

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS SANTA MARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RAFAEL MARCUZZO BORIN

**METODOLOGIA DE CÁLCULO DE INCERTEZAS DE MEDIÇÃO PARA UMA
BANCADA DINAMOMÉTRICA PARA MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**

SANTA MARIA, RS

2022

Rafael Marcuzzo Borin

**METODOLOGIA DE CÁLCULO DE INCERTEZAS DE MEDIÇÃO PARA UMA
BANCADA DINAMOMÉTRICA PARA MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**

Trabalho de conclusão de curso,
apresentado ao Curso de Engenharia
Mecânica, da Universidade Federal de
Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Santa
Maria, como requisito parcial para
obtenção do título de **Engenheiro
Mecânico**.

Orientador: Prof. Thompson Diórdinis Metzka Lanzasova, PhD

Santa Maria, RS

2022

Rafael Marcuzzo Borin

**METODOLOGIA DE CÁLCULO DE INCERTEZAS DE MEDIÇÃO PARA UMA
BANCADA DINAMOMÉTRICA PARA MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**

Trabalho de conclusão de curso,
apresentado ao Curso de Engenharia
Mecânica, da Universidade Federal de
Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Santa
Maria, como requisito parcial para
obtenção do título de **Engenheiro
Mecânico**.

Aprovado em (dia) de (mês) de (ano):

Thompson Diórdinis Metzka Lanzasova (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Membro 2 da banca de avaliação do trabalho (UFSM)

Membro 3 da banca de avaliação do trabalho (UFSM)

Santa Maria, RS

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço meus pais, Arlindo e Marcia, por todo apoio e esforço durante minha trajetória. A finalização desta etapa é uma conquista deles.

Meus irmãos, Juliano e Bruno, que sempre ajudaram no meu crescimento pessoal e profissional. Mesmo com a distância sempre estiveram presentes.

A toda minha família que sempre ajudaram e apoiaram meus estudos.

A todos meus amigos que ajudaram nesta trajetória e que, muitas vezes, foram a válvula de escape para os momentos difíceis.

Aos professores Thompson D. M. Lazzanov e Mario E. S. Martins pela orientação e aprendizado nos quase três anos que participei do Grupo de Pesquisa em Motores, Combustíveis e Emissões.

Aos demais integrantes do Grupo de Pesquisa em Motores, Combustíveis e Emissões por todos os ensinamentos, ajudas e compartilhamentos.

Aos integrantes do Formula UFSM e Bombaja pelas amizades, experiências e competições.

Aos professores e alunos da Universidade Federal de Santa Maria que convivi durante anos, com ótimas relações e diversos aprendizados.

RESUMO

As Incertezas de medição estão atreladas a experimentos e instrumentos de medição. Elas quantificam a confiabilidade do experimento, ou seja, quanto maior a incerteza, menor é a confiabilidade do resultado. De acordo com as informações resultantes do processo de medição e informações adicionais é possível atribuir um intervalo razoável de valores para o mensurando. O estudo de motores a combustão interna é complexo devido a variações sensíveis nos parâmetros analisados, por isso, para comprovar possíveis ganhos, é necessário que os resultados sejam maiores que o espectro da incerteza. A aquisição dos dados da pressão interna do cilindro e a posição do virabrequim são parâmetros críticos em motores a combustão interna e necessitam de metodologia e de equipamentos robustos para obtenção dos dados. No presente estudo, foi pesquisado uma metodologia para mensurar a incerteza de medição de motores de combustão interna em bancadas dinamométricas através de referências bibliográficas e do guia de expressão de incerteza de medição (INMETRO). Foram mapeadas as fontes de incerteza de medição a fim de validar os dados obtidos em testes e analisar qual a maior fonte de incerteza. Um motor comercial ciclo Otto de quatro cilindros 1,8 litros com injeção de combustível nas portas de admissão foi utilizado para realização dos testes. Foi utilizado etanol como combustível e uma injeção programável FuelTech 450 para controle de injeção de combustível e controle de ignição, buscando sempre a máxima performance. Todos os dados foram adquiridos com as mesmas condições ambientais e com as temperaturas de óleo e líquido de arrefecimento controladas, 110°C e 90°C, respectivamente, com variação máxima de 3°C. Os testes foram realizados após a calibração de todos os sensores, buscando atenuar todas as fontes de incertezas. Foram obtidos dados médios de 200 ciclos de combustão, buscando CV (Coeficiente de Variação) menor que 3,0%. Após aquisição dos dados, foram calculadas as incertezas do Tipo A e Tipo B, incerteza combinada e incerteza expandida, com fator de confiabilidade de 95%. Após análise dos dados, ficou evidente que o aumento do CV influencia proporcionalmente no aumento da incerteza de medição dos dados de pressão de cilindro. Este parâmetro é a principal fonte de incerteza, já que a aquisição dos dados de pressão de cilindro é complexa, devido a exposição ao calor, variabilidade cíclica e diferença de pressão. Além disso, a incerteza de pressão do cilindro influencia diretamente na incerteza de parâmetros como IMEP (Indicate Mean Effective Pressure) e a taxa de liberação de calor. Esses parâmetros apresentaram incertezas de medição na ordem de 10% e 20%, respectivamente.

Palavras chaves: Incerteza, incertezas de medição, motores, bancada dinamométrica, pressão de cilindro.

ABSTRACT

Measurement uncertainties are related to experiments and measurement instruments. They quantify the reliability of the experiment, that is, the greater the uncertainty, the lower the reliability of the result. According to the information resulting from the measurement process and additional information, it is possible to assign a reasonable range of values to the measuring. Studies of internal combustion engines are complex due to sensitive variations in the analyzed parameters, therefore, to prove possible gains, it is necessary that the results be greater than the uncertainty spectrum. The acquisition of internal cylinder pressure data and crankshaft position are critical parameters in internal combustion engines and require robust methodology and equipment to obtain data. In the present study, a methodology was researched to measure the measurement current of internal combustion engines on dynamometric benches through bibliographical references and the measurement uncertainty expression guide (INMETRO). The measurement uncertainty sources were mapped in order to validate the data obtained in tests and analyze which is the greatest source of uncertainty. A 1.8-liter four-cylinder Otto-cycle commercial engine with fuel injection at the intake ports was used for testing. Ethanol was used as fuel and a FuelTech 450 programmable injection for fuel injection control and ignition control, always seeking for maximum performance. All data were acquired under the same environmental conditions and with controlled oil and coolant temperatures, 110°C and 90°C, respectively, with a maximum variation of 3°C. The tests were performed after the calibration of all sensors, seeking to mitigate all sources of uncertainty. Average data of 200 combustion cycles were obtained, looking for CV (Coefficient of Variation) less than 3.0%. After data acquisition, Type A and Type B uncertainties, combined uncertainty and expanded uncertainty were calculated, with a reliability factor of 95%. After analyzing the data, it was evident that the increase in the CV proportionally influences the increase in the uncertainty of measuring the cylinder pressure data. This parameter is the main source of uncertainty, since the acquisition of cylinder pressure data is complex, due to exposure to heat, cyclic variability and pressure difference. In addition, the cylinder pressure uncertainty directly influences the uncertainty of parameters such as IMEP (Indicate Mean Effective Pressure) and the heat release rate. These parameters presented measurement uncertainties in the order of 10% and 20%, respectively.

Keywords: uncertainty, measurement uncertainties, engines, dynamometric bench, cylinder pressure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de probabilidade retangular	19
Figura 2 - Distribuição de probabilidade triangular	19
Figura 3 - Trabalho indicado no ciclo de combustão	255
Figura 4 - Esquema da célula de testes.....	29
Figura 5 - Célula dinamométrica.....	31
Figura 6 - Dinamômetro de bancada	322
Figura 7 - Calibração da célula de carga.....	33
Figura 8 - Sensor de pressão piezoelétrico AVL GH 14D.....	37
Figura 9 – Gráfico da incerteza combinada do volume deslocado do motor	45
Figura 10 - Dados médios de pressão de cilindro adquiridos.....	46
Figura 11 - Incerteza expandida da pressão do cilindro	47
Figura 12 - Taxa de calor liberado dos ciclos	499
Figura 13 - Taxa de calor liberada a 5500 RPM e a incerteza expandida associada	49
Figura 14 - Taxa de calor liberada a 3500 RPM e a incerteza expandida associada	50
Figura 15 - Taxa de calor liberada a 2000 RPM e a incerteza expandida associada	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Característica do motor.....	31
Tabela 2 – Característica do Strain Gauge Precision PSS.....	33
Tabela 3 – Característica do sensor AVL GH 14D.....	38
Tabela 4 - Incertezas combinadas do ângulo do virabrequim e rotação do motor ...	44
Tabela 5 - Coeficiente de Variação dos dados adquiridos	46
Tabela 6 - Tabela do erro relativo do offset do TDC	47
Tabela 7 - Incertezas expandidas do IMEP do motor.....	48
Tabela 8 - Incertezas expandidas do BMEP do motor	51
Tabela 9 - Incertezas expandidas do BSFC do motor	51
Tabela 10 - Incertezas expandidas da potência do motor	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

HCCI	Homogenous Charge Compression Ignition
LTGC	Low Temperature Gasoline Combustion
TDC Offset	Deslocamento da referência do ponto morto superior
C _p	Calor específico a pressão constante
C _v	Calor específico a volume constante
IMEP	Indicated Mean Effective Pressure
BMEP	Brake Mean Effective Pressure
V _d	Volume deslocado
CM	Contagem mínima
RPM	Rotações por minuto
RC	Razão de compressão
FSO	Fundo de escala
ΔP_{peg}	Deslocamento do Pegging
IBDC	Intake Bottom Dead Center
BSFC	Brake Specific Fuel Consumption
CV	Coeficiente de variação
TDC	Top Dead Center
BTDC	Before Dead Center

SUMÁRIO

ABSTRACT	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	9
1. INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETIVOS	13
1.1.1. OBJETIVO GERAL.....	13
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.2. JUSTIFICATIVA	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. MENSURANDO	15
2.2. ERRO.....	15
2.3. INCERTEZA DE MEDIÇÃO	16
2.3.1. Incerteza Tipo A.....	17
2.3.2. Incerteza Tipo B.....	18
2.3.3. Incerteza Combinada.....	19
2.3.4. Incerteza Expandida.....	20
2.4. INCERTEZA DE MEDIÇÃO EM TESTES EXPERIMENTAIS DE MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA.....	20
2.5. PRESSÃO DE CILINDRO.....	23
2.5.1. Pegging	24
2.5.2. Cálculo da pressão média efetiva indicada (IMEP)	25
2.5.3. Taxa de liberação de calor	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1. CÉLULA DINAMOMÉTRICA.....	28
3.2. DINAMÔMETRO DE BANCADA.....	31
3.3. POSIÇÃO DO VIRABREQUIM E INCERTEZA DE MEDIÇÃO DO RPM	33
3.4. INCERTEZA DO VOLUME INSTANTÂNEO DO CILINDRO.....	35
3.5. PRESSÃO DO CILINDRO	36
3.6. PEGGING e DETERMINAÇÃO DO TDC.....	39
3.7. INCERTEZA DE CÁLCULO DO IMEP	40
3.8. INCERTEZA DA TAXA DE LIBERAÇÃO DE CALOR	40
3.9. BRAKE MEAN EFFECTIVE PRESSURE (BMEP).....	41
3.10. BRAKE SPECIFIC FUEL CONSUMPTION (BSFC)	41

3.11. POTÊNCIA.....	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1. INCERTEZA DE MEDIÇÃO EXPANDIDA DA POSIÇÃO DO VIRABREQUIM E RPM.....	44
4.2. INCERTEZA DE MEDIÇÃO EXPANDIDA DO VOLUME DO CILINDRO	44
4.3. INCERTEZA DE MEDIÇÃO EXPANDIDA DA PRESSÃO DE CILINDRO ...	45
4.4. ERRO RELATIVO DO OFFSET DO TDC	47
4.5. INDICATED MEAN EFFECTIVE PRESSURE (IMEP)	48
4.6. TAXA DE LIBERAÇÃO DE CALOR	48
4.7. BRAKE MEAN EFFECTIVE PRESSURE (BMEP).....	51
4.8. BRAKE SPECIFIC FUEL CONSUMPTION (BSFC).....	51
4.9. POTÊNCIA.....	52
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	54
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1. INTRODUÇÃO

Incertezas de medição estão presentes em qualquer experimento de engenharia. No estudo de motores a combustão interna não é diferente. Uma bancada dinamométrica é equipada com diversos sensores a fim de propiciar a aquisição de dados relacionados ao motor e ao processo de combustão. Todos os sensores possuem uma incerteza atribuída que precisa ser mapeada e contabilizada para que seja possível mensurar a incerteza relacionada ao experimento e a grandeza que se quer mensurar.

A incerteza de medição do experimento define a confiabilidade dos resultados. A aquisição de dados é estritamente dependente da maneira como os dados foram obtidos e dos instrumentos utilizados. Em alguns estudos, os ganhos obtidos nos experimentos podem estar dentro da faixa de incerteza do experimento. Isso quer dizer, que talvez não haja uma melhora significativa nos dados analisados, visto que a confiabilidade do experimento é menor do que se necessita para tirar conclusões concretas de melhora.

O estudo de incertezas de medição relacionadas a dados indicados de motores de combustão interna – calculados a partir de pressão instantânea da câmara de combustão - e ao processo de combustão se faz necessário já que os parâmetros a serem avaliados são calculados a partir de dois dados medidos principais: a pressão do cilindro e o ângulo do virabrequim. Como é de conhecimento de pesquisadores de motores, a maneira para se obter o valor de pressão absoluta dentro do cilindro do motor é complexa. Além disso, o sinal obtido pelo sensor deve ser amplificado (gerando ruído), e o sensor sofre estresse com a variação de pressão e temperatura durante o ciclo de combustão. Conseqüentemente, esses aspectos geram incertezas relacionadas. Analogamente, a posição angular do virabrequim necessita de uma resolução adequada para se obter resultados precisos e sem perda de qualidade. Os dados devem ser adquiridos em décimos de graus de ângulo de virabrequim, pois resoluções mais grosseiras geram incertezas de medição elevadas.

A metodologia e instrumentos utilizados nos experimentos definirão o quão confiáveis serão os dados coletados. Como nem sempre é possível utilizar os

melhores sensores do mercado, é possível realizar os testes com sensores de custo inferior e mensurar a incerteza do experimento, avaliando a confiabilidade dos dados.

Assim, através do mapeamento e do cálculo das incertezas de medição é possível definir qual o ponto mais crítico do estudo e quais parâmetros deve-se ter maior atenção. Com isso, o pesquisador consegue definir de maneira objetiva o parâmetro no qual deve ser aplicado uma metodologia e/ou instrumento mais robusto.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

Pesquisar uma metodologia para quantificar as incertezas relacionadas a diversos parâmetros calculados em testes de motores de combustão interna em bancadas dinamométricas.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mapear todos os sensores utilizados na bancada dinamométrica determinando suas respectivas precisões;
- Avaliar quais são as incertezas de medição associadas aos equipamentos da bancada dinamométrica;
- Determinar as incertezas do tipo A e B, e incerteza combinada de cada parâmetro a ser avaliado;

1.2. JUSTIFICATIVA

O mapeamento e determinação das incertezas de medição são importantes em uma bancada dinamométrica, uma vez que experimentos com motores a combustão interna apresentam resultados com variações decimais ou centesimais. As incertezas de medição dos parâmetros analisados devem ser menores que os ganhos apresentados nos estudos para demonstrarem um resultado real. Caso contrário, a suposta melhora pode estar dentro do espectro de incerteza de medição do experimento.

Além disso, é importante utilizar uma metodologia robusta e abrangente para mapear as possíveis fontes de incertezas de medição, visto que diversos fatores podem causar interferências nos experimentos.

Com o estudo é possível determinar o ponto crítico da incerteza de medição em cada parâmetro calculado. Dessa forma, é possível atenuar as incertezas de medição de maneira objetiva.

|

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. MENSURANDO

De acordo com Vocabulário Internacional de Metrologia (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, 2012) “mensurando é a grandeza específica que se pretende medir”. Neste trabalho, pode-se definir mensurando como o objetivo que deverá ser medido.

2.2. ERRO

O erro é o resultado de medição menos o valor verdadeiro do mensurando (JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN MEASUREMENTS, 2008a). Muitas vezes, o valor verdadeiro da medição não pode ser definido. Portanto, o erro é uma grandeza desconhecida.

Podemos classificar os erros de 2 formas:

- Erros aleatórios: são valores que apresentam flutuações variadas para medidas repetidas. Mesmo sendo impossível eliminá-lo, pode ser atenuado se o número de medidas for aumentado.
- Erros sistemáticos: são valores que apresentam o mesmo desvio para medidas repetidas. São fontes de erros identificáveis, pode ser mensurado. É adotado uma correção para atenuar o erro na medição da grandeza.

Conforme (JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN MEASUREMENTS, 2008a), para avaliar melhor o erro de medição, é introduzida uma quantidade chamada erro relativo. Esta apresenta uma razão entre o erro e o valor verdadeiro da grandeza medida. Então, para se diferenciar de forma correta os tipos de erros, chama-se erro absoluto a diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro. O erro absoluto e o erro relativo podem ser expressos como:

Erro ou erro absoluto:

$$E_{abs} = x - x_v \quad (1)$$

Erro relativo, em porcentagem:

$$E_{rel} = \frac{x - x_v}{x_v} \cdot 100\% \quad (2)$$

Onde, x – Valor medido

x_v – Valor verdadeiro

A utilização do erro relativo é mais intuitiva, pois é representada por um número percentual, mostrando de maneira objetiva se o erro é grosseiro ou não.

2.3. INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Segundo *Guide to the expression of uncertainty in measurement* (JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN MEASUREMENTS, 2008a), a palavra “incerteza” significa “dúvida” do resultado de medição. Isso quer dizer, que o valor da incerteza de medição apresenta quais são possíveis valores que o mensurando pode assumir dentro de um intervalo, que é representado pela incerteza. De acordo com o INMETRO, INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA (1999) o resultado de medição somente estará completo quando o valor do mensurando for expresso com sua respectiva incerteza de medição.

A incerteza de medição está presente em todos os experimentos relacionados à engenharia. Incerteza experimental é um valor possível que o erro pode assumir, dentro de um intervalo onde se estima estar o valor real da grandeza medida. Em qualquer experimento deve ser feito o possível para diminuir qualquer incerteza ou interferência, a fim de minimizar os erros de medição.

De acordo com GUM (JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN MEASUREMENTS, 2008a), a incerteza de medição do parâmetro calculado é quantificado com os métodos de avaliação do Tipo A e do Tipo B.

- Incerteza do tipo A: é avaliada a partir de uma análise estatística de uma série de observações, obtidas sobre as mesmas condições. Neste caso, a incerteza padrão é o desvio padrão experimental da média que se obtêm de um procedimento de cálculo da média aritmética ou da regressão adequada.
- Incerteza do tipo B: é avaliada através da probabilidade de que um evento vá ocorrer. Neste caso, é o método de avaliação da incerteza de medição que utiliza

qualquer forma de análise científica que não seja a análise estatística de uma série de observações.

2.3.1. Incerteza Tipo A

A incerteza de medição do Tipo A é calculada a partir de uma amostra suficiente de dados coletados sobre as mesmas condições de medição. Se os dados não sofrerem interferências externas, os resultados apresentarão uma dispersão nítida em relação aos valores obtidos (INMETRO, INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, 1999).

A incerteza do Tipo A é calculada através de uma análise estatística dos dados adquiridos. A partir de um número de observações n , obtemos valores independentes d_i da grandeza medida. A partir da coleta de dados, é calculado a média aritmética \bar{d} simples das observações (JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN MEASUREMENTS, 2008a):

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n d_k \quad (3)$$

Os valores obtidos da medição da grandeza d_i variam de forma indeterminada sobre o valor médio dos dados \bar{d} . A variância experimental S^2 (4) e o desvio padrão S (5) quantificam a aleatoriedade da amostra ao redor da média dos dados \bar{d} (JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN MEASUREMENTS, 2008a).

$$S^2(d_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (d_j - \bar{d})^2 \quad (4)$$

$$S(d_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (d_j - \bar{d})^2} \quad (5)$$

Segundo o JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN MEASUREMENTS (2008a) a variância da média dos valores $S^2(\bar{d})$ e o desvio padrão da média dos valores $S(\bar{d})$ representam a incerteza do Tipo A μ_a . Portanto, a incerteza de medição do Tipo A pode ser calculada através das equações 6 e 7 de uma amostra de dados.

$$S^2(\bar{d}) = \frac{S^2(d_i)}{n} \quad (6)$$

$$S(\bar{d}) = \frac{S(d_i)}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

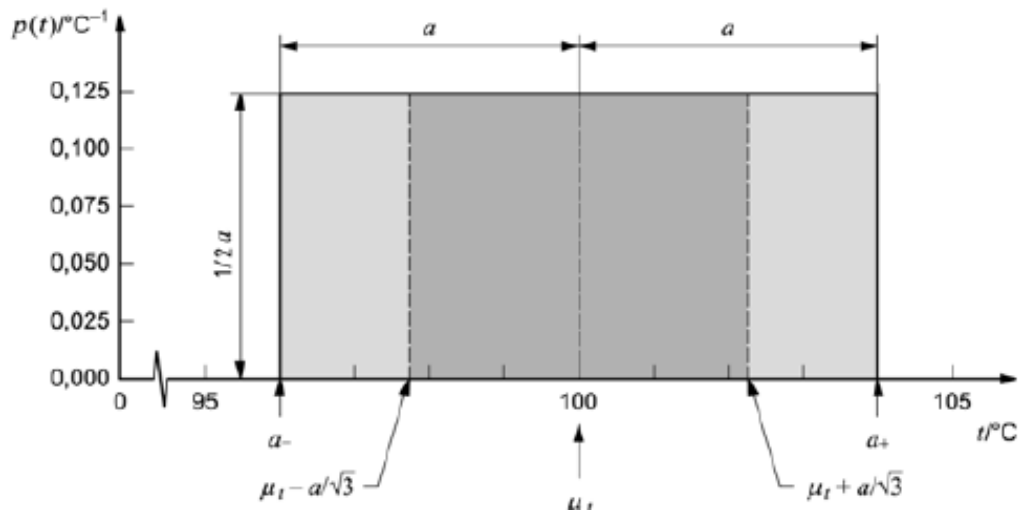
2.3.2. Incerteza Tipo B

A incerteza do Tipo B avalia qualquer outra forma de incerteza de medição que possa ocorrer em uma grandeza de entrada que não seja avaliada através de uma análise estatística. A incerteza do Tipo B abrange avaliações científicas. Podemos utilizar especificações técnicas dos equipamentos (incerteza de medição, linearidade, repetibilidade), certificados de calibração, experiência do operador do experimento, entre outros (JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN MEASUREMENTS, 2008a):

Neste trabalho as incertezas do Tipo B foram calculadas utilizando as especificações fornecidas pelos fabricantes dos sensores utilizados. O JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN MEASUREMENTS (2008a) define duas formas para classificar uma incerteza do Tipo B, de acordo com as figuras 1 e 2 .

A figura 1 representa uma grandeza de entrada onde não é possível definir nenhuma probabilidade dentro do intervalo de medição, ou seja, não é possível definir se é mais provável que a grandeza de entrada está no meio ou no limite de intervalo de medição. Dessa forma, é utilizado uma distribuição retangular. u_1 representa a grandeza medida e a representa os intervalos máximos.

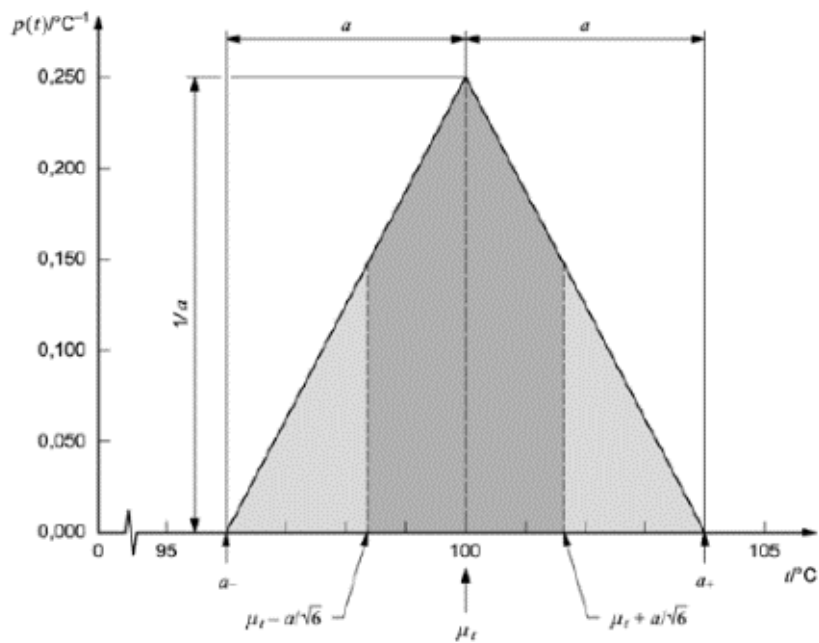
Figura 1 - Distribuição de probabilidade retangular



Fonte: JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN MEASUREMENTS (2008a)

Para a figura 2, é possível definir que haja uma probabilidade maior da grandeza de entrada estar no meio do intervalo de medição, do que nos limites do intervalo. Dessa forma, é utilizado uma distribuição de probabilidade triangular.

Figura 2 - Distribuição de probabilidade triangular



Fonte: JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN MEASUREMENTS (2008a)

Os coeficientes para uma distribuição retangular e uma distribuição triangular são $\sqrt{3}$ e $\sqrt{6}$, respectivamente.

2.3.3. Incerteza Combinada

A incerteza combinada é o somatório das fontes de incertezas de medição do parâmetro calculado, para as incertezas do Tipo A e Tipo B. A incerteza-padrão combinada é expressa através da equação 8 (JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN MEASUREMENTS, 2008a):

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (8)$$

f é a função da grandeza calculada. $u(x_i)$ são as incertezas-padrões do Tipo A e do Tipo B. A incerteza combinada $u_c(y)$ representa a confiabilidade dos dados calculados.

$\frac{\partial f}{\partial x_i}$ são denominados “Coeficientes de sensibilidade” e demonstram a influência dos valores da base de dados. (JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN MEASUREMENTS, 2008a).

2.3.4. Incerteza Expandida

A Incerteza expandida representa o nível de confiança associado ao intervalo de incerteza de medição. A Incerteza Expandida U é calculada pela equação 9 (JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN MEASUREMENTS, 2008a).

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (9)$$

O fator de abrangência k determina o intervalo de confiança. Para um intervalo de confiança de 68%, $k = 1$; de 95%, $k = 2$; de 99%, $k = 3$ (JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN MEASUREMENTS, 2008a).

2.4. INCERTEZA DE MEDIÇÃO EM TESTES EXPERIMENTAIS DE MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA

Alguns trabalhos foram utilizados para comparar valores de incertezas de medição experimentais em testes de motores a combustão interna.

O trabalho PETITPAS (2018) mensurou as incertezas de medição de um motor (HCCI)/(LTGC). O autor utiliza uma estrutura para melhorar os cálculos de incerteza de medição, gerando uma redução na incerteza da pressão durante os tempos de admissão e exaustão. Calibração de laboratório e execuções de comissionamento foram utilizados para assegurar a sensibilidade dos transdutores em relação aos dados fornecidos pelos fabricantes.

Um motor monocilíndrico Diesel de 0,98 litros com razão de compressão de 14:1 foi utilizado para realização dos testes. Um sensor piezoelétrico AVL QC34C foi instalado no motor para realização dos testes, onde foram adquiridos 100 ciclos de combustão consecutivos. Ao final dos testes, os resultados obtidos foram uma incerteza combinada de pressão de cilindro de 75 kPa para um pico de 16000 kPa.

A redução da incerteza combinada de pressão foi ocasionada principalmente pela redução dos erros de linearidade e desvios de temperatura após a calibração e configuração do transdutor. O autor concluiu que, durante o período de pressão máxima do cilindro acontece a maior incerteza combinada devido as variações aleatórias na pressão medida a cada ciclo, o que ocasiona uma variação aleatória na taxa de liberação de calor. Esses tipos de variações não podem ser atenuadas aumentando a precisão do sensor.

O estudo de BAŁKOWSKI; RADZISZEWSKI; ŻMINDÁK (2016) analisou a incerteza de medição de pressão no cilindro. Foram realizadas avaliações de incertezas do Tipo A e Tipo B em um motor Diesel que utilizou Diesel e Biodiesel nos experimentos. A medição da pressão do cilindro foi medida utilizando um sensor AVL QC34D montado diretamente no cilindro e resfriado com um líquido. Foram adquiridos 50 ciclos de combustão completos em rotações entre 1000 e 2000 rpm.

Os valores de incerteza de pressão de cilindro do Tipo A obtidos para máxima pressão de cilindro variaram entre 0,012 e 0,015 MPa.

A incerteza do Tipo B da pressão máxima do cilindro, calculada utilizando uma distribuição triangular de probabilidade medida foi de: $u_B = 0,046$ MPa.

O trabalho SKRZEK (2020) abordou uma metodologia para medição instantânea de pressão de cilindro. O trabalho propôs realizar uma estimativa da

incerteza do Tipo A e avaliou sua repetibilidade. Foi utilizado no experimento um motor Diesel AVL 5402 com 0,511 litros com um sensor AVL GU22C instalado.

Os dados de pressão de cilindro foram adquiridos com 0,1° de resolução de ângulo de virabrequim durante o ciclo de expansão. Foram adquiridos 32 ciclos consecutivos, repetidas vezes, com valores de pressão entre 32,19 até 32,45 Bar. A cada vez que novos dados foram adquiridos, os valores de pressão máxima foram ligeiramente menores, o que mostra uma incapacidade de manter inalterada a influência de todos os fatores nos resultados de medição. O autor constatou que as pressões máximas durante os testes nem sempre aconteciam na mesma posição do ângulo do virabrequim. A incerteza expandida da pressão do cilindro foi de $u_{99\%} = 0,007 \text{ MPa}$, para um fator $k = 3$.

O trabalho de POCHET, MAXIME; JEANMART, HERVÉ; CONTINO (2019) foi utilizado como a metodologia para determinar a incerteza de pressão de cilindro deste trabalho. O autor utilizou um intervalo de confiança de 95% nos cálculos do trabalho. Foram calculadas as incertezas de diversos parâmetros experimentais de estudos de motores a combustão interna, entre eles, de pressão de admissão, pressão de exaustão, posição do ângulo do virabrequim, rotação do virabrequim, volume do cilindro, pressão de cilindro e IMEP. A metodologia foi aplicada para avaliação das incertezas experimentais de um motor de hidrogênio operando em *HCCI*. A pressão máxima no cilindro foi de $93 \pm 0,9 \text{ bar}$.

O autor constatou que a incerteza combinada da pressão de cilindro no pico de pressão foi composta por 45% da incerteza do Tipo A, 44% da incerteza do Tipo B.

No trabalho de Petitpas PETITPAS; MCNENLY; WHITESIDES (2017), foi realizada uma análise das incertezas experimentais em um motor *Homogenous Charge Compression Ignition (HCCI)/Low-Temperature Gasoline Combustion (LTGC)*. As incertezas de medição foram calculadas conforme o EURACHEM/CITAC GUIDE (2012) e JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN MEASUREMENTS (2008a).

O autor desenvolveu um diagrama de causa-efeito (diagrama de Ishikawa) para medição da pressão do cilindro, identificando os erros sistemáticos e erros aleatórios.

Os testes foram realizados a 1300 RPM com 7 bar de carga, a resolução do ângulo do virabrequim utilizada foi de 0,25°. Os estudos foram realizados utilizando

um sensor piezoelétrico AVL QC34C instalado na câmara de combustão e um amplificador de sinal Kistler Type 5010.

Utilizando um intervalo de confiança de 95% os valores da incerteza de medição do IMEP foram de 1202 ± 36 kPa, a pressão máxima do cilindro foi de 10802 ± 157 kPa.

2.5. PRESSÃO DE CILINDRO

A pressão do cilindro é o parâmetro de medição mais importante no estudo de motores a combustão interna. Os dados indicados são calculados a partir da pressão do cilindro durante o ciclo de combustão do motor.

Quantificar a pressão do cilindro do motor é uma tarefa complexa. O sensor necessita atender diversas características. Ser compacto suficiente para ser instalado na câmara de combustão, não afetar a geometria da câmara de combustão, ser robusto para suportar as variações de pressão e temperatura durante os ciclos de combustão, além de alta linearidade, alta frequência de resposta e alta resistência a cargas térmicas.

Estudos comparando transdutores disponíveis no final da década de 1960 (por exemplo, BROWN, 1967) descobriram que sensores com cristais piezoelétricos como elemento de medição exibiam melhor tolerância a solicitações térmicas do que aqueles baseados em *Strain Gauges*. Transdutores piezoelétricos apresentam a característica do material de quartzo que compõe o sensor, que é gerar uma carga elétrica quando submetido a um estresse mecânico, que é proporcional a carga de estresse.

O sensor de pressão piezoelétrico é um produto de alto valor agregado e o sinal coletado pela placa de aquisição possui ruído. Como a pressão e a temperatura dentro do cilindro varia dinamicamente durante o ciclo de combustão, o ruído é intensificado durante alguns períodos do ciclo do motor.

O sensor de pressão piezoelétrico não mensura pressão absoluta com precisão devido ao chamado *Drift*, que é o acúmulo de carga. A medição da pressão instantânea no cilindro do motor expõe o transdutor de pressão a grandes variações de pressões e temperaturas durante o período de combustão. A variação de

temperatura influencia na sensibilidade do sensor e do elemento piezoelétrico durante o ciclo de combustão. As variações térmicas causam tensões térmicas na carcaça e no diafragma do transdutor, por consequência, esse estresse mecânico gera distorções no elemento de quartzo e no sinal coletado pela placa de aquisição (MARZOUK; WATSON, 1976).

Pesquisas de motores a combustão interna são realizadas com parâmetros de operação definidos, adquirindo uma série de ciclos de combustão completos e consecutivos. Uma média aritmética simples é calculada dos dados obtidos a fim de reduzir os efeitos dos ruídos e das variações cíclicas. Com os dados médios é possível calcular a taxa de liberação de calor, a temperatura dentro do cilindro e a fração da massa queimada de maneira mais robusta. LANCASTER; KRIEGER; LIENESCH (1975) estudou os efeitos das variações ciclo-a-ciclo nos dados de pressão do cilindro e propôs que sejam necessários 300 ciclos para garantir a precisão na pressão média do cilindro. BRUNT; EMTAGE (1996) sugeria que um número mínimo de 150 ciclos eram necessários para uma precisão razoável, já que 300 ciclos apresentavam limitações dentro dos sistemas de aquisição de dados da época. Por outro lado, CEVIZ (2011) concluiu experimentalmente que 50 ciclos são suficientes para determinar o valor da covariância e obter o ciclo de pressão média, já que valores superiores não apresentam mudanças significativas de variância. O autor ainda acrescenta que os resultados também são aplicáveis a motores a Diesel devido a combustão mais estável. No presente trabalho, serão coletados dados de 200 ciclos que posteriormente serão utilizados para o cálculo de uma média aritmética simples.

Mensurar a pressão dentro do cilindro é de vital importância para estudos em bancadas dinamométricas para determinar parâmetros como a taxa de liberação de calor, duração de combustão, e o IMEP. Entretanto, há algumas dificuldades: os sensores piezoelétricos captam variações de pressões e não a pressão absoluta.

2.5.1. Pegging

O processo de referenciamento da variação de pressão captada a uma escala absoluta chama-se de *Pegging*.

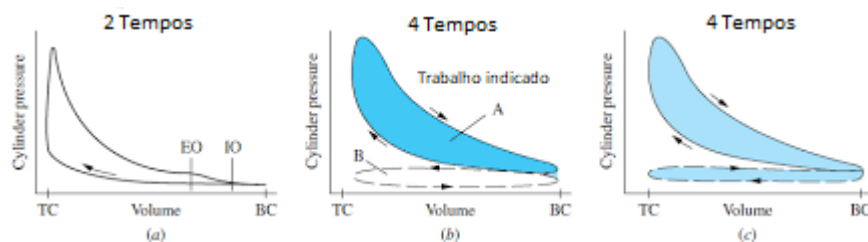
O estudo de RANDOLPH (1990) elencou nove formas de realizar o *Pegging*. Os nove métodos apresentam variações sutis entre eles. Neste trabalho, foi utilizado o primeiro método descrito no artigo. No período de *Intake bottom Dead Center (IBDC)* as pressões do coletor de admissão e do cilindro são referenciadas. Esta técnica funciona de maneira precisa para baixas frequências angulares. O autor sugere utilizar um intervalo de pontos próximo ao *IBDC* para aumentar a precisão. A referência da pressão do cilindro é realizada com a utilização de um segundo sensor com escala absoluta instalado no coletor de admissão do motor.

O método foi escolhido por conveniência, já que o coletor de admissão do motor é originalmente equipado com sensor de pressão, e este dado foi coletado para controle das condições de operação durante os testes. Além disso, o referenciamento através desse método não necessita utilizar mais de um sensor câmara de combustão nem cálculo de coeficiente politrópico.

2.5.2. Cálculo da pressão média efetiva indicada (IMEP)

A pressão gerada pelos gases dentro do cilindro no ciclo de combustão é utilizada para calcular o trabalho realizado pelos gases durante o ciclo. A variação de pressão de cilindro e o volume instantâneo correspondente ao longo do ciclo do motor pode ser apresentado em um gráfico P-V.

Figura 3 - Trabalho indicado no ciclo de combustão



Fonte: Heywood (2018)

A pressão média efetiva indicada (IMEP) define a carga de operação do motor a combustão interna. O IMEP é uma forma de comparar a eficiência de motores com diferentes deslocamentos volumétricos em uma mesma condição. O cálculo do IMEP é dado por:

$$\text{IMEP} = \frac{\int_{-360^{\circ}}^{+360^{\circ}} p_i dV}{V_d} = \frac{W_{c,i}}{V_d} \quad (10)$$

Segundo BRUNT; EMTAGE (1996) para calcular o IMEP com precisão precisamos: Os dados de pressão do cilindro em relação ao ângulo do virabrequim e a integração da pressão e do volume do cilindro (BRUNT; EMTAGE, 1996). Os autores concluíram que para diferentes metodologias de cálculo não há mudanças significativas, desde que as resoluções no incremento do ângulo do virabrequim sejam menores que 0,5°.

2.5.3. Taxa de liberação de calor

Segundo STONE (1999), a taxa de liberação de calor calcula a quantidade de calor que é adicionada no cilindro para produzir as variações de pressão observadas em cada intervalo angular do virabrequim. De acordo com GAINEY; LONGTIN; LAWLER (2019) os estudos apontaram que uma resolução de 0,8° CAD é suficiente, mas perto da liberação de calor, o incremento deve ser refinado o máximo possível. Além disso, incertezas na proporção dos calores específicos podem gerar incertezas do NHRR (Net Heat release Rate) (GAINEY; LONGTIN; LAWLER, 2019).

A equação para a taxa de liberação de calor líquida aparente (apparent net heat release rate) para γ constante é:

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma - 1} V \frac{dP}{d\theta} \quad (11)$$

Q é a taxa de liberação de calor líquida aparente;

$$R = c_p - c_v$$

P é a pressão do cilindro em Pascal;

V é o volume do cilindro em metros cúbicos;

γ é a razão de calores específicos $\left(\frac{c_p}{c_v}\right)$.

CATON (2014) comparou as curvas de pressão x volume para diferentes valores de gamma. As diferenças entre as três curvas apresentas são modestas. O

autor concluiu que à medida que o valor de γ aumenta, o trabalho de expansão diminui, causando um efeito ligeiramente negativo no ciclo de combustão.

PETITPAS; MCNENLY; WHITESIDES (2017) obteve 100 ciclos de combustão completos e consecutivos medindo os valores de incerteza de medição do experimento com um intervalo de confiança de 95%. A taxa de liberação acumulada (Cumulative heat release) mensurada foi de 2219 ± 241 Joules. Além disso, o CA50 foi de $14 \pm 1^\circ$, esta medida é utilizada para obter o momento onde 50% da energia do combustível é liberada dentro da câmara de combustão.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia forneceu um conjunto de equações e instruções para que se pudesse calcular a incerteza de medição em estudos de motores a combustão interna em uma bancada dinamométrica. A análise foi construída para ser utilizada para diferentes motores, independente da geometria do motor ou combustível utilizado.

A instrumentação utilizada foi escolhida de acordo com a fidelidade dos resultados esperados. Ou seja, para valores mais precisos, seria necessário utilizar sensores com menores incertezas de medição.

A incerteza da medição depende do valor de confiança desejado, no caso deste trabalho, o intervalo de confiança desejado foi de 95%. Por isso, a incerteza expandida foi igual a duas vezes o desvio padrão dos conjuntos de dados.

3.1. CÉLULA DINAMOMÉTRICA

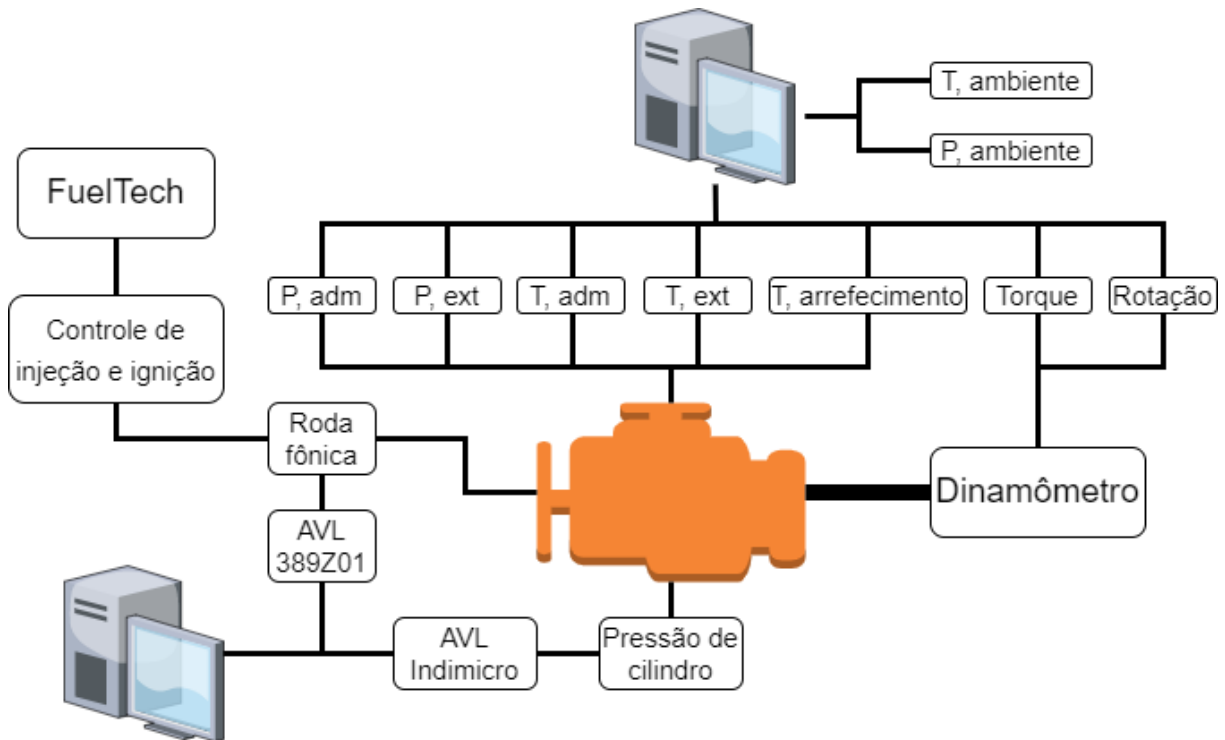
O dinamômetro é um equipamento utilizado para diversos estudos de motores a combustão interna. Ele é utilizado para gerar uma carga no motor, dissipando sua energia. Através de um eixo conectado ao virabrequim do motor, o dinamômetro foi o instrumento utilizado para medir a força de frenagem e foi capturada por uma célula de carga através de uma placa de aquisição de dados.

O motor foi instrumentado para adquirir-se diversos dados que foram utilizados para fazer a análise deste trabalho. Instalou-se uma roda fônica de 60-2 dentes para obtenção da rotação e posição angular do virabrequim. Um sensor de pressão de cilindro foi instalado na câmara de combustão do cilindro número 1. Termopares tipo K Cromel/Alumel com faixa de operação de -200 a 1200°C e sensores de pressão (MPX 5700A) foram instalados nos coletores de admissão e exaustão. Dois termopares foram instalados para controle de temperatura do motor durante os testes, um no cárter do motor para aferir a temperatura de óleo e um no duto de saída do fluido de arrefecimento aferir a temperatura. Além disso, um termopar e um sensor de pressão foram instalados na célula dinamométrica para aferir a temperatura e pressão do ambiente.

Sensores utilizados na célula dinamométrica

Temperatura do motor	Termopar tipo K
Temperatura do óleo	Termopar tipo K
Temperatura na porta de admissão	Termopar tipo K
Temperatura na porta de exaustão	Termopar tipo K
Temperatura ambiente na célula dinamométrica	Termopar tipo K
Pressão na porta de admissão	Sensor MPX 5700A
Pressão na porta de exaustão	Sensor MPX 5700A
Pressão ambiente na célula dinamométrica	Sensor MPX 5700A

Figura 4 - Esquema da célula de testes



Fonte: Autor

Foram utilizados dois computadores para a realização dos testes. O primeiro computador foi para aquisição dos dados da célula dinamométrica para os dados de baixa frequência. Os sinais foram adquiridos por uma placa de aquisição, transformados e armazenados através do *Software* labVIEW®. Os valores eram apresentados de maneira gráfica no computador. Apesar dos dados de pressão e temperatura dos coletores de admissão e exaustão do motor não terem sido utilizados

para calcular as incertezas de medição, eles foram monitorados para validar as condições dos testes.

Os sensores foram calibrados antes do início dos testes, buscando atenuar qualquer parâmetro externo que pudesse interferir no resultado adquirido. Os sensores de temperatura foram calibrados com um termômetro de mercúrio calibrado. Os sensores de pressão foram calibrados em pressão atmosférica de acordo com um barômetro calibrado. O sensor de célula de carga foi calibrado com pesos padrão.

O segundo computador foi utilizado para aquisição dos dados de alta frequência que foram coletados através do AVL Indimicro 602 e processados através do *software* AVL Indicom Mobile, em tempo real. Os dados de pressão de cilindro e análise de combustão foram armazenados no durante os testes.

Neste trabalho foram avaliadas três condições de testes em diferentes rotações, sempre em carga máxima. Os dados foram adquiridos com temperatura do fluido de arrefecimento estável em 90 °C e temperatura de óleo controlada em 110 °C, com variação máxima de 3°C. A célula dinamométrica não possuía controle de climatização, porém as condições ambientes foram monitoradas durante a realização dos testes para que não fossem geradas interferências no experimento.

O motor utilizado nos testes foi um motor comercial, utilizado em larga escala no mercado brasileiro. O motor foi completamente reformado antes do início dos testes experimentais utilizando-se peças originais. Algumas modificações foram realizadas para propiciar controle de avanço de ignição e tempo e duração de injeção de combustível. Para isso, foi instalada uma injeção programável FuelTech 450 para controle de injeção e ignição e uma FuelTech Wideband nano para monitoramento da razão ar/combustível. A calibração do motor foi realizada e apresentada em outro estudo (BALBOM, 2022). Os mapas de ignição e injeção foram construídos para extrair a máxima performance do motor. O combustível utilizado foi etanol hidratado combustível (E95W05 - 95% de etanol e 05% de água).

Antes de realizar a montagem do motor, foram adquiridas as medidas internas de diâmetro de cilindro, raio do virabrequim, comprimento de biela e razão de compressão. Esses dados foram utilizados, posteriormente, para calcular a incerteza de medição do volume instantâneo do cilindro.

Para o cálculo da incerteza de medição foram coletados cinco dados para a amostra. Os cilindros foram medidos com um micrômetro com resolução 1/100 mm e

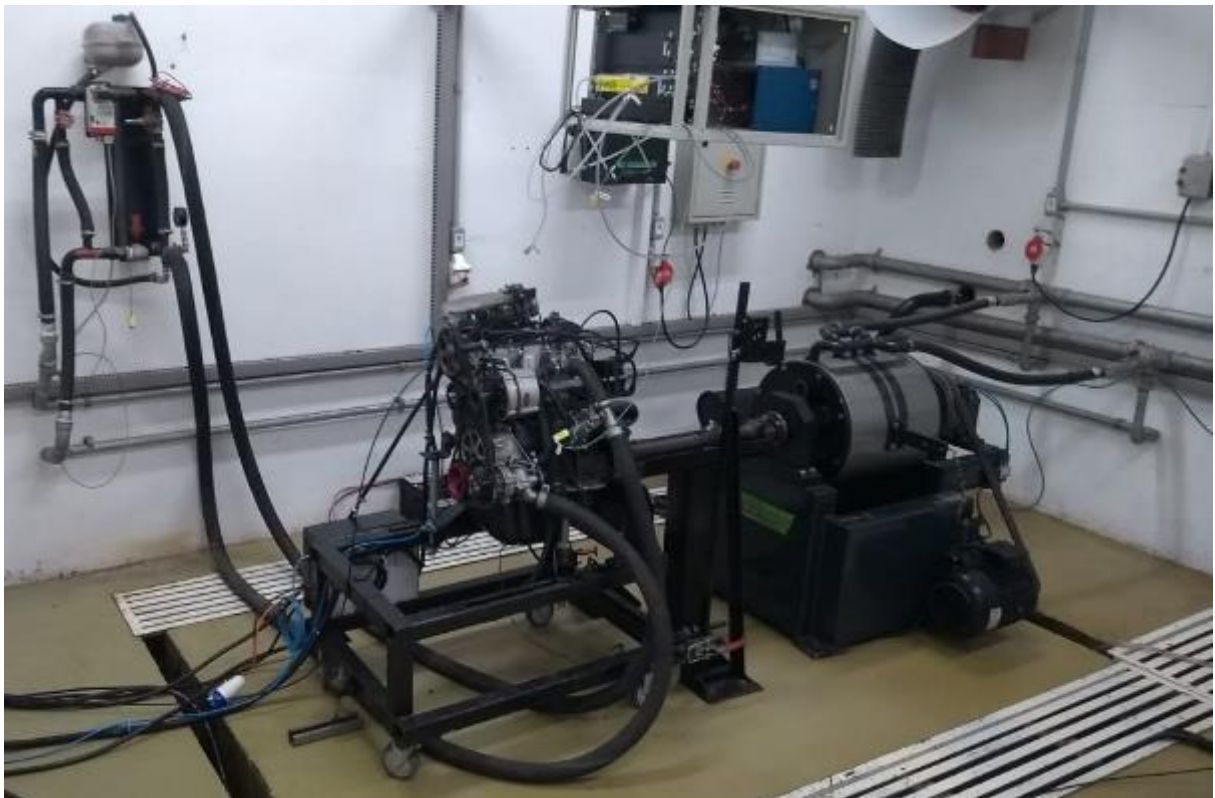
as medidas foram feitas na saia do pistão. As medidas do comprimento da biela e raio do virabrequim foram realizadas com um paquímetro com resolução 1/50 mm. A razão de compressão foi calculada com o raio do virabrequim, o diâmetro do cilindro e o volume morto da câmara de combustão. Este último foi medido com uma bureta graduada e não foram contabilizadas as incertezas em relação a este parâmetro.

Motor Volkswagen AP 1.8L 2004 modificado:

Tabela 1 - Característica do motor

Volume deslocado	1802,93 cm ³
Nº de Cilindros	4
Diâmetro do cilindro	81,48 ± 0,012 mm
Raio do virabrequim	43,21 ± 0,024 mm
Comprimento da biela	144,01 ± 0,025 mm
Razão de compressão	8,11

Figura 5 - Célula dinamométrica

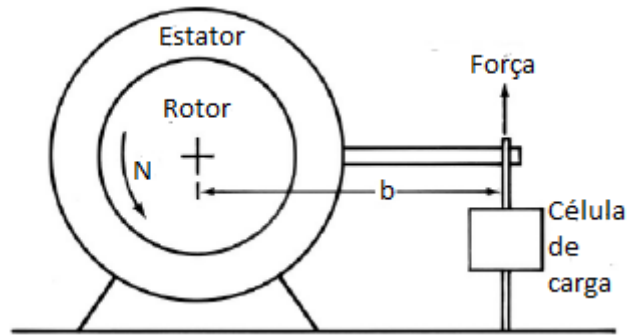


Fonte: Autor.

3.2. DINAMÔMETRO DE BANCADA

No trabalho, foi utilizado um dinamômetro do tipo correntes parasitas modelo MWD NL-260-E com capacidade de 295 kW a 10000 RPM. Neste tipo de dinamômetro, a energia do motor é dissipada através do fenômeno físico de indução eletromagnética, onde um campo de corrente alternada flui através de uma bobina e gera um campo eletromagnético oscilante.

Figura 6 - Dinamômetro de bancada

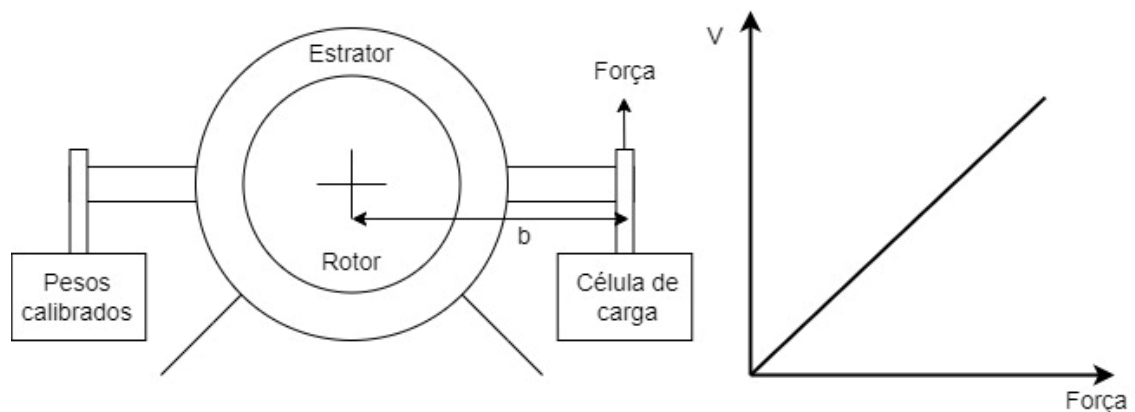


Fonte: Heywood (2018)

A força de frenagem realizada pelo dinamômetro foi medida com a instalação de um braço de alavanca e uma célula de carga que foram instalados na célula dinamométrica. Um sensor Strain Gauge modelo Precision PSS foi utilizado para obtenção dos dados de força. A aquisição dos dados foi realizada através de uma placa microcontrolada de Arduino UNO conectada ao *Software* labVIEW®.

O sinal de tensão (V) gerado pelo sensor, foi referenciado através da força (F) de acordo com uma equação linear obtida através da calibração do sensor. A equação foi definida utilizando pesos calibrados. Os pesos foram adicionados e foram coletados dados (tensão elétrica x força), através de uma regressão linear obteve-se a equação utilizada para o cálculo do torque do motor. O coeficiente de determinação obtido foi de 0,99. A calibração foi realizada antes do início dos testes. Incertezas de medição relacionadas a balança de medição e a equação do coeficiente não foram contabilizadas.

Figura 7 - Calibração da célula de carga



Fonte: Autor

Para o cálculo da incerteza de medição do torque de eixo do motor, foi considerada a incerteza do Tipo B do sensor *Strain Gauge* e a incerteza do braço de alavanca, que foi medido com uma trena métrica com menor divisão de 1 mm e amostra de cinco medidas.

Tabela 2 - Características do Strain Gauge Precision PSS

Strain Gauge	% (FS)
Histerese	2,00%
Repetibilidade	2,00%
Alinhamento	3,00%

A medição de pressão instantânea de cilindro foi realizada com um transdutor piezoelétrico AVL GH14D. A posição do ângulo do virabrequim foi adquirida através de uma roda dentada instalado no motor, com 60-2 dentes. Um condicionador de pulsos AVL 389Z01 foi utilizado para dividir o sinal do sensor indutivo da roda dentada em 3600 pulsos. O valor é o máximo que o aparelho caracteriza, mapeando a posição do ângulo do virabrequim a cada 0.1°, o que atenua as incertezas de medição do parâmetro da posição do ângulo do virabrequim.

Os sinais de pressão de cilindro e a posição do ângulo de virabrequim foram adquiridos pelo AVL Indimicro 662. Posteriormente, os dados foram processados em tempo real e a análise de combustão é feita através do *software* AVL Indicom Mobile.

3.3. POSIÇÃO DO VIRABREQUIM E INCERTEZA DE MEDIÇÃO DO RPM

Na bancada dinamométrica foram medidas a velocidade angular e a posição angular instantânea do virabrequim. Essas grandezas são calculadas com o sinal de um sensor indutivo através de uma roda fônica. Os dentes da roda fônica geram uma série de pulsos no sensor indutivo, com a diferença de tempo entre os pulsos, a ECU calculou a velocidade angular do virabrequim. O sinal do sensor indutivo também foi utilizado para aquisição dos dados de alta frequência utilizados para a análise de combustão. O sinal do sensor indutivo foi obtido e transformado pelo condicionador de pulsos AVL 389Z01, que dividiu digitalmente a posição do virabrequim a cada 0,1°.

Os erros associados ao ângulo do virabrequim são propagados significativamente para cálculos de taxa de liberação de calor e nos cálculos de IMEP. Segundo a literatura o erro de 1° CAD na posição do *TDC* pode acarretar em um erro de 10% no valor da pressão indicada e na taxa de liberação de calor (WANG et al., 2007).

Para a posição do ângulo do virabrequim, como o instrumento utilizado possui um potencial de pulsos por rotação for maior que o necessário, nenhuma incerteza de medição por transbordamento pode surgir. Então, a única incerteza de medição associada é chamada de contagem mínima (CM), que é a menor variação que pode ser capturada pela ferramenta de medição (POCHET, MAXIME; JEANMART, HERVÉ; CONTINO, 2019). Neste trabalho, a CM foi de 0,1° que é a menor resolução possível de captura do equipamento. Como não há informações adicionais do sensor, não foi estipulado uma distribuição de probabilidade sobre os intervalos de medição. A incerteza de medição da CM foi obtida como:

$$u_{cm} = \frac{CM}{\frac{2}{\sqrt{3}}} \quad (12)$$

A partir da equação da CM e a equação da incerteza combinada 8, obtemos a incerteza de medição da posição do ângulo do virabrequim:

$$\theta_{real} = \theta_{\pm} \frac{CM}{2} \quad (13)$$

$$u_{\theta} = u_{\theta,CM} \quad (14)$$

$$U_{95,\theta} = \pm u_{cm} \cdot 2 \quad (15)$$

Em relação à velocidade angular do motor, a incerteza de medição foi calculada de acordo com a metodologia do trabalho do (POCHET, MAXIME; JEANMART, HERVÉ; CONTINO, 2019). A incerteza de medição da rotação do motor foi obtida através da CM e um intervalo de tempo, superior a 5 ciclos completos do motor. O erro absoluto relacionado a contagem mínima, a incerteza foi expressa como:

$$\Delta_{tempo} = \frac{\frac{3600 \pm CM}{2}}{\frac{360}{RPM}} \cdot 60 \quad (16)$$

$$u_{RPM}^2 = \left(\frac{u_{\theta, LC}}{6 \cdot \Delta_{tempo}} \right)^2 \quad (17)$$

$$U_{95, RPM} = \pm 2 \cdot u_{RPM} \quad (18)$$

3.4. INCERTEZA DO VOLUME INSTANTÂNEO DO CILINDRO

O volume instantâneo do cilindro é uma grandeza que impacta no cálculo de outras grandezas calculadas como o IMEP, a duração da combustão e taxa de liberação de calor. O cálculo desta grandeza depende diretamente da posição do ângulo do virabrequim, assim como, sua incerteza. O cálculo estático do volume do cilindro e a razão de compressão (RC) também são utilizados para os cálculos. A equação do volume instantâneo do cilindro pode ser calculada por:

$$V_{cil} = \frac{\pi D_p^2 O}{4} \left[\frac{1}{RC - 1} + 0,5 \left(\frac{2L}{O} + 1 - \cos(\theta) - \sqrt{\left(\frac{2L}{O} \right)^2 - \text{sen}^2(\theta)} \right) \right] \quad (19)$$

Onde,

D_p – Diâmetro do cilindro;

O – Curso do virabrequim;

RC – Razão de compressão geométrica do motor;

L – Comprimento da biela;

As características geométricas do motor foram medidas em laboratório com equipamentos adequados, um paquímetro, um micrômetro e um súbito medidor. Por isso, a equação acima contabiliza a geometria e o volume efetivo do cilindro. Assumindo que as peças internas do motor (pistões, bielas, pino de pistão e eixo de

manivelas) são perfeitamente rígidas. Além disso, a película de óleo do mancal que eventualmente pode impactar o volume do cilindro foi desconsiderada. A incerteza relativa em relação ao volume do cilindro é expressa como (POCHET, MAXIME; JEANMART, HERVÉ; CONTINO, 2019):

$$u_{V_{cil}}^2 = \left(\frac{\partial V_{cil}}{\partial \theta} u_{\theta} \right)^2 + \left(-\frac{\pi D_p^2 S}{4(RC - 1)^2} u_{RC} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial L} u_u \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial S} u_u \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial D_p} u_u \right)^2 \quad (20)$$

A incerteza u_u é associada a incerteza de medição da usinagem do motor. Para essa incerteza de medição, os valores de diâmetro de cilindro, curso do virabrequim e comprimento da biela foram considerados exatos, sem a incerteza de medição associada. Isso se deve ao fato de os valores geométricos do cilindro serem mensurados com instrumentos no qual a incerteza de medição associada é relativamente insignificante, comparados aos valores de incerteza associados a incerteza do ângulo do virabrequim e a incerteza da razão de compressão. Segundo o estudo realizado por (PETITPAS et al., 2018) as deformações das peças do motor em um ciclo de combustão de 160 bar de pressão máxima, é inferior a 1% em comparação a peças totalmente rígidas.

3.5. PRESSÃO DO CILINDRO

A pressão do cilindro foi calculada através do sinal de um sensor piezoelétrico instalado em um determinado local da câmara de combustão no cabeçote do motor. No experimento foi utilizado o sensor AVL GH 14D, mostrado na figura 7. O transdutor de pressão piezoelétrico gera uma carga eletrostática proporcional a força aplicada no elemento piezoelétrico do sensor (AVL, 2011).

Figura 8 - Sensor de pressão piezoelétrico AVL GH 14D



Fonte: AVL.

O sensor piezoelétrico mensura pressão relativa, portanto o sinal adquirido não possui referência de pressão. O processo de referenciamento da pressão dentro da câmara de combustão é chamado de *pegging*. Existem vários métodos para realizar este procedimento. Neste estudo, foi utilizado o método do referenciamento adquirindo um pontos de pressão durante o *BDC* (Bottom Dead Center), no ciclo de admissão. O procedimento será explicado posteriormente.

Os dados de pressão do cilindro foram adquiridos através de um amplificador de sinal AVL INDIMICRO. A determinação do *TDC* é realizada com o auxílio de um relógio comparador com resolução de 0,01mm, instalado no local da vela de ignição do motor. Na incerteza de medição da pressão do cilindro, não foi mensurado a incerteza de medição associada ao *Offset do TDC* (u_t). A incerteza combinada do *Offset do TDC* representa 10% e o *offset Pegging* representa 1% (POCHET, MAXIME; JEANMART, HERVÉ; CONTINO, 2019).

A pressão interna da câmara de combustão foi obtida através da transformação da corrente elétrica gerada pelo sensor e, posteriormente, amplificada pelo amplificador de sinal. Os dados adquiridos no pós-processamento são convertidos de relativa para pressão absoluta, gerando a incerteza associada ao *offset* ΔP_{peg} . Portanto, usamos o seguinte (POCHET, MAXIME; JEANMART, HERVÉ; CONTINO, 2019):

$$P_{cilindro} = P_{medida,relativa} \frac{G_{pzt}}{G_{amp}} + \Delta P_{peg} \quad (18)$$

Onde, G_{pzt} e G_{amp} são os ganhos do sensor piezoelétrico e do amplificador de sinal. Utilizando a equação 8 e conhecendo as características do amplificador de sinal, podemos obter a equação da incerteza do sensor de pressão:

$$u_{p,cilindro}^2 = u_{lin,pzt}^2 + u_{lin,amp}^2 + u_{T,drift,pzt}^2 + u_{T,shock,pzt}^2 + \left(\frac{P_{pzt}}{G_{pzt}}\right)^2 (u_{TSC,pzt}^2 + u_{lin,G,pzt}^2 + u_{lin,G,amp}^2) + u_{\Delta p,peg}^2 \quad (19)$$

Onde, P_{pzt} é o sinal de pressão enviado pelo sensor, $u_{lin,G,pzt}^2$ e $u_{lin,G,amp}^2$ são incertezas dos ganhos do sensor e do amplificador. O amplificador apresenta uma incerteza de linearidade $u_{lin,amp}$. O sensor de piezoelétrico apresenta uma incerteza de linearidade $u_{lin,pzt}$ (onde geralmente inclui histerese, se não, um termo adicional deve ser adicionado). A incerteza da variação de temperatura (*drift cyclic*) $u_{T,drift,pzt}^2$; Mudanças de sensibilidade térmica, incerteza devido a temperatura do sensor de pressão $u_{TSC,pzt}^2$; Incerteza dinâmica do choque de temperatura devido aos aumentos bruscos da temperatura $u_{T,shock,pzt}^2$.

Transdutores de pressão têm uma incerteza associada, fornecida como uma porcentagem de uma determinada medição ou operação em escala total (% FSO), o que significa uma porcentagem do limite superior da faixa de medição.

Sensor piezoelétrico AVL GH 14D:

Tabela 3 - Características do sensor AVL GH14D

Incertezas sensor de pressão GH14D	
$u_{lin,pzt}^2$	0,30%
$u_{lin,amp}^2$	0,10%
$u_{T,drift,pzt}^2$	0,33%
$u_{T,shock,pzt}^2$	0,20%
$u_{TSC,pzt}^2$	1,00%
$u_{lin,G,pzt}^2$	0,11%
$u_{lin,G,amp}^2$	0,50%

Com relação a incerteza do Tipo B a pressão do cilindro está associada a sincronização da curva de pressão com o ângulo do virabrequim. O deslocamento do

TDC tem a incerteza proporcional a taxa de mudança da pressão de acordo com a própria incerteza do *offset do TDC*.

$$u_{p, Tipo B} = \sqrt{u_{p, medido}^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial \tau} u_{\tau}\right)^2} \quad (20)$$

A incerteza combinada da pressão no cilindro do motor é obtida somando as incertezas do Tipo A e Tipo B:

$$u_{p, comb} = \sqrt{u_{p, Tipo A}^2 + u_{p, Tipo B}^2} = \sqrt{u_{p, Tipo B}^2 + \frac{\sum(p_i - \bar{p})^2}{n(n-1)}} \quad (21)$$

3.6. PEGGING e DETERMINAÇÃO DO TDC

Há diversas maneiras de fazer o *Pegging*. Uma delas é utilizar a pressão do coletor de admissão do motor ou do coletor de exaustão. A pressão de referência do coletor de admissão é realizada com o pistão na posição de *IBDC* (*intake bottom dead center*). Dessa forma, quando o cilindro está próximo do final da fase de admissão, a pressão dentro do cilindro é considerada igual a pressão do coletor de admissão (RANDOLPH, 1990). Se o referenciamento for feito com a pressão no coletor de exaustão, o método é o mesmo, porém, o ponto de referência é quando o pistão estiver próximo ao final do tempo de exaustão do ciclo. A referência na admissão é melhor em baixas rotações, já o da exaustão é melhor em condições de carga parcial (LEE et al., 2005).

Com o processo de *Pegging* realizado, as demais pressões dentro do conjunto de dados também são referenciadas, tornando-se medidas absolutas de pressão dentro do cilindro.

Como é conhecido pelo pesquisador de motores a combustão interna, a determinação exata da posição do virabrequim quando o pistão está no *TDC* permitem resultados de erro máximo de $0,1^\circ$ (PIPITONE; BECCARI, 2010a). Segundo (MARVEL, 2008) deslocando a integral *pressão x volume* em $\pm 0,1^\circ$, podemos encontrar o erro devido à incerteza na determinação do *TDC*. O *TDC* foi encontrado dinamicamente através do conceito de *loss angle*. O procedimento baseia-se em impor que a pressão máxima durante um ciclo motorizado ocorra em algum intervalo

antes do *TDC*. Isso se dá devido à transferência de calor para a parede do cilindro e vazamentos de massa. Assim, no ciclo *motored* a posição do *TDC* e o pico de pressão não coincidem, e essa diferença é chamada de *loss angle* (PIPITONE; BECCARI, 2010b). Neste trabalho, não foram mensuradas as incertezas de medição relacionadas ao *loss angle*. Mas foi utilizado um *loss angle* constante de 0,8° CAD *BTDC*.

3.7. INCERTEZA DE CÁLCULO DO IMEP

Como constatado no estudo (KUMAR SINGOTIA; SARASWATI, 2019) em testes em condições de baixa carga, os motores de combustão interna apresentam um valor elevado de coeficiente de variação entre os ciclos de combustão, já que há uma grande fração de gases residuais na câmara de combustão. Por isso, neste estudo os dados adquiridos foram em máxima carga, afim de diminuir a variabilidade cíclica e atenuar erros de medição.

O IMEP é o trabalho do ciclo de combustão pelo volume deslocado. Como a incerteza de medição do volume deslocado não é alterada durante os ciclos de combustão, a incerteza do IMEP depende apenas do trabalho do ciclo. As equações 24 e 25 são dos cálculos da incerteza do trabalho indicado e da incerteza do IMEP são (GAINEY; LONGTIN; LAWLER, 2019):

$$u_W^2 = (u_p \cdot V_d)^2 \quad (22)$$

$$u_{IMEP}^2 = \left(\frac{u_W}{V_d}\right)^2 \quad (2523)$$

3.8. INCERTEZA DA TAXA DE LIBERAÇÃO DE CALOR

O cálculo é realizado com a variação de pressão dentro do cilindro do motor. Neste trabalho a incerteza relacionada a proporção dos calores específicos não foi calculada e a razão dos calores específicos utilizada foi constante, valor de 1,3.

Próximo ao *TDC*, ocorre a maior parte da liberação de calor, a incerteza depende da variação de pressão dentro do cilindro e do volume (GAINEY; LONGTIN; LAWLER, 2019). A expressão da incerteza da taxa de liberação é:

$$u_{NHRR}^2 = \frac{(V \cdot u_p)^2 + (dP \cdot u_v)^2}{(\gamma - 1)^2} \quad (27)$$

Onde, u_p é uma raiz da soma das médias de 3 incertezas:

$$u_p = u_{p,adm\ BDC} + u_{p,cil\ BDC} + u_{p,cilindro} \quad (28)$$

$u_{p,adm\ BDC}$ - Incerteza da pressão na admissão no *BDC*;

$u_{p,cil\ BDC}$ - Incerteza da pressão no cilindro no *BDC*;

$u_{p,cilindro}$ - Incerteza da pressão do transdutor de pressão do cilindro.

Como neste estudo não foram utilizadas as pressões de admissão do motor, a incerteza de pressão foi composta pela incerteza do transdutor de pressão instalado na câmara de combustão.

3.9. BRAKE MEAN EFFECTIVE PRESSURE (BMEP)

O valor do BMEP é importante porque é necessário no cálculo da eficiência do motor. A proporção do BMEP sobre o IMEP fornece a eficiência de determinado motor. O BMEP depende do torque produzido pelo motor e é calculado pela equação (KAVATHIA, 2018):

$$BMEP = \frac{4\pi\tau}{V_d} \quad (29)$$

Onde, τ é o torque produzido pelo motor. E a incerteza do BMEP é:

$$u_{BMEP} = 4\pi \sqrt{\left(\frac{1}{V_d} u_\tau\right)^2 + \left(\frac{\tau}{V_d^2} u_{V_d}\right)^2} \quad (30)$$

Onde, u_τ é a incerteza do torque (N.m) e u_{V_d} é a incerteza do volume deslocado (m³).

3.10. BRAKE SPECIFIC FUEL CONSUMPTION (BSFC)

Este parâmetro indica a quantidade de combustível usada para gerar o BMEP do motor. É uma medida utilizada para medir a eficiência. A vantagem de utilizar o BSFC sobre a eficiência real é que a densidade de energia de combustível não é necessária. O BSFC e a incerteza do BSFC são definidos pelas equações (KAVATHIA, 2018):

$$BSFC = \frac{\dot{m}_{fuel}}{\tau\omega} \quad (31)$$

$$u_{BSFC} = \sqrt{\left(\frac{1}{\tau\omega} u_{\dot{m}_{fuel}}\right)^2 + \left(\frac{\dot{m}_{fuel}}{\tau^2\omega} u_t\right)^2 + \left(\frac{\dot{m}_{fuel}}{\omega^2\tau} u_\omega\right)^2} \quad (32)$$

Onde, ω é a velocidade angular do motor em rad/s e u_ω é a incerteza da frequência angular do motor.

O cálculo da massa de combustível foi obtido através da medição feita durante o experimento com uma bureta calibrada e um cronômetro. O operador coletou 3 dados de tempo a cada 20 mililitros de combustível consumido pelo motor. Uma média aritmética simples foi feita dos tempos coletados. Com o valor médio de tempo e o volume foi obtido a vazão de combustível que posteriormente foi multiplicada pelo peso específico do etanol. Por fim, foi obtido a massa de combustível consumido em gramas por segundo (g/s).

A incerteza combinada da massa de combustível foi obtida através da vazão de combustível. Através dos dados do tempo coletados, foi realizado o cálculo o desvio padrão dos dados de tempo, assim foi possível calcular a incerteza combinada da vazão de combustível.

A incerteza de medição combinada da vazão de combustível foi obtida apenas com incerteza do tipo A. A incerteza do tempo multiplicada pela derivada da vazão sobre o tempo. A incerteza de medição combinada da vazão de combustível foi multiplicada pelo peso específico do combustível para obter a incerteza combinada da massa de combustível.

3.11. POTÊNCIA

Potência é um dos parâmetros mais usados pelas montadoras para avaliar um motor. Então é importante o cálculo da incerteza da potência. A equação da potência e da sua incerteza são expressos como:

$$P = \tau\omega \quad (33)$$

$$u_p = \sqrt{(\omega u_\tau)^2 + (\tau u_\omega)^2} \quad (34)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. INCERTEZA DE MEDIÇÃO EXPANDIDA DA POSIÇÃO DO VIRABREQUIM E FREQUÊNCIA ANGULAR

A incerteza combinada da posição do ângulo do virabrequim ($u\theta$) e da frequência angular ($uRPM$) foram calculados de acordo com a metodologia proposta. A posição do ângulo do virabrequim não depende da rotação do motor, somente da taxa de aquisição do sensor, portanto, ela é igual para todos os pontos coletados. A incerteza de medição relacionada a este parâmetro é diretamente proporcional ao incremento do ângulo do virabrequim, quanto menor o incremento, menor será a incerteza de medição.

A incerteza de medição da frequência angular depende do tempo de aquisição dos dados ($dtime$), por isso, quanto maior a rotação do motor, maior será a incerteza de medição da frequência angular, visto que o tempo de aquisição dos dados é menor.

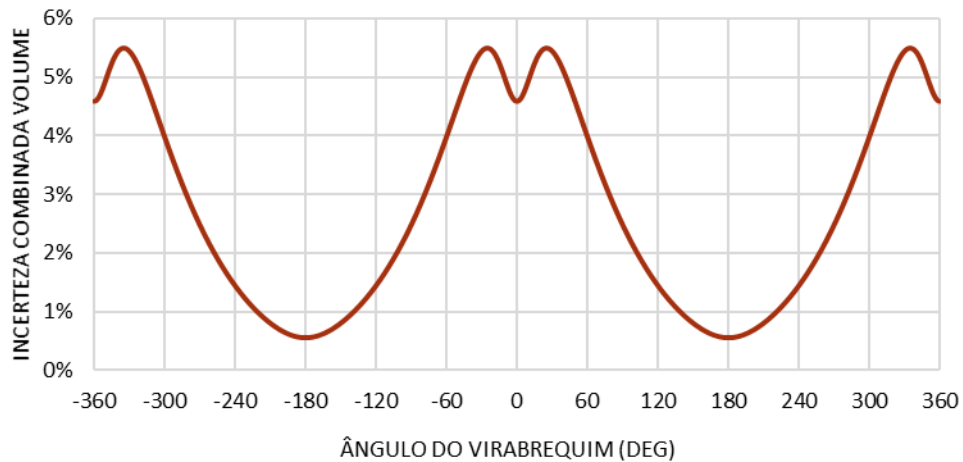
Tabela 4 – Incertezas expandida do ângulo do virabrequim e da frequência angular

Incerteza Expandida da Posição do Virabrequim e da Frequência Angular			
RPM	2000	3500	5500
$uRPM, 95$	0,130	0,225	0,353
$u\theta, 95$	0,057	0,057	0,057
$dtime$	0,149	0,085	0,054

4.2. INCERTEZA DE MEDIÇÃO EXPANDIDA DO VOLUME DO CILINDRO

A incerteza combinada do volume do motor depende das propriedades geométricas do motor e da incerteza da posição do ângulo do virabrequim. Visto que a incerteza relacionada ao ângulo do virabrequim não é influenciada pela rotação do motor, a incerteza combinada do volume do motor será igual para todos os dados coletados. A incerteza combinada da posição do ângulo virabrequim e da razão de compressão foram compostas apenas pela incerteza do Tipo B.

Figura 9 – Gráfico da incerteza expandida do volume deslocado do motor

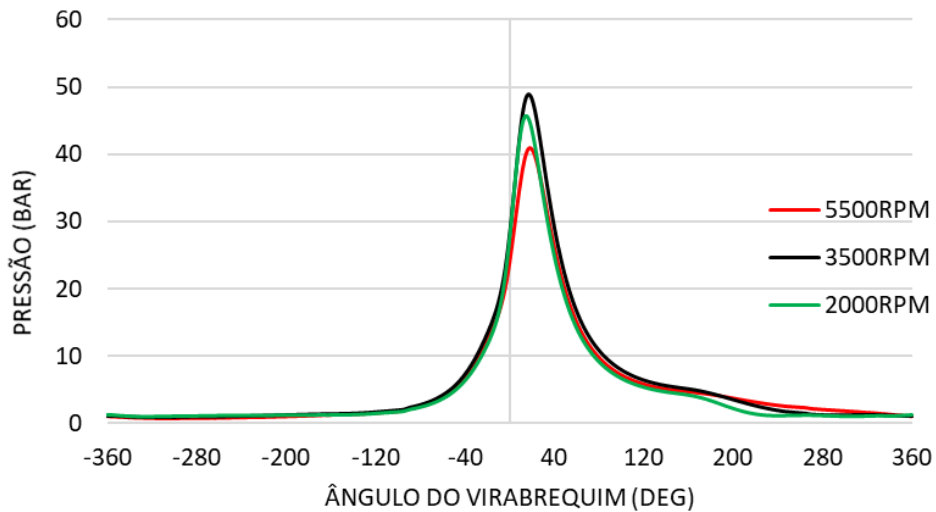


A incerteza combinada do volume do cilindro é proporcionalmente dependente da razão de compressão do motor. As medições das peças móveis do motor devem ser realizadas com os instrumentos com maior número de divisões possíveis, para diminuir a incerteza de medição. Além disso, a medição do volume morto da câmara de combustão é outro ponto crítico.

4.3. INCERTEZA DE MEDIÇÃO EXPANDIDA DA PRESSÃO DE CILINDRO

A incerteza expandida da pressão do cilindro é calculada com a incerteza do sensor de pressão colocado na câmara de combustão do motor (Tipo B) e a incerteza calculada com o desvio padrão dos dados dos ciclos de combustão mensurados (Tipo A).

Figura 10 - Dados médios de pressão de cilindro adquiridos



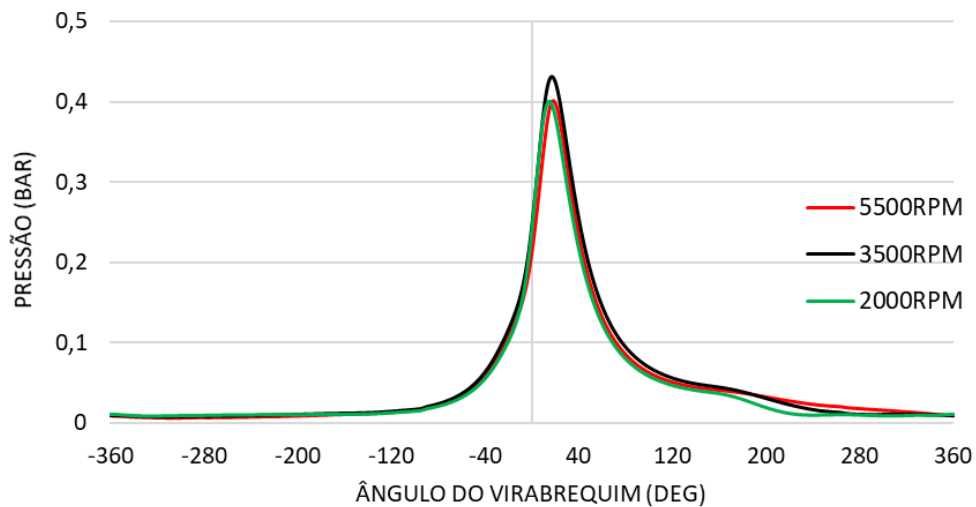
Os desvios padrões dos dados foram calculados a partir da média dos valores adquiridos dos 200 ciclos de combustão através do valor do coeficiente de variação (CV). Os valores dos desvios padrões foram divididos pelo número de amostras, como determina a metodologia. O valor obtido caracteriza a incerteza do Tipo A. A incerteza do Tipo B foi composta através da combinação de várias incertezas relacionadas ao sensor piezoelétrico e do amplificador de sinal. As informações das incertezas foram adquiridas no manual do sensor e foram utilizadas as incertezas de medição fundo de escala do equipamento.

A incerteza combinada da pressão é um valor percentual da pressão do cilindro, logo o valor da incerteza de medição será proporcional ao aumento da pressão do cilindro. Na figura 10, a incerteza combinada dos dados a 5500 RPM apresentaram valores semelhantes do que a 2000 RPM, mesmo com valores de pressão de cilindro inferiores. Isso se deve ao coeficiente de variação (CV) dos dados adquiridos a 5500 RPM ser superior, aumentando a incerteza do Tipo A.

Tabela 5 – Coeficiente de Variação dos dados adquiridos

RPM	IMEP CV (%)
5000	1,62
3500	0,71
2000	0,57

Figura 11 – Incerteza expandida da pressão do cilindro



Uma maneira de diminuir a incerteza de medição da pressão de cilindro e, conseqüentemente, de outros parâmetros que utilizam este dado, é obter uma base de dados de ciclos de combustão com CV menores. Menores variações cíclicas entre os ciclos de combustão representam uma diminuição significativa nas incertezas de medição da pressão do cilindro.

4.4. ERRO RELATIVO DO OFFSET DO TDC

Os dados de pressão foram deslocados em relação ao ângulo do virabrequim em $\theta \pm 0,1$. Os valores de pressão e ângulo do virabrequim são utilizados para calcular todos os parâmetros relacionados ao ciclo de combustão. Deslocando a posição do ângulo do virabrequim, foi possível calcular o erro relativo máximo em cada condição. O deslocamento de $\theta \pm 0,1$ nos dados de *pressão x volume* gerou um erro relativo superior a 1% na condição de 3500 RPM. Para deslocamentos superiores, o erro relativo aumenta proporcionalmente, conseqüentemente, os erros são propagados para o cálculo de outros parâmetros do motor.

Tabela 6 - Tabela do erro relativo do offset do TDC

Erro Relativo de Pressão (Bar)		
RPM	$\theta +0,1$	$\theta -0,1$
5500	-0,49%	0,49%
3500	-0,53%	1,07%
2000	-0,60%	0,60%

4.5. INDICATED MEAN EFFECTIVE PRESSURE (IMEP)

A incerteza expandida do IMEP foi obtida através do trabalho indicado calculado com os dados médios dos ciclos de combustão adquiridos. Os dados do trabalho indicado são relacionados a pressão de cilindro.

A incerteza expandida do IMEP apresentou valor superior nos dados a 3500 RPM, visto que a incerteza é proporcional a pressão de cilindro dados analisados.

Tabela 7 - Incertezas expandida do IMEP do motor

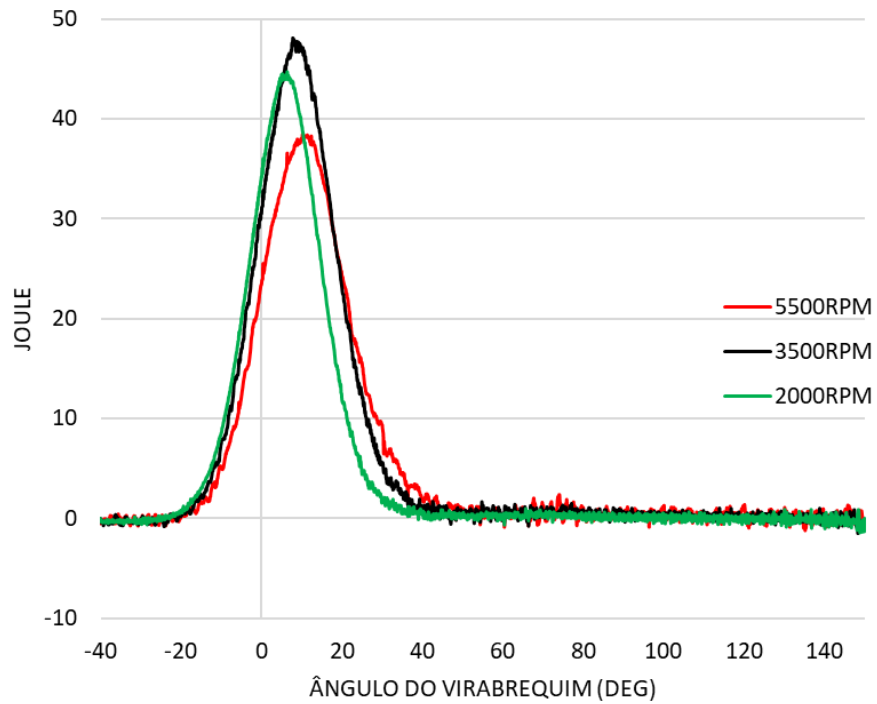
RPM	IMEP (Bar)	uIMEP (bar)	uIMEP (kPa)
5500	8,71	0,8026	80,2600
3500	10,85	0,8627	86,2759
2000	9,86	0,8010	80,1021

Como a incerteza de medição do IMEP depende da incerteza de medição da pressão do cilindro, o ponto que apresenta o maior valor de incerteza percentual são os dados a 5500 RPM, já que o valor do CV foi maior. A incerteza de medição da pressão do cilindro foi propagada para a incerteza de medição do IMEP.

4.6. TAXA DE LIBERAÇÃO DE CALOR

A taxa de liberação dos ciclos de combustão dos dados adquiridos foi calculada e inserida no gráfico 11.

Figura 12 - Taxa de calor liberado dos ciclos



Os gráficos 13, 14 e 15 são referentes as taxas de liberação de calor acumulada do ciclo de combustão para as rotações de 5500, 3500 e 2000 RPM, respectivamente. Os valores de $\pm u$ são os valores de incerteza expandida para a taxa de liberação de calor.

Figura 13 - Taxa de calor liberada a 5500 RPM e a incerteza expandida associada

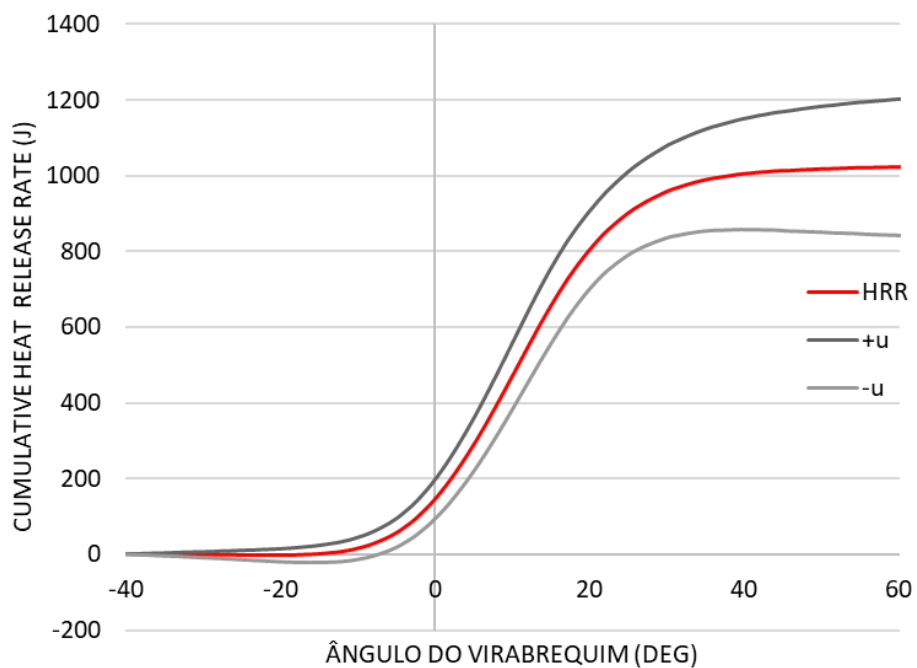


Figura 14 - Taxa de calor liberada a 3500 RPM e a incerteza expandida associada

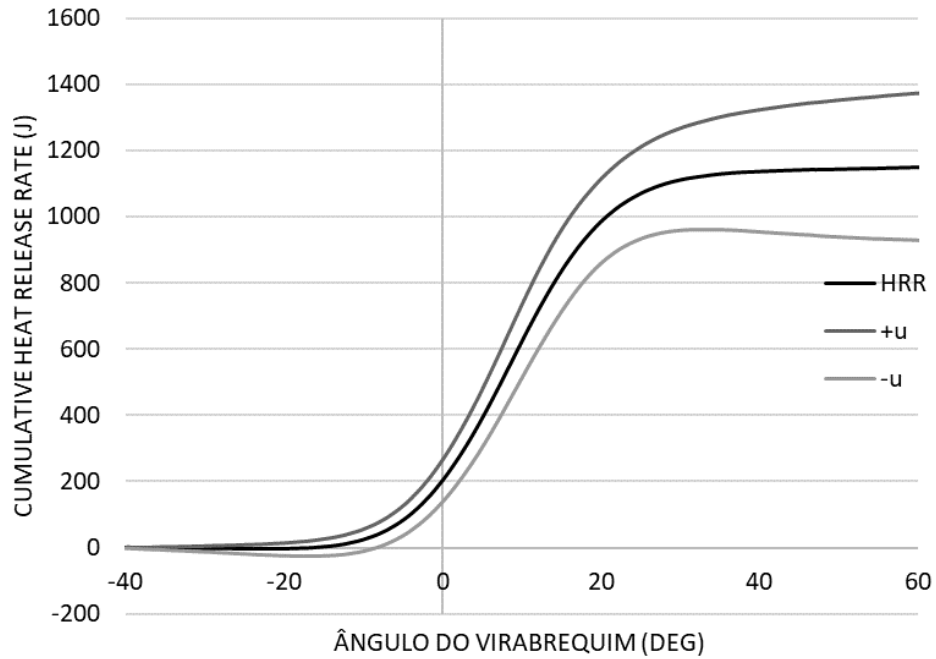
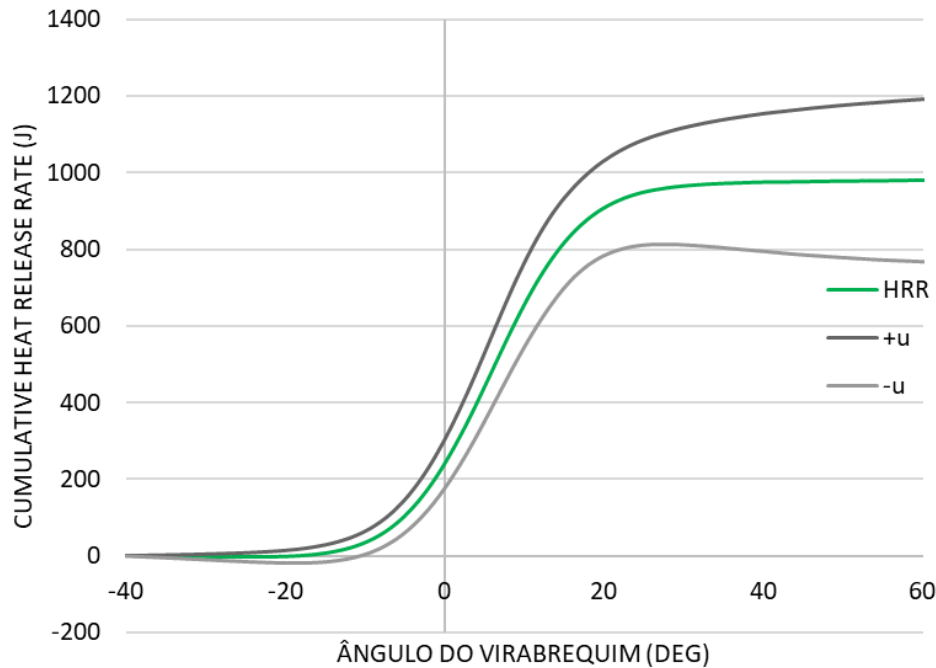


Figura 15 - Taxa de calor liberada a 2000 RPM e a incerteza expandida associada



A incerteza expandida da taxa de liberação de calor dos ciclos estudados foi inserida em um gráfico com os valores acumulados dos dados médios dos ciclos de combustão. A incerteza expandida da taxa de liberação acumulada apresentou valores na ordem de 20%.

Assim como na incerteza de medição do IMEP, os valores dos dados de 5500 RPM apresentaram maior incerteza de medição proporcional. Ainda que o valor médio de pressão durante o ciclo tenha sido menor em comparação aos outros pontos. Isso se deve ao fato do coeficiente de variação dos dados adquiridos ter sido ligeiramente maior.

4.7. BRAKE MEAN EFFECTIVE PRESSURE (BMEP)

A equação da incerteza expandida do BMEP depende da incerteza combinada do torque e do volume deslocado do motor (V_d). A incerteza de medição do torque do motor representa a maior fonte de incerteza que é propagada. Os valores obtidos foram:

Tabela 8 - Incertezas expandidas do BMEP do motor

Rotação (RPM)	BMEP (Bar)	uBMEP (Bar)	uBMEP (kPa)
5500	6,83	0,162	16,2263
3500	9,40	0,223	22,3443
2000	8,40	0,199	19,9652

4.8. BRAKE SPECIFIC FUEL CONSUMPTION (BSFC)

A incerteza expandida do BSFC é obtida com a combinação de 3 incertezas (massa de combustível, torque e velocidade radial) e suas respectivas derivadas. A incerteza do torque de eixo foi obtida através das informações do fabricante do sensor, a incerteza da velocidade radial foi calculada através da incerteza da rotação do motor. Assim como no cálculo da incerteza do BMEP, a incerteza do torque é a maior fonte de incerteza em relação aos outros parâmetros. Após calculadas os seguintes valores foram obtidos:

Tabela 9 - Incertezas expandidas do BSFC do motor

Rotação (RPM)	BSFC (g/J)	BSFC (g/kWh)	uBSFC (g/J)	uBSFC (g/kWh)
5500	0,00019	670,20	4,43 E-06	31,91
3500	0,00015	540,67	3,60 E-06	25,97
2000	0,00014	511,67	3,38 E-06	24,36

4.9. POTÊNCIA

A incerteza expandida da potência é composta da soma das incertezas combinadas do torque e da frequência angular. Como explicado anteriormente, a incerteza do torque é o parâmetro que apresenta valor mais acentuado. Os seguintes resultados foram adquiridos.

Tabela 10 - Incertezas expandidas da potência do motor

Rotação (RPM)	Potência (kW)	Potência (HP)	uPotência (kW)	uPotência (HP)
5500	56,45	75,77	1,34	1,80
3500	49,46	66,39	1,18	1,58
2000	25,34	34,01	0,60	0,81

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através das informações coletadas e o mapeamento das incertezas relacionadas a bancada dinamométrica, foi possível quantificar a incerteza combinada de parâmetros utilizados no estudo de motores a combustão interna. O sensor de pressão piezoelétrico é a maior fonte de incerteza, pois os dados de pressão são utilizados para calcular grande parte dos parâmetros. A incerteza do sensor de pressão do Tipo A pode diminuir a confiabilidade do experimento caso o CV dos dados de pressão adquiridos for superior a 2%. Por isso, uma maneira prática de diminuir a incerteza dos dados adquiridos é trabalhar para atenuar ao máximo as variações cíclicas do motor.

A posição do virabrequim é sensivelmente importante e afeta diretamente as incertezas do experimento. A taxa de resolução do ângulo do virabrequim deve ser a menor possível durante o ciclo de expansão do motor, pois quanto menor o incremento do ângulo do virabrequim, mais exatos são os dados de pressão de cilindro.

A incerteza da taxa de liberação de calor é sensivelmente afetada aos parâmetros de posição do ângulo do virabrequim e aos dados indicados de pressão de cilindro. Utilizando uma resolução de $0,1^\circ$ de incremento no ângulo do virabrequim a incerteza de medição combinada na taxa de liberação de calor foi cerca de 20%. Se fosse utilizadas resoluções maiores do ângulo do virabrequim a incerteza de medição deste parâmetro teria uma confiabilidade ameaçada.

Para os cálculos de incerteza de medição do BMEP, BFSC e Potência o Torque foi o parâmetro que apresentou maior influência. Porém como exposto anteriormente, se o incremento do ângulo do virabrequim fosse mais grosseiro, a propagação deste parâmetro seria acentuada.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, é importante estudar mais a fundo as incertezas relacionadas a pressão de cilindro e do Offset do *TDC*. Neste trabalho, a incerteza em relação ao Offset do *TDC* não foi mensurada de maneira objetiva, consequentemente, podem haver diferenças nos resultados caso a incerteza de medição do Offset do *TDC* tivesse sido considerada.

A incerteza do Tipo A da pressão do cilindro foi calculada através dos valores médios e o coeficiente de variação dos 200 ciclos de combustão adquiridos. A incerteza do Tipo B foi composta com as especificações do sensor obtidas através do datasheet fornecido pelo fabricante. Por se tratar da principal medida para calcular os parâmetros do motor, a pressão do cilindro deve ser mapeada da melhor forma possível para adquirir dados cada vez mais robustos. Em trabalhos futuros, a pressão do cilindro deve ser aprimorada, mensurando o coeficiente de variação (CV) para cada ângulo de virabrequim.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AVL. Pressure Sensor Gh14D Gh14D. n. May, p. 1–4, 2011.

BAKOWSKI, A.; RADZISZEWSKI, L.; ŽMINDÁK, M. Dynamic Pressure Measurement and Uncertainty Analysis Using a Piezoelectric Transducer for a Combustion Engine. **Applied Mechanics and Materials**, v. 827, p. 77–82, 2016.

BALBOM, F. SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM MOTOR Santa Maria , RS. 2022.

BROWN, W. L. Methods for evaluating requirements and errors in cylinder pressure measurement. **SAE Technical Papers**, 1967.

BRUNT, M. F. J.; EMTAGE, A. L. Evaluation of burn rate routines and analysis errors. **SAE Technical Papers**, n. 412, 1996.

CATON, J. A. On the importance of specific heats as regards efficiency increases for highly dilute IC engines. **Energy Conversion and Management**, v. 79, p. 146–160, 2014.

CEVIZ, M. A. et al. Determination of cycle number for real in-cylinder pressure cycle analysis in internal combustion engines. **Energy**, v. 36, n. 5, p. 2465–2472, 2011.

EURACHEM/CITAC GUIDE. Quantifying Uncertainty in Analytical Measurements. **Journal of Bangladesh Academy of Sciences**, v. 41, n. 2, p. 145–163, 2012.

GAINEY, B.; LONGTIN, J. P.; LAWLER, B. A Guide to Uncertainty Quantification for Experimental Engine Research and Heat Release Analysis. **SAE International Journal of Engines**, v. 12, n. 5, 2019.

HEYWOOD, J. B. **John b. heywood**. [s.l: s.n.].

INMETRO, INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, Q. E T. **Expressão da Incerteza de Medição na Calibração : versão brasileira da publicação EA-4/02**, 1999.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, Q. E T. **Vocabulário Internacional de Metrologia**. [s.l: s.n.].

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN MEASUREMENTS. Evaluation of

measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. **International Organization for Standardization Geneva ISBN**, v. 50, n. September, p. 134, 2008a.

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN MEASUREMENTS. Avaliação de dados de medição — Guia para a expressão de incerteza de medição. **Annals of the ICRP**, v. 6, n. 2–3, p. 67–69, 2008b.

KAVATHIA, K. B. Uncertainty Analysis of an Engine Test Cell Thesis. 信阳师范学院, v. 10, n. 2, p. 1–15, 2018.

KUMAR SINGOTIA, P.; SARASWATI, S. Cycle-by-cycle variations in a spark ignition engine fueled with gasoline and natural gas. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 691, n. 1, 2019.

LANCASTER, D. R.; KRIEGER, R. B.; LIENESCH, J. H. Measurement and Analysis of Engine Pressure Data. 1975.

LEE, S. et al. Quantification of thermal shock in a piezoelectric pressure transducer. **SAE Technical Papers**, 2005.

MARVEL, B. T. UNCERTAINTY ANALYSIS OF NET HEAT RELEASE RATE PREDICTIONS IN A SINGLE CYLINDER PILOT COMPRESSION IGNITED NATURAL GAS ENGINE. **Journal of Chemical Information and Modeling**, v. 53, n. 9, p. 287, 2008.

MARZOUK, M.; WATSON, N. Some Problems in Diesel Engine Research With Special Reference To Computer Control and Data Acquisition. **Inst Mech Eng (Lond) Proc**, v. 190, n. 23, p. 137–151, 1976.

PETITPAS, G. et al. Refining Measurement Uncertainties in HCCI/LTGC Engine Experiments. **SAE Technical Papers**, v. 2018- April, p. 1–12, 2018.

PETITPAS, G.; MCNENLY, M. J.; WHITESIDES, R. A. A Framework for Quantifying Measurement Uncertainties and Uncertainty Propagation in HCCI/LTGC Engine Experiments. **SAE International Journal of Engines**, v. 10, n. 3, 2017.

PIPITONE, E.; BECCARI, A. Determination of TDC in internal combustion engines by a newly developed thermodynamic approach. **Applied Thermal Engineering**, v. 30,

n. 14–15, p. 1914–1926, 2010a.

PIPITONE, E.; BECCARI, A. Determination of TDC in internal combustion engines by a newly developed thermodynamic approach. **Applied Thermal Engineering**, v. 30, n. 14–15, p. 1914–1926, 2010b.

POCHET, MAXIME; JEANMART, HERVÉ; CONTINO, F. Uncertainty quantification from raw measurements to post-processed data: A general methodology and its application to a homogeneous-charge compression–ignition engine. **International Journal of Engine Research**, n. December, p. 107754631982824, 2019.

RANDOLPH, A. L. Methods of processing cylinder-pressure transducer signals to maximize data accuracy. **SAE Technical Papers**, 1990.

SKRZEK, T. et al. Repeatability of high-pressure measurement in a diesel engine test bed. **Sensors (Switzerland)**, v. 20, n. 12, p. 1–12, 2020.

STONE, R. **Introduction to Internal Combustion Engines**. [s.l: s.n.].

WANG, X. B. et al. A thermodynamics model for the compression and expansion process during the engine's motoring and a new method for the determination of TDC with simulation technique. **Applied Thermal Engineering**, v. 27, n. 11–12, p. 2003–2010, 2007.