; McDonald; Pritchard, 2021). Devido à sua simplicidade construtiva e confiabilidade, o tubo de Pitot se apresenta como uma alternativa viável para medições em dutos e sistemas de admissão de motores, sendo inclusive normatizado para medições de vazão em condutos fechados (ABNT, 2013).

A caracterização do escoamento de ar em sistemas de admissão de motores de combustão interna é fundamental para a compreensão do desempenho e do consumo de combustível desses equipamentos. A determinação de parâmetros como velocidade e vazão do ar permite analisar o comportamento do motor sob diferentes condições operacionais, especialmente quando submetido a variações de carga.

Dentre os métodos disponíveis para medição de escoamento, destaca-se o uso do tubo de Pitot, que possibilita a obtenção da velocidade do fluido a partir da diferença entre as pressões total e estática. Esse método apresenta aplicação consolidada em sistemas experimentais devido à sua simplicidade, baixo custo e confiabilidade quando corretamente instalado e instrumentado.

Neste contexto, foi desenvolvida uma bancada experimental composta por um motor acoplado a um sistema de medição, incluindo um tubo de Pitot, manômetro diferencial, sistema de medição de variáveis elétricas (tensão e corrente) e um banco de cargas resistivas. O conjunto experimental permite a aquisição de dados relacionados ao escoamento de ar na admissão do motor, bem como a avaliação do consumo de combustível e das condições operacionais associadas.

O experimento foi conduzido sob diferentes condições de carga aplicadas ao motor, com o objetivo de observar as variações nos parâmetros medidos e avaliar a consistência dos dados obtidos. A coleta de dados foi realizada em múltiplas repetições, permitindo uma análise mais confiável do comportamento do sistema.

O presente trabalho tem como objetivo descrever a bancada experimental utilizada e analisar os dados obtidos na medição do escoamento de ar em um motor de combustão interna, utilizando um tubo de Pitot, sob diferentes condições de carga, visando avaliar o comportamento do sistema e a coerência dos resultados experimentais.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1. Equipamentos e montagem da bancada experimental

Para a realização dos ensaios experimentais voltados à análise do escoamento de ar na admissão do motor diesel, foi utilizada uma bancada experimental composta por instrumentos de medição e dispositivos de controle responsáveis pelo monitoramento das variáveis fluidodinâmicas e operacionais do sistema. O arranjo experimental foi estruturado de forma a permitir a aquisição simultânea dos dados de pressão, vazão de ar, consumo de combustível e potência aplicada ao conjunto, possibilitando avaliar o comportamento do sistema sob diferentes condições de carga.

A Figura 1 abaixo demonstra a configuração geral da bancada experimental utilizada no desenvolvimento do trabalho. O conjunto foi composto pelo motor diesel, sistema de admissão de ar, tubo de Pitot instalado na entrada do motor, manômetro digital conectado ao sistema de medição, computador para aquisição dos dados e sistema de pesagem do combustível. A integração desses equipamentos permitiu monitorar simultaneamente as variáveis necessárias para análise do escoamento de ar e do comportamento operacional do motor durante a aplicação das cargas elétricas.



Figura 1 – Bancada de testes montada (Fonte: Autores).

Foi utilizado um tubo de Pitot de perfil U, conforme ilustrado na Figura 2. A tomada de pressão total corresponde à saída contínua do tubo principal alinhada ao escoamento sendo identificada na montagem pela mangueira preta adotada para facilitar sua distinção enquanto a tomada de pressão estática corresponde à derivação perpendicular ao tubo principal conectada à mangueira transparente permitindo a obtenção separada das pressões total e estática durante os ensaios realizados na bancada.



Figura 2 – Tubo de pitot (Fonte: Autores).

A Figura 3 apresenta o sistema de pesagem utilizado nos ensaios, composto por uma balança digital e por um reservatório de combustível conectado ao motor. Esse conjunto foi utilizado para

acompanhar a variação de massa do combustível consumido durante os ensaios. A medição permitiu controlar as condições de operação do motor ao longo das análises e fornecer dados complementares para acompanhamento do desempenho durante cada condição de carga aplicada.

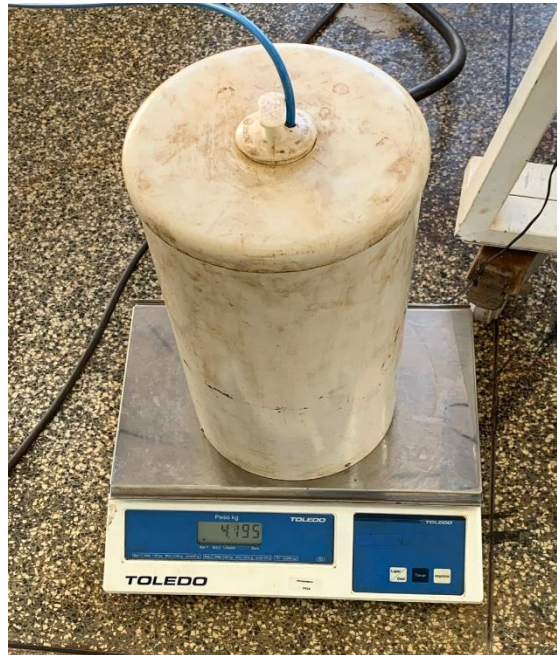


Figura 3 – Balança digital com o galão de combustível (Fonte: Autores).

A Figura 4 apresenta o banco de cargas resistivas foi utilizado para simular diferentes condições de carregamento do sistema durante os ensaios. Esse equipamento possibilitou a aplicação gradual de potência elétrica por meio do acionamento individual das cargas resistivas disponíveis no painel. Essa configuração possibilitou variar as condições operacionais do conjunto experimental de forma controlada, permitindo avaliar a influência do aumento da potência aplicada sobre o comportamento do escoamento de ar na admissão do motor.



Figura 4 – Banco de cargas resistivas (Fonte: Autores).

Conforme apresentado na Figura 5 o alicate amperímetro foi utilizado para monitoramento das grandezas elétricas do sistema durante os ensaios, auxiliando na verificação da corrente elétrica e no

acompanhamento das condições de operação do banco de cargas. A utilização desse instrumento contribuiu para o controle experimental e para a conferência dos níveis de potência aplicados ao conjunto durante cada etapa de teste.



Figura 5 - Alicate amperímetro utilizado no monitoramento elétrico (Fonte: Autores).

Os ensaios experimentais foram realizados utilizando um grupo gerador Branco modelo BD-15.000 E3, apresentado na Figura 6. O equipamento foi responsável pelo fornecimento da potência necessária para operação da bancada e alimentação do banco de cargas resistivas. O equipamento constituiu a unidade motriz do sistema experimental, permitindo a aplicação de diferentes níveis de carga e a avaliação da influência das condições operacionais sobre o escoamento de ar na admissão do motor.



Figura 6 – Motor gerador Branco BD-15.000 E3 (Fonte: Autores).

A Figura 7 apresenta o manômetro digital Extech HD350, utilizado em conjunto com o tubo de Pitot para o monitoramento das variáveis do escoamento na admissão do motor. O equipamento realiza a medição da pressão e da temperatura do fluido e possui a função de exibir a velocidade do escoamento. Entretanto, neste trabalho, os dados empregados nos cálculos foram obtidos por meio do software de aquisição de dados do equipamento, que forneceu os valores de pressão estática, velocidade e temperatura registrados durante os ensaios. A velocidade disponibilizada pelo software foi utilizada como variável de entrada para a determinação da pressão dinâmica pela equação de

Bernoulli e, posteriormente, para o cálculo da pressão total, conforme a metodologia adotada neste estudo.



Figura 7 – Manômetro Digital (Fonte: Autores).

2.2. Princípios de funcionamento do tubo de Pitot

O tubo de Pitot é um instrumento amplamente utilizado para a determinação da velocidade de escoamentos fluidos por meio da medição de pressões. Seu funcionamento baseia-se na obtenção da pressão total e da pressão estática do fluido, permitindo determinar a pressão dinâmica associada ao movimento do escoamento. A diferença entre essas pressões fornece informações sobre a energia cinética do fluido, possibilitando a determinação indireta da velocidade por meio das relações da Mecânica dos Fluidos (Fox; McDonald; Pritchard, 2021).

O princípio de funcionamento do tubo de Pitot está associado ao fenômeno de estagnação do escoamento. Quando o fluido atinge a extremidade frontal do instrumento, sua velocidade é reduzida até atingir valor nulo, resultando na conversão da energia cinética em energia de pressão. Nessa condição é obtida a pressão total do escoamento. Simultaneamente, tomadas laterais permitem a medição da pressão estática, correspondente à pressão exercida pelo fluido independentemente de seu movimento (Munson et al, 2013).

Em aplicações experimentais, o tubo de Pitot apresenta como principais vantagens a simplicidade construtiva, o baixo custo e a facilidade de instalação, sendo amplamente empregado em sistemas de ventilação, dutos industriais, túneis de vento e sistemas de admissão de motores de combustão interna. Sua utilização possibilita a obtenção de parâmetros importantes para a caracterização do escoamento, como velocidade, vazão volumétrica e vazão mássica do fluido (Brunetti, 2008).

2.3. Fundamentação teórica: equação de Bernoulli e determinação da velocidade

A base teórica para a utilização do tubo de Pitot está fundamentada na equação de Bernoulli, que representa a conservação da energia mecânica em um fluido ao longo de uma linha de corrente. De acordo com esse princípio, a soma das parcelas de pressão, energia cinética e energia potencial

gravitacional permanece constante para um escoamento permanente de fluido incompressível e sem perdas significativas de energia (Çengel; Cimbala, 2018).

Na aplicação do tubo de Pitot são considerados dois pontos distintos do escoamento: um ponto localizado na corrente fluida, onde o fluido apresenta determinada velocidade, e o ponto de estagnação, localizado na extremidade frontal do instrumento, onde a velocidade é reduzida a zero. Aplicando a equação de Bernoulli entre esses dois pontos e considerando que se encontram aproximadamente na mesma altura, o termo associado à energia potencial gravitacional pode ser desprezado (Fox; McDonald; Pritchard, 2021).

Nessas condições, a diferença entre a pressão total e a pressão estática corresponde à pressão dinâmica do escoamento. A partir dessa relação é possível determinar a velocidade do fluido em função da diferença de pressão medida e da massa específica do fluido. Esse procedimento constitui a base para a utilização do tubo de Pitot em medições experimentais de velocidade e vazão em sistemas fluidos (Brunetti, 2008).

Para o caso do ar, a massa específica depende das condições de temperatura e pressão do ambiente, sendo frequentemente determinada por meio da equação dos gases ideais. Dessa forma, a obtenção adequada desses parâmetros é fundamental para garantir maior precisão nos resultados experimentais e nos cálculos relacionados ao escoamento (Çengel; Boles, 2013).

2.4. Aplicações e limitações do tubo de Pitot em sistemas de escoamento

O tubo de Pitot é amplamente utilizado na engenharia para medição de velocidade e vazão em escoamentos internos e externos. Sua aplicação é observada em sistemas de ventilação, instalações industriais, túneis de vento, aeronaves e motores de combustão interna. Em motores diesel, a determinação da vazão de ar admitida permite avaliar parâmetros relacionados ao desempenho do processo de combustão e ao funcionamento do sistema de admissão, tornando o instrumento uma alternativa eficiente para estudos experimentais (Fox; McDonald; Pritchard, 2021).

A utilização do tubo de Pitot em condutos fechados é regulamentada por normas técnicas específicas, como a "ISO 3966", que estabelece procedimentos para medição de velocidade e determinação da vazão de fluidos por meio da integração dos perfis de velocidade obtidos experimentalmente. Essas recomendações contribuem para aumentar a confiabilidade e a repetibilidade das medições realizadas em sistemas reais.

Apesar das vantagens apresentadas, o instrumento possui algumas limitações. A precisão dos resultados pode ser influenciada por fatores como desalinhamento em relação ao escoamento, presença de turbulência, perturbações na corrente fluida e incertezas associadas aos instrumentos de medição. Além disso, se necessita trabalhar o tubo de Pitot em escoamentos em REGIME PERMANENTE para conhecimento do desempenho e comportamento do motor (Munson et al, 2013).

Mesmo com essas limitações, o tubo de Pitot permanece como uma das ferramentas mais utilizadas para caracterização experimental de escoamentos devido à sua simplicidade, baixo custo e confiabilidade quando empregado de acordo com os procedimentos recomendados pelas normas técnicas e pela literatura especializada.

3. METODOLOGIA

3.1. Montagem da bancada experimental

A bancada experimental foi montada com o objetivo de permitir a medição de parâmetros do escoamento de ar na admissão de um motor de combustão interna, bem como o monitoramento do consumo de combustível e da potência elétrica associada ao sistema.

Inicialmente, um tubo de Pitot foi instalado na seção de entrada de ar do motor, sendo inserido em um ponto do duto de admissão por meio de um orifício previamente preparado. O tubo possui duas tomadas de pressão, correspondentes à pressão total e à pressão estática, identificadas, respectivamente, pelas linhas de conexão.

Essas tomadas de pressão foram conectadas a um manômetro diferencial, responsável pela medição da diferença de pressão do escoamento. O sistema de medição encontra-se integrado a um computador, no qual é executado um software dedicado à aquisição de dados. Esse software permite o monitoramento em tempo real de variáveis como pressão estática, velocidade do escoamento, temperatura do ar e vazão volumétrica (*flow*), além do registro temporal dos dados coletados ao longo dos ensaios.

Para a determinação do consumo de combustível, foi utilizado um reservatório externo posicionado sobre uma balança digital. A variação de massa do combustível ao longo do tempo permite a obtenção do consumo mássico durante a operação do motor.

Adicionalmente, a bancada conta com um sistema de aplicação de carga elétrica composto por um banco de cargas resistivas e instrumentos de monitoramento das grandezas elétricas do circuito. Esse conjunto permite a aplicação controlada de diferentes níveis de carga ao motor, possibilitando a avaliação do comportamento do sistema sob distintas condições operacionais e a análise da influência da potência aplicada sobre os parâmetros do escoamento de ar.

3.2. Procedimento experimental

O procedimento experimental foi conduzido de forma a avaliar o comportamento do sistema sob diferentes condições de carga, bem como verificar a repetibilidade dos dados obtidos.

Inicialmente, o motor foi operado em condição sem carga (carga zero), sendo realizada a coleta de dados durante um intervalo de aproximadamente três minutos. Durante esse período, foram registrados os parâmetros fornecidos pelo sistema de aquisição, incluindo pressão estática, velocidade do escoamento, temperatura do ar, vazão e tempo.

Na sequência, foram aplicados níveis crescentes de carga ao sistema por meio do banco de cargas resistivas, definidos como carga 1, carga 2 e carga 3. Para cada condição de carga, o motor foi mantido em operação por um período de três minutos, sendo realizados os respectivos registros experimentais.

Após a conclusão das medições para todas as condições de carga, o procedimento foi repetido integralmente, totalizando dois ciclos completos de ensaio. Essa repetição teve como objetivo verificar a consistência dos dados e identificar possíveis variações ou erros experimentais.

3.3. Base de cálculos

Os dados obtidos durante os ensaios foram processados com o objetivo de determinar os parâmetros do escoamento de ar e o consumo de combustível do motor em diferentes condições de operação.

A velocidade do escoamento de ar foi determinada a partir da medição da diferença de pressão fornecida pelo tubo de Pitot. Considerando a relação entre a pressão dinâmica e a velocidade do fluido, tem-se:

$$v = \sqrt{\frac{2 * (\Delta P)}{\rho}} \quad (1)$$

em que v representa a velocidade do escoamento, ΔP a diferença entre as pressões total e estática, e ρ a densidade do ar.

A partir da velocidade obtida, foi possível determinar a vazão volumétrica do escoamento na seção de entrada do motor, utilizando a seguinte relação:

$$Q = vA \quad (2)$$

em que Q é a vazão volumétrica e A corresponde à área da seção transversal do duto de admissão.

A vazão mássica de combustível foi determinada por meio da variação de massa registrada na balança ao longo do tempo de ensaio, conforme:

$$\dot{m} = \left(\frac{\Delta m}{\Delta t} \right) \quad (3)$$

em que $\dot{m}$ representa a taxa de consumo de combustível, Δm a variação de massa medida e Δt o intervalo de tempo considerado.

Os dados de potência elétrica foram obtidos por meio do wattímetro, permitindo associar cada condição experimental ao respectivo nível de carga aplicado ao sistema.

Para cada condição de operação, foram considerados os valores médios das variáveis medidas ao longo do intervalo de aquisição, com o objetivo de minimizar a influência de flutuações instantâneas e possíveis ruídos experimentais.

Os valores de pressão fornecidos pelo sistema de aquisição foram obtidos na unidade mbar. Entretanto, para a realização dos cálculos fluidodinâmicos e utilização das equações no Sistema Internacional de Unidades (SI), foi necessária a conversão desses valores para Pascal (Pa). Essa conversão permite utilizar corretamente as equações de velocidade, pressão dinâmica e pressão total.

$$1 \text{ mbar} = 100 \text{ Pa}$$

$$P(\text{Pa}) = P(\text{mbar}) * 100 \quad (4)$$

Para o cálculo da massa específica do ar, foi necessário utilizar a pressão absoluta do sistema. Como os valores medidos experimentalmente correspondem à pressão manométrica, realizou-se a conversão adicionando a pressão atmosférica ao valor medido. Essa etapa é fundamental para aplicação da equação dos gases ideais.

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{man} \quad (5)$$

Os valores de temperatura medidos experimentalmente foram obtidos em graus Celsius. Contudo, para utilização nas equações termodinâmicas e no cálculo da massa específica do ar, foi necessária a conversão da temperatura para Kelvin, unidade padrão do Sistema Internacional.

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273,15 \quad (6)$$

Após a obtenção da pressão absoluta e da temperatura em Kelvin, foi possível determinar a massa específica do ar utilizando a equação dos gases ideais. Esse parâmetro é necessário para os cálculos relacionados ao escoamento, como velocidade, pressão dinâmica e vazão mássica do ar.

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \quad (7)$$

Para determinar a vazão volumétrica do ar admitido pelo sistema, foi necessário calcular a área da seção transversal da tubulação de admissão. A área foi obtida a partir do diâmetro interno do tubo utilizado na bancada experimental.

$$A = \frac{\pi * d^2}{4} \quad (8)$$

A vazão mássica do ar foi determinada a partir da relação entre a massa específica do fluido e a vazão volumétrica obtida experimentalmente. Esse cálculo permite avaliar a quantidade de massa de ar admitida pelo motor por unidade de tempo.

$$\dot{m} = \rho * Q \quad (9)$$

A pressão dinâmica foi calculada com o objetivo de representar a parcela da pressão associada à energia cinética do escoamento do ar. Esse parâmetro está diretamente relacionado à velocidade do fluido no interior da tubulação.

$$P_d = \frac{\rho v^2}{2} \quad (10)$$

A pressão total do escoamento foi determinada a partir da soma entre a pressão estática e a pressão dinâmica. Esse parâmetro representa a energia total associada ao fluido em movimento no sistema de admissão.

$$P_t = P_e + P_d \quad (11)$$

4. RESULTADOS

Após a montagem da bancada experimental e a verificação do funcionamento dos instrumentos de medição, foi realizada a configuração do software de aquisição de dados da Extech, compatível com o manômetro digital HD350, utilizado para o monitoramento e registro das variáveis experimentais durante os ensaios. O software possibilitou a visualização em tempo real das grandezas medidas, bem como o armazenamento dos dados obtidos para posterior análise. Entre as informações registradas destacam-se a pressão estática, a velocidade do escoamento e a temperatura do fluido, parâmetros que serviram como base para os cálculos desenvolvidos neste trabalho. A utilização do software garantiu maior confiabilidade na aquisição dos dados, além de facilitar o processamento das informações experimentais e a organização dos resultados obtidos. A interface do software utilizada durante os ensaios experimentais é apresentada na Figura 8, na qual é possível observar a tela de monitoramento das variáveis registradas em tempo real.

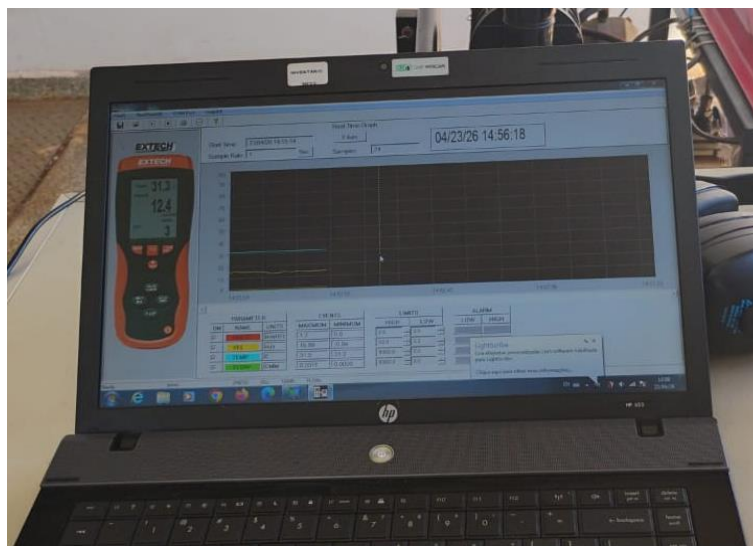


Figura 8 - Interface do software de aquisição de dados da Extech, compatível com o manômetro digital HD350. (Fonte: Autores).

A definição do procedimento de ensaio, iniciou-se a etapa de aquisição de dados. O sistema foi operado sob diferentes condições de carga, conforme descrito na metodologia, mantendo-se intervalos de tempo constantes para cada ensaio.

Durante a realização dos testes, foram monitoradas e registradas as variáveis de interesse, incluindo consumo de combustível, temperatura de operação e potência elétrica aplicada ao sistema. O consumo de combustível foi determinado a partir da variação de massa ao longo do tempo, enquanto a potência elétrica foi controlada por meio do banco de cargas resistivas e continuamente monitorada durante os ensaios.

Os resultados obtidos em cada condição operacional estão organizados na Tabela 1, que apresenta de forma sistematizada as variáveis medidas ao longo dos ensaios. Os ensaios foram conduzidos em duas sequências completas, com o objetivo de verificar a repetibilidade dos dados obtidos e garantir maior confiabilidade aos resultados experimentais.

Além dos dados obtidos diretamente por medição experimental, foram utilizados os registros fornecidos pelo software de aquisição de dados acoplado ao sistema de medição do tubo de Pitot. O software disponibiliza, em tempo real, variáveis como velocidade do escoamento, pressão estática, temperatura do ar. Para cada condição de ensaio, foram coletadas séries de dados ao longo do intervalo de medição.

Com o objetivo de reduzir a influência de flutuações instantâneas e ruídos experimentais, foi realizada a média dos valores obtidos para cada variável em cada condição de carga. Esses valores médios foram utilizados para a construção dos gráficos e análise dos resultados.

Variável	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Exp. 6	Exp. 7	Exp. 8
Tempo (min)	3	3	3	3	3	3	3	3
Temperatura (°C)	31,8	32,4	32,5	32,7	32,9	33	32,7	33,1
Massa inicial (kg)	4,165	4,075	3,985	3,885	3,785	3,71	3,63	3,54
Massa final (kg)	4,115	4,015	3,915	3,805	3,73	3,65	3,56	3,455
Potência (kW)	0	1,17	2,27	3,3	0	1,16	2,26	3,29

Tabela 1 – Dados coletados no experimento.

A Tabela 2 abaixo apresenta os valores médios das variáveis fornecidas pelo sistema de aquisição de dados, obtidos a partir do processamento dos registros coletados durante os ensaios

experimentais. Esses valores representam a média aritmética das medições realizadas em cada condição operacional, permitindo uma análise mais consistente e reduzindo possíveis variações associadas a flutuações momentâneas do sistema.

Os gráficos desenvolvidos têm como objetivo analisar o comportamento das principais variáveis do escoamento de ar em função da potência do sistema. A partir dos dados experimentais obtidos na bancada de testes com tubo de Pitot, foi possível avaliar como a potência influencia a pressão, velocidade, temperatura, vazão volumétrica e vazão mássica do escoamento.

Essas relações permitem compreender o comportamento do escoamento de ar no sistema de admissão do motor e verificar a influência das diferentes condições de carga sobre as variáveis fluidodinâmicas analisadas, o que é demonstrado na tabela 2 abaixo.

Experimento	PRESSÃO ESTÁTICA MÉDIA (kPa)	VEL (média)	TEMP (média)
1	1,51	15,93	32,7
2	1,38	15,23	33,0
3	1,50	15,86	32,7
4	1,40	15,28	32,9
5	1,50	15,94	32,7
6	1,44	15,54	32,8
7	1,49	15,76	32,8
8	1,52	15,93	33,2

Tabela 2 – Valores médios medidos através do software.

O gráfico 1 apresenta a variação da pressão estática em função da potência do sistema. A análise permite observar como o aumento da potência influencia diretamente o ganho de pressão no escoamento de ar.

O gráfico apresenta a relação entre a pressão estática medida e a potência aplicada ao sistema. Observa-se que os valores de pressão permaneceram próximos ao longo dos ensaios, apresentando apenas pequenas oscilações entre as diferentes condições de carga. Esse comportamento indica que o sistema operou de forma estável durante os experimentos, que podemos observar no gráfico 1 abaixo.

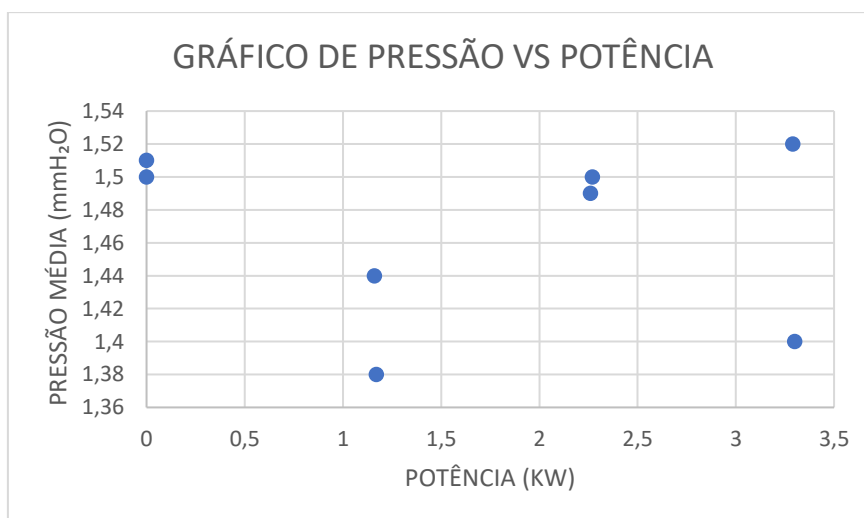


Gráfico 1 – Pressão Média por Potência Aplicada.

O gráfico 2 de velocidade em função da potência evidencia como a energia fornecida ao sistema influencia diretamente a velocidade do ar no duto, permitindo avaliar a resposta do escoamento às diferentes condições operacionais impostas durante os ensaios.

Observa-se que a velocidade média do ar apresentou pequenas variações entre os ensaios realizados. De modo geral, os valores permaneceram bastante próximos ao longo de todas as condições avaliadas, o que indica que o escoamento manteve um comportamento relativamente estável mesmo com a variação da carga aplicada ao sistema.

Esse comportamento sugere que, dentro da faixa de operação analisada, o sistema apresenta baixa sensibilidade às mudanças de potência no que diz respeito à velocidade do escoamento, reforçando a consistência das medições e a estabilidade do regime de operação durante os testes experimentais, que podemos observar no gráfico 2 abaixo.

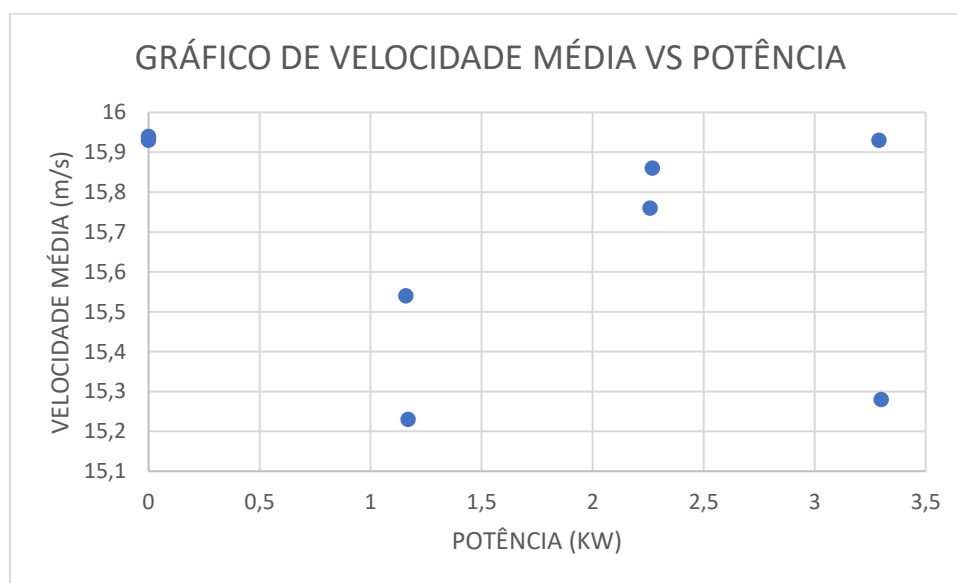


Gráfico 2 – Velocidade Média por Potência aplicada.

Observa-se que, na condição de potência aplicada igual a 0 kW, a pressão média apresentou valores relativamente elevados quando comparados às demais condições. Esse comportamento é esperado, pois, embora não houvesse carga aplicada ao gerador, o motor permanecia em funcionamento na condição de marcha sem carga (idle), mantendo a admissão de ar necessária para sustentar a combustão e a rotação do motor. Dessa forma, ainda existia escoamento no sistema de admissão, resultando em valores significativos de pressão estática.

Observa-se que os Gráficos 1 e 2 apresentam padrões de dispersão semelhantes. Esse comportamento é esperado, uma vez que a velocidade do escoamento e a pressão estática estão diretamente relacionadas pelo princípio de Bernoulli. Assim, variações na velocidade do ar provocam variações correspondentes na pressão estática medida pelo tubo de Pitot, fazendo com que ambas as grandezas apresentem tendências semelhantes ao longo dos ensaios.

O Gráfico 3 apresenta a relação entre a temperatura média e a potência aplicada durante os ensaios. Observa-se que a temperatura permaneceu praticamente constante em todas as condições experimentais, apresentando valores entre aproximadamente 32,7 °C e 33,2 °C, o que representa uma variação inferior a 2 °C. Essa pequena oscilação indica que não houve aquecimento significativo do sistema em função do aumento da potência aplicada, demonstrando estabilidade das condições térmicas ao longo dos experimentos.

Embora seja possível observar um discreto aumento da temperatura em alguns níveis de potência mais elevados, essa diferença não foi suficiente para caracterizar uma alteração térmica expressiva. As variações registradas podem estar relacionadas tanto ao funcionamento do equipamento quanto às

condições ambientais do laboratório, como temperatura ambiente, circulação de ar e umidade, fatores que podem influenciar levemente as medições.

A manutenção da temperatura em uma faixa estreita é um aspecto importante, pois reduz a influência de efeitos térmicos sobre os resultados obtidos nas demais variáveis analisadas, permitindo que as diferenças observadas sejam atribuídas, principalmente, à variação da potência aplicada e não a alterações de temperatura. Dessa forma, o comportamento apresentado no Gráfico 3 demonstra que as condições experimentais permaneceram adequadas e controladas durante a realização dos ensaios, contribuindo para a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados obtidos.

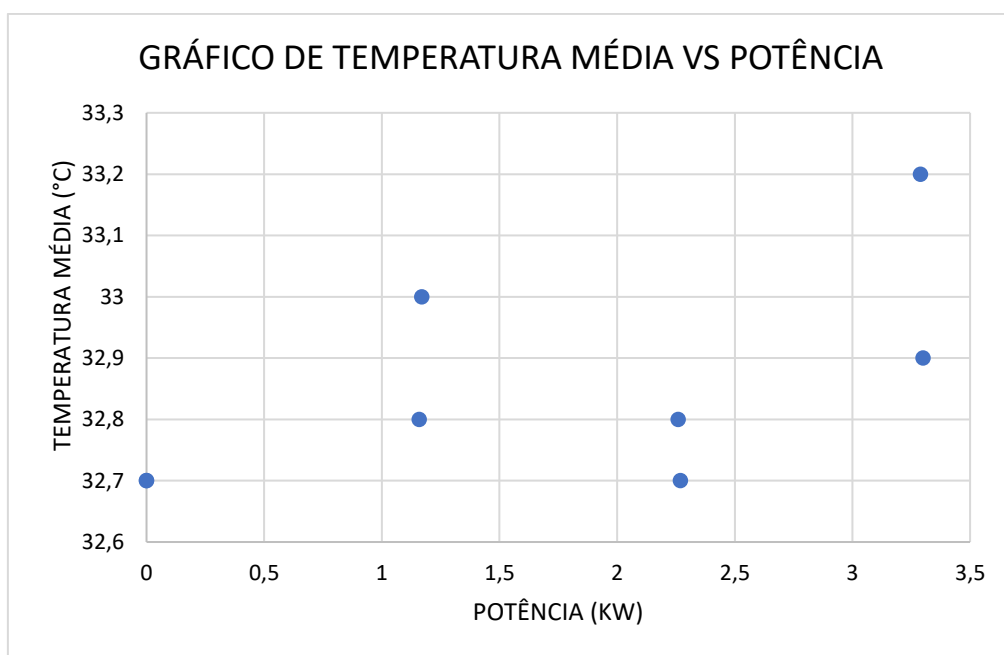


Gráfico 3 – Temperatura média por potência aplicada.

Para a determinação do consumo de combustível do motor, foi utilizada a medição da variação de massa ao longo do tempo, por meio de uma balança, conforme demonstrado na Tabela 3. Durante cada ensaio, o sistema operou por um intervalo fixo de 3 minutos, permitindo a obtenção da massa inicial e final do combustível no reservatório.

A partir desses dados, calculou-se a vazão mássica de combustível, que representa a quantidade de massa consumida por unidade de tempo. Essa grandeza é fundamental para a análise do desempenho do sistema, pois está diretamente relacionada ao consumo energético do motor, a vazão mássica foi determinada pela equação 3 determinada acima, logo abaixo na tabela 3 temos os valores de vazão mássica para cada experimento calculado.

Experimento	Massa inicial (kg)	Massa final (kg)	Variação de Massa (Δm em kg)	Vazão mássica (kg/s)
1	4,165	4,115	0,05	0,00028
2	4,075	4,015	0,06	0,00033
3	3,985	3,915	0,07	0,00039
4	3,885	3,805	0,08	0,00044
5	3,785	3,73	0,055	0,00031
6	3,71	3,65	0,06	0,00033
7	3,63	3,56	0,07	0,00039
8	3,54	3,455	0,085	0,00047

Tabela 3 – Tabela de vazão mássica para cada experimento.

Observa-se uma redução da massa consumida de combustível a partir do experimento 5. Esse comportamento é decorrente da metodologia adotada para os ensaios, uma vez que, após a realização do experimento na condição de potência máxima (3,3 kW), iniciou-se um novo ciclo de medições, retornando à condição de potência de 0 kW. A partir desse ponto, os ensaios foram novamente realizados com incrementos de carga até a potência máxima. Dessa forma, a redução observada na massa consumida de combustível não representa uma alteração no comportamento do motor, mas apenas o reinício da sequência experimental.

A variação da vazão volumétrica do combustível observada na Tabela 4 demonstra que o consumo permaneceu dentro de uma faixa relativamente estreita ao longo dos ensaios, com valores entre 0,0198 e 0,0337 L/min. Os menores consumos foram registrados nos experimentos 1 e 5, enquanto os maiores ocorreram nos experimentos 4 e 8, indicando um aumento da demanda de combustível nessas condições de operação.

Apesar dessas diferenças, os resultados evidenciam um comportamento estável do sistema de alimentação, sem oscilações expressivas entre os ensaios. A determinação da vazão volumétrica é importante para avaliar o desempenho do motor, pois permite quantificar o consumo de combustível em função das diferentes condições experimentais, possibilitando a comparação da eficiência operacional e a identificação de possíveis variações associadas à potência aplicada, logo na tabela 4 podemos observar a vazão volumétrica de combustível calculada.

Experimento	Vazão volumétrica (m ³ /s)	Vazão volumétrica (L/min)
1	3,31E-07	0,0198
2	3,97E-07	0,0238
3	4,63E-07	0,0278
4	5,29E-07	0,0317
5	3,64E-07	0,0218
6	3,97E-07	0,0238
7	4,63E-07	0,0278
8	5,62E-07	0,0337

Tabela 4 – Tabela de vazão volumétrica do combustível.

Observa-se, a partir do Gráfico 4 e da Tabela 4, que a vazão mássica e a vazão volumétrica do combustível apresentam comportamento crescente com o aumento da potência do motor. Esse resultado é esperado, uma vez que a elevação da carga imposta ao motor exige maior fornecimento de combustível para manter o funcionamento e atender à demanda energética requerida.

De modo geral, os resultados obtidos demonstram consistência física, validando o método adotado para a determinação da vazão de combustível em função da potência desenvolvida pelo motor. Verifica-se que, à medida que a potência aumenta, ocorre também um aumento da vazão de combustível, evidenciando a relação direta entre essas grandezas.

A relação entre a vazão mássica do combustível e a potência do motor pode ser observada no Gráfico 4.

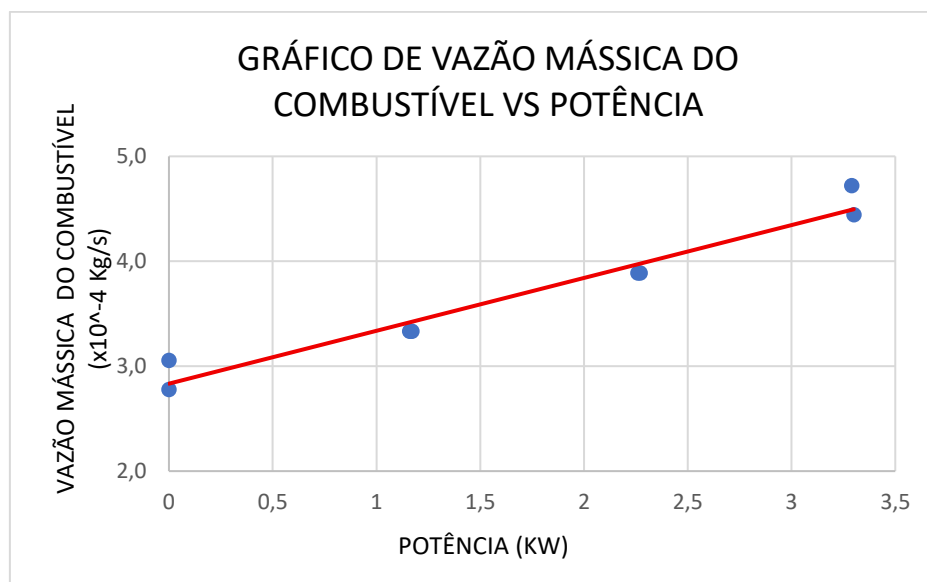


Gráfico 4 – Vazão mássica em função potência.

Após a análise da vazão de combustível, procedeu-se à determinação da vazão volumétrica do ar admitido pelo motor. Para isso, foram utilizados os valores de velocidade média do escoamento obtidos experimentalmente, bem como a área da seção transversal do tubo de admissão. O diâmetro interno do tubo, de 41,7 mm, foi convertido para unidades do Sistema Internacional, resultando em uma área transversal de 0,00137 m², valor mantido constante para todos os ensaios. A partir desses parâmetros, foi possível determinar a vazão volumétrica do ar para cada condição de operação, conforme apresentado na Tabela 5.

Experimento	Velocidade Média. (m/s)	Vazão volumétrica do ar (m ³ /s)
1	15,93	0,0217
2	15,23	0,0208
3	15,86	0,0216
4	15,28	0,0209
5	15,94	0,0218
6	15,54	0,0212
7	15,76	0,0215
8	15,93	0,0217

Tabela 5 – Dados para a vazão volumétrica do ar.

O Gráfico 5 apresenta a vazão volumétrica do ar em função da potência aplicada ao motor. A vazão volumétrica foi determinada a partir da velocidade média do escoamento e da área da seção transversal do tubo de admissão. Observa-se que os valores apresentaram pequenas oscilações entre os ensaios, mantendo comportamento relativamente estável ao longo das diferentes condições de potência avaliadas. Esse comportamento indica que o escoamento de ar na admissão do motor sofreu apenas pequenas variações durante os ensaios, demonstrando consistência nas medições experimentais.

Esse comportamento é característico de motores de combustão interna, nos quais o aumento da carga resulta em maior demanda de ar e combustível para a manutenção do processo de combustão. Os resultados obtidos mostram coerência com a tendência esperada, apresentando variações suaves e consistentes entre os pontos experimentais.

A comparação entre os gráficos de vazão de combustível e vazão de ar evidencia a relação entre ambos os fluxos, fundamentais para a avaliação do desempenho do motor e para análises futuras, como a determinação da razão ar-combustível.

Inicialmente, os valores de pressão estática obtidos experimentalmente foram convertidos da unidade mbar para Pascal (Pa), permitindo a adequação dos dados ao Sistema Internacional de Unidades (SI). Posteriormente, as pressões manométricas foram convertidas em pressões absolutas por meio da adição da pressão atmosférica local de Dourados-MS onde a pressão atmosférica local foi estimada com base na altitude média do município de Dourados-MS, considerada igual a aproximadamente 94,9 kPa (94.900 Pa) durante a realização dos ensaios. Essa etapa foi necessária para a aplicação da equação dos gases ideais no cálculo da massa específica do ar.

Além disso, as temperaturas registradas em graus Celsius foram convertidas para Kelvin, garantindo compatibilidade com as equações termodinâmicas empregadas ao longo dos cálculos. A partir da pressão absoluta e da temperatura absoluta, foi possível determinar a massa específica do ar em cada condição experimental, parâmetro fundamental para os cálculos relacionados ao escoamento.

Com a determinação da massa específica, foram então realizados os cálculos da vazão mássica do ar, da pressão dinâmica e da pressão total do escoamento. A vazão volumétrica do ar foi obtida utilizando a velocidade média medida experimentalmente e a área da seção transversal da tubulação de admissão. A pressão dinâmica foi determinada a partir da relação entre a massa específica do fluido e a velocidade do escoamento, enquanto a pressão total foi calculada pela soma entre a pressão estática e a pressão dinâmica. Esses resultados serviram de base para a determinação das demais variáveis fluidodinâmicas analisadas neste estudo, conforme apresentado no Gráfico 5.

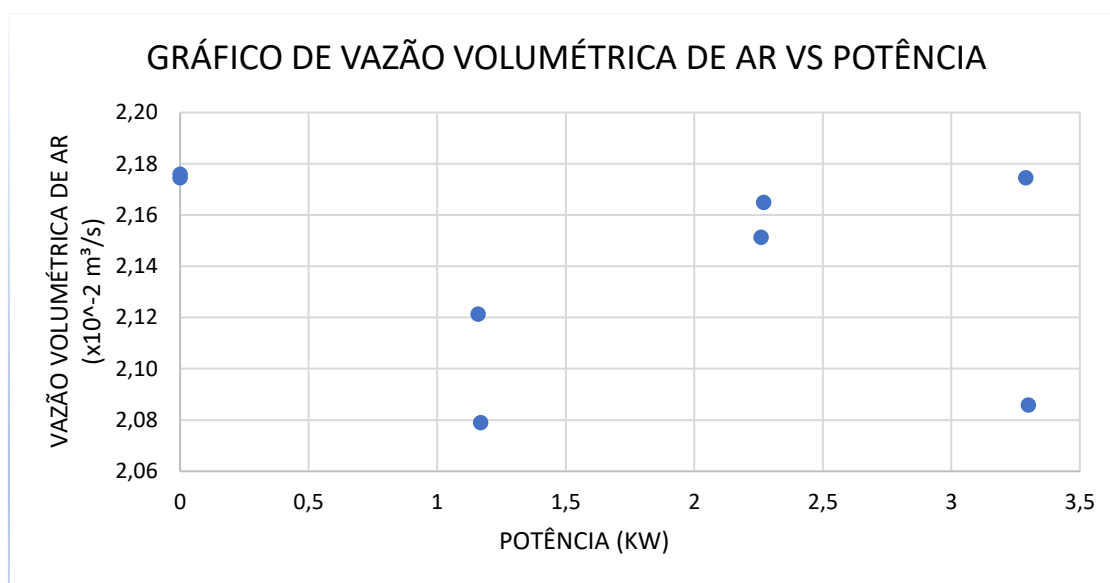


Gráfico 5 – Vazão Volumétrica do ar em função da potência.

A partir dos valores de pressão absoluta e temperatura obtidos anteriormente, foram determinados os parâmetros fluidodinâmicos complementares do escoamento de ar no sistema de admissão do motor. Esses cálculos permitiram obter informações relacionadas às propriedades do fluido e ao comportamento do escoamento sob diferentes condições de operação da bancada experimental, conforme demonstrado no Tabela 6.

Experimento	Potência (kW)	Temperatura (K)	Pressão estática (Pa)	Pressão absoluta (Pa)
1	0	305,85	151	101476
2	1,17	306,15	138	101463
3	2,27	305,85	150	101475
4	3,30	306,05	140	101465
5	0	305,85	150	101475
6	1,16	305,95	144	101469
7	2,26	305,95	149	101474
8	3,29	306,35	152	101477

Tabela 6 – Conversão de pressão e transformação da pressão em absoluta.

Inicialmente, foi calculada a massa específica do ar utilizando a equação dos gases ideais. Os resultados apresentados na Tabela 7 evidenciam pequenas variações entre os ensaios, mantendo-se praticamente constantes em função das reduzidas alterações de temperatura e pressão durante o experimento.

Com a massa específica determinada, calculou-se a vazão volumétrica do ar utilizando a velocidade média do escoamento e a área da seção transversal da tubulação. Os resultados permaneceram praticamente constantes entre as condições experimentais, indicando estabilidade do escoamento de ar na admissão do motor.

Posteriormente, foi determinada a vazão mássica do ar a partir da relação entre a massa específica e a vazão volumétrica. Observa-se um comportamento consistente entre os ensaios, acompanhando as pequenas variações da vazão volumétrica.

Também foi calculada a pressão dinâmica do escoamento, relacionada à energia cinética do fluido em movimento. Os resultados acompanharam as variações da velocidade média do ar, conforme esperado pela relação entre essas grandezas.

Por fim, foi determinada a pressão total do escoamento, obtida pela soma entre a pressão estática e a pressão dinâmica. Os valores calculados mantiveram comportamento coerente ao longo dos experimentos, refletindo as pequenas oscilações observadas nas demais variáveis fluidodinâmicas.

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos para massa específica, vazão volumétrica do ar, vazão mássica do ar, pressão dinâmica e pressão total em cada condição experimental.

Com o objetivo de facilitar a visualização e a análise dessas variáveis, foram elaborados gráficos relacionando os principais parâmetros fluidodinâmicos com a potência aplicada ao motor. Esses gráficos permitem identificar as tendências de comportamento das grandezas analisadas e complementam a interpretação dos resultados apresentados na Tabela 7.

Experimento	Massa específica (kg/m ³)	Vazão volumétrica do ar (m ³ /s)	Vazão mássica do ar (kg/s)	Pressão dinâmica (Pa)	Pressão Total (Pa)
1	1,156	0,0217	0,0251	146,7	297,7
2	1,155	0,0208	0,0240	133,9	271,9
3	1,156	0,0216	0,0250	145,4	295,4
4	1,155	0,0209	0,0241	134,9	274,9
5	1,156	0,0218	0,0252	146,9	296,9
6	1,156	0,0212	0,0245	139,5	283,5
7	1,156	0,0215	0,0249	143,5	292,5
8	1,154	0,0217	0,0251	146,4	298,4

Tabela 7 – Obtenção do restante das variáveis.

O gráfico 6 mostra que a massa específica do ar apresentou pequenas variações conforme a temperatura do sistema aumentou. Esse comportamento ocorre porque o aumento da temperatura tende a reduzir levemente a densidade do ar, mantendo coerência com o comportamento esperado para gases em condições próximas à pressão atmosférica, assim como no gráfico 7 abaixo:

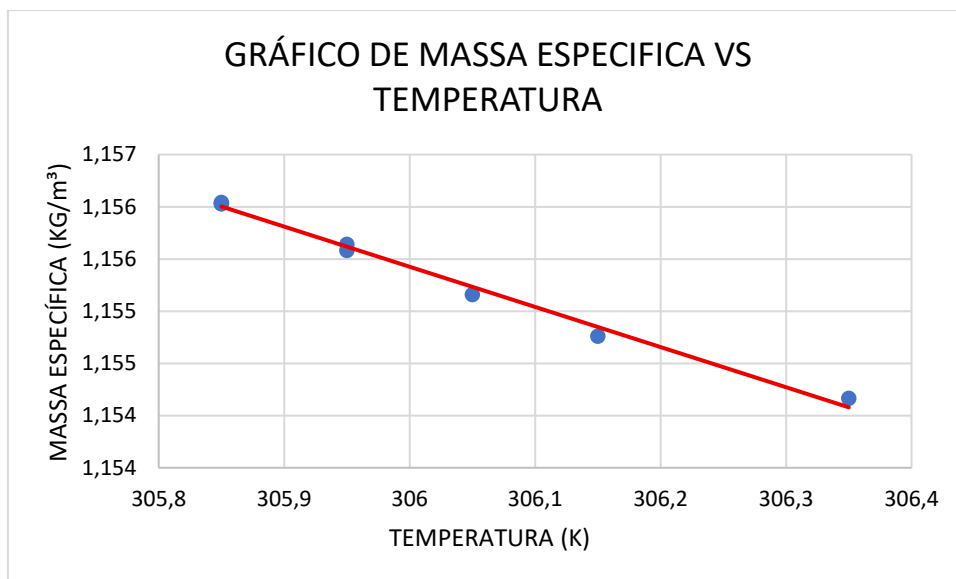


Gráfico 6 – Gráfico de massa específica pela temperatura.

Conforme apresentado no Gráfico 6, observa-se uma tendência de redução da massa específica do ar com o aumento da temperatura. Embora as variações sejam relativamente pequenas, os resultados indicam uma relação inversa entre essas grandezas, comportamento esperado para gases em condições próximas à pressão atmosférica. À medida que a temperatura do ar aumenta, sua massa específica tende a diminuir, em concordância com a equação dos gases ideais e com o comportamento descrito na literatura técnica. A relação entre essas grandezas pode ser observada no Gráfico 7.

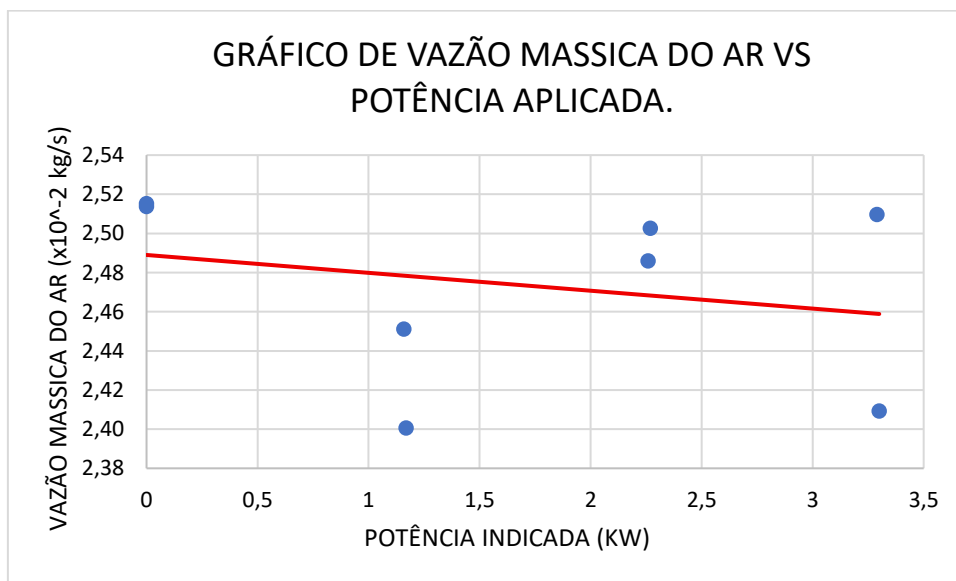


Gráfico 7 – Gráfico de vazão mássica do ar pela potência aplicada.

Os gráficos 8, 9 e 10, de pressão estática, pressão dinâmica e pressão total apresentaram comportamento semelhante ao longo dos experimentos. Isso ocorre porque essas grandezas estão

diretamente relacionadas às características do escoamento e à velocidade do ar no interior da tubulação. A pressão dinâmica variou em função das pequenas oscilações observadas na velocidade média do escoamento, enquanto a pressão total acompanhou as variações da pressão estática e da pressão dinâmica, uma vez que é obtida pela soma dessas duas parcelas. De forma geral, os resultados indicam que os parâmetros fluidodinâmicos permaneceram relativamente estáveis durante os ensaios, evidenciando comportamento consistente do sistema de admissão de ar nas diferentes condições de carga avaliadas, conforme ilustrado nos Gráficos 8, 9 e 10.

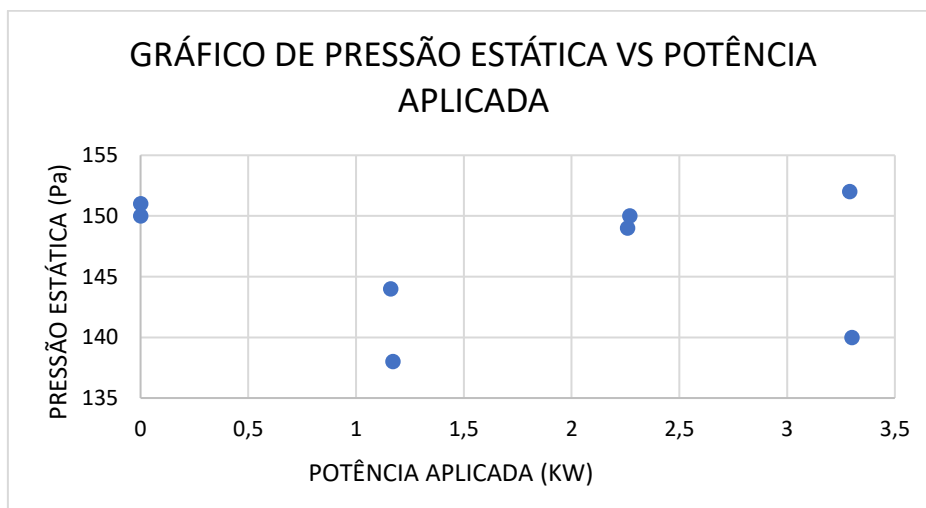


Gráfico 8 – Gráfico de pressão estática pela potência aplicada.

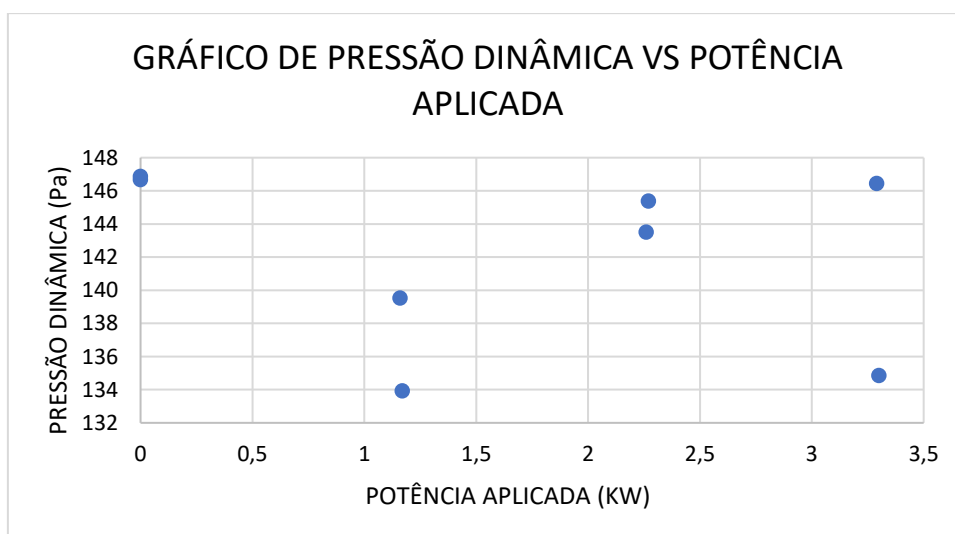


Gráfico 9 – Gráfico de pressão dinâmica pela potência aplicada.

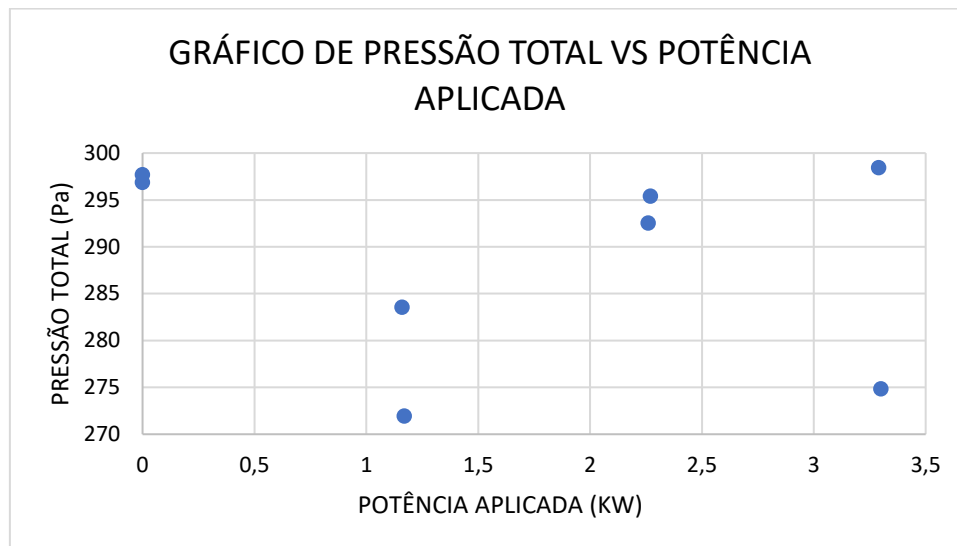


Gráfico 10 – Gráfico de pressão total pela potência aplicada.

5. CONCLUSÃO

A partir dos ensaios realizados na bancada experimental com tubo de Pitot, foi possível determinar e analisar os principais parâmetros relacionados ao escoamento de ar na admissão do motor sob diferentes condições de operação. Os resultados obtidos permitiram avaliar o comportamento fluidodinâmico do sistema, bem como verificar a coerência entre as variáveis medidas experimentalmente e os cálculos realizados posteriormente.

Inicialmente, os dados fornecidos pelo sistema de aquisição foram tratados por meio da conversão das unidades de pressão e temperatura para o Sistema Internacional, possibilitando a aplicação das equações utilizadas nos cálculos fluidodinâmicos. A partir desses dados, foi determinada a massa específica do ar utilizando a equação dos gases ideais, servindo como base para os cálculos de vazão mássica, pressão dinâmica e pressão total do escoamento.

Os resultados mostraram que a massa específica do ar apresentou pequenas variações ao longo dos ensaios, mantendo valores próximos entre $1,154 \text{ kg/m}^3$ e $1,156 \text{ kg/m}^3$, indicando estabilidade das condições térmicas e operacionais do sistema. Da mesma forma, a vazão volumétrica e a vazão mássica do ar permaneceram relativamente constantes durante os ensaios, apresentando apenas pequenas oscilações associadas às variações naturais do escoamento e às incertezas experimentais inerentes ao processo de medição.

As análises das pressões estática, dinâmica e total demonstraram comportamento coerente com o funcionamento do tubo de Pitot e com os princípios da mecânica dos fluidos. Observou-se que as variações da pressão dinâmica acompanharam diretamente as alterações da velocidade do ar, enquanto a pressão total apresentou comportamento compatível com a soma das parcelas estática e dinâmica do escoamento.

Os gráficos construídos permitiram visualizar o comportamento das variáveis analisadas ao longo das diferentes condições de operação da bancada, evidenciando a consistência dos resultados obtidos e a estabilidade do sistema experimental durante os testes. As pequenas diferenças observadas entre os experimentos podem ser atribuídas a oscilações naturais do sistema, limitações instrumentais e incertezas experimentais inerentes ao processo de medição.

Dessa forma, conclui-se que os objetivos do trabalho foram alcançados, permitindo avaliar o funcionamento da bancada experimental e realizar a análise do escoamento de ar utilizando o tubo de Pitot. Os resultados obtidos apresentaram coerência física e experimental, demonstrando a aplicabilidade da técnica para a determinação de parâmetros fluidodinâmicos em sistemas de admissão de motores diesel. Além disso, o estudo fornece uma base experimental que pode ser

utilizada em trabalhos futuros relacionados à caracterização de escoamentos, ao desempenho de sistemas de admissão e à aplicação de técnicas de instrumentação em análises fluidodinâmicas.

6. TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade deste trabalho, propõe-se o desenvolvimento de um sistema automatizado de monitoramento da admissão de ar utilizando a plataforma Arduino, permitindo a aquisição e o processamento de dados em tempo real. Além disso, pretende-se projetar e fabricar um suporte específico para o tubo de Pitot, garantindo seu correto posicionamento e centralização na entrada de ar do motor, visando aumentar a precisão das medições.

Também se sugere a integração de sensores de pressão e temperatura ao sistema, possibilitando a determinação automática da velocidade e da vazão mássica do ar admitido. Por fim, recomenda-se a realização de ensaios em diferentes condições de operação, incluindo variações de carga, temperatura ambiente e pressão ambiente, a fim de ampliar a compreensão do comportamento fluidodinâmico do sistema de admissão do motor diesel.

7. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 3966: Medição de vazão de fluidos em condutos fechados – Método da velocidade em um ponto utilizando tubos de Pitot estáticos. RJ: ABNT, 2013.

BRUNETTI, Franco. Mecânica dos fluidos. 2. ed. SP: Pearson Prentice Hall, 2008.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. Fundamentos da termodinâmica. 7. ed. RS: AMGH, 2013.

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações. 3. ed. RS: AMGH, 2018.

FOX, Robert W.; McDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. Introdução à mecânica dos fluidos. 9. ed. RJ: LTC, 2021.

MUNSON, Bruce R.; YOUNG, Donald F.; OKIISHI, Theodore H.; HUEBSCH, Wade W. Fundamentos da mecânica dos fluidos. 7. ed. SP: Blucher, 2013.