



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JACKSON HENRIQUE BRAGA DA SILVA

EXPERIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA PRECISÃO E VARIABILIDADE DOS
MÉTODOS PEGGING

FORTALEZA

2018

JACKSON HENRIQUE BRAGA DA SILVA

EXPERIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA PRECISÃO E VARIABILIDADE DOS
MÉTODOS PEGGING

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis

Orientador: Prof. Dr. André Valente Bueno

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S58e Silva, Jackson Henrique Braga da.
Experimento para determinação da precisão e variabilidade dos métodos pegging / Jackson Henrique Braga da Silva. – 2018.
76 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. André Valente Bueno.

1. Medição de pressão. 2. Pressão no cilindro. 3. Transdutor piezoelétrico. I. Título.

CDD 620.1

JACKSON HENRIQUE BRAGA DA SILVA

EXPERIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA PRECISÃO E VARIABILIDADE
DOS MÉTODOS PEGGING

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovada em 23/07/2018

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. André Valente Bueno (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dra. Maria Alexandra de Sousa Rios
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Leonardo de Almeida Monteiro
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Manoel (em memória) e Albaniza. Aos meus avós maternos, José e Raimunda (em memória) e em memória de meus avós paternos Antônio e Maria. Aos meus irmãos, tios, primos e amigos, que foram muito importantes para a realização desta fase de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ficam, aqui, registrados os agradecimentos ao Laboratório de Motores de Combustão Interna (LMCI) da UFC, por ter disponibilizado a estrutura necessária para realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. André Valente Bueno e ao Prof. Carlos André Dias Bezerra, pela excelente orientação, e aos professores participantes da banca examinadora, o Prof. Dr. Leonardo de Almeida Monteiro, o Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha e a Prof.^a Dr.^a Maria Alexsandra de Sousa Rios, pelo tempo e pelas valiosas colaborações e sugestões.

Gostaria de deixar registrados, também, os meus agradecimentos a todos os meus professores da pós-graduação, pois com certeza cada um contribuiu, de alguma forma, para esta realização e, da mesma forma, aos meus professores da graduação e dos outros níveis de ensino. Deixo, aqui, o meu sincero muito obrigado a todos.

“Sempre afirmo que se você puder medir aquilo de que estiver falando e conseguir expressá-los em números, você conhece alguma coisa sobre o assunto; mas quando você não pode expressá-lo em números, seu conhecimento é pobre e insatisfatório.”

(Lorde Kelvin)

RESUMO

A medição de pressão no cilindro de combustão tem sido uma ferramenta fundamental para pesquisa e desenvolvimento na área de motores de combustão interna desde o estabelecimento da indústria automotiva. Muitos parâmetros utilizados para análise e desenvolvimento nessa área se baseiam em valores de pressão medidos no cilindro, durante a queima do combustível. Parâmetros relevantes de desempenho, como o trabalho realizado, a Pressão Média Efetiva (PME) e o perfil de liberação de energia dependem de valores absolutos e precisos da pressão no cilindro. Logo, a qualidade dessas análises está diretamente relacionada à exatidão e precisão dos valores obtidos para a pressão durante o processo em estudo. Atualmente, algumas das metodologias para medição da pressão no cilindro durante a combustão utilizam-se de transdutores piezoelétricos por diversas características que os tornam adequados ao processo, como ótimo tempo de resposta, alta resistência mecânica, pequeno tamanho que facilita a montagem em sistemas complexos, entre outras. Esse tipo de transdutor apresenta características, como sua propriedade inerente de fornecer um sinal de resposta que varia em função da variação do estímulo de entrada, ou seja, a resposta do transdutor é uma diferencial de pressão em relação ao tempo, que torna necessária a utilização de métodos específicos para a determinação de uma pressão inicial de referência para o tratamento dos dados e obtenção dos valores de pressão absoluta. Na literatura, existem diversos métodos indicados para a determinação dessa pressão de referência, como os métodos de referência pelo coletor de admissão, pelo coletor de escape e por coeficientes politrópicos. Neste trabalho, realizou-se uma análise da precisão e exatidão dos métodos citados por comparação com um procedimento de referência pelo cárter, assumido como referência, que se baseia apenas em medições reais da pressão, identificando a melhor opção entre os métodos analisados e suas limitações. Concluiu-se que o método de referência pelo coletor de admissão foi o mais preciso e o menos exato, já o método de referência por coeficientes politrópicos foi o mais exato e o menos preciso.

Palavras-chave: Medição de pressão. Pressão no cilindro. Transdutor piezoelétrico.

ABSTRACT

In-cylinder pressure measurements have been a fundamental tool for engine research and development since the establishment of the automotive industry. Many parameters used for analysis and development in this area are based on measured pressure values in the combustion cylinder during the burning of the fuel. Relevant performance parameters such as work done, MEP and energy release profile depend on absolute and precise cylinder pressure values. Therefore, the quality of these analyses is directly related to the accuracy and precision of the values obtained for the pressure during the process under study. Currently, some of the methodologies for measuring the pressure in the cylinder during combustion use piezoelectric transducers due to several characteristics that make them suitable for the process, such as high response time, high mechanical strength, small size that facilitates the assembly in complex systems, among others. This type of transducer has characteristics, as its inherent property of providing a response signal that varies as a function of input stimulus variation, so the transducer response is a pressure differential with respect to time, which makes it necessary to use specific methods for the determination of an initial pressure dereference for the treatment of the data and obtaining the values of absolute pressure. In the literature, there are several methods indicated for the determination of this reference pressure, such as reference methods by the intake manifold, the exhaust manifold and the polytropic coefficients. In this work, an analysis of the precision and accuracy of the cited methods was carried out by comparison with a reference procedure by the crankcase, assumed as reference, which is based only on actual pressure measurements, identifying the best option between the analyzed methods and their limitations. It was concluded that the reference method by the intake manifold was the most precise and the least accurate, since the reference method by polytropic coefficients was the most accurate and the least precise.

Keywords: Measurement of pressure. Methods peggings. Piezoelectric transducer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de Lubrificação de um Motor Diesel	20
Figura 2 – Representação da operação de um ciclo diesel em quatro tempos.	21
Figura 3 – Esquema de valvulamento	22
Figura 4 – Diagrama de Pressão x Volume da câmara de combustão	23
Figura 5 – Modalidades de pressão.	24
Figura 6 – Indicador mecânico de pressão.	25
Figura 7 – Exemplo de um diagrama P-V.	26
Figura 8 – Exemplo de um diagrama P- α	26
Figura 9 – Sistema eletrônico para medição de pressão.	27
Figura 10 – Princípio de funcionamento do elemento piezoelétrico.	28
Figura 11 – O cristal piezoelétrico.	29
Figura 12 – Esquema do amplificador de carga.	29
Figura 13 – Diagrama de blocos de um sistema simples.	31
Figura 14 – Um sistema de comunicação.	31
Figura 15 – Sistema para medição de pressão.	34
Figura 16 – Simulação numérica aplicada a medição.	35
Figura 17 – Indicador de pressão diferencial.	42
Figura 18 – Detalhes do indicador de pressão balanceada.	43
Figura 19 – Sistema de medição de pressão diferencial.	44
Figura 20 – Bancada de teste do motor.	48
Figura 21 – Interface de controle da bancada de ensaio.	49
Figura 22 – Esquema do sistema de medição.	49
Figura 23 – Esquema do sistema transdutor/amplificador utilizado.	50
Figura 24 – Geometria do conjunto cilindro/pistão.	51
Figura 25 – Comportamento da pressão na admissão.	53
Figura 26 – Pressão no cilindro de combustão, utilizando o MTD-1.	54
Figura 27 – Referência pelo coletor de admissão - Correção da pressão.	55
Figura 28 – Diagrama PxV.	56
Figura 29 – Comportamento da pressão na admissão.	57
Figura 30 – Referência pelo coletor de escape - Correção da pressão.	58
Figura 31 – Pressão no cilindro de combustão, utilizando o MTD-3.	59

Figura 32 – Pressão no cárter.	61
Figura 33 – Pressão Intra-ciclo.	62
Figura 34 – Detalhe da pressão Intra-ciclo.	63
Figura 35 – Detalhe da pressão Intra-ciclo filtrada.	64
Figura 36 – Detalhe da pressão filtrada no cárter.	64
Figura 37 – Detalhe do ajuste de pressão pelo cárter.	67
Figura 38 – Determinação da PME.	69
Figura 39 – Histograma resultante da simulação.	70
Figura 40 – Variação na determinação da PME.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações técnicas do motor	46
Tabela 2 – Informações técnicas dos transdutores piezoelétricos	47
Tabela 3 – Informações dos transdutores de pressão absoluta	47
Tabela 4 – Informações do transdutor angular (modelo 2614A4 da Kistler)	47
Tabela 5 – Pressão de correção - MTD-1	54
Tabela 6 – Pressão de correção - MTD-2	57
Tabela 7 – Pressão de correção - MTD-3	59
Tabela 8 – Pressão de correção - MTD-4	60
Tabela 9 – Comparação entre as pressões (em bar) na admissão, no escape e no cárter. .	61
Tabela 10 – Pressão intra-ciclo sem correção	63
Tabela 11 – Pressão intra-ciclo filtrada e sem correção	63
Tabela 12 – Pressão no cárter filtrada	65
Tabela 13 – Correção da pressão intra-ciclo filtrada	65
Tabela 14 – Correção da pressão no cilindro	65
Tabela 15 – Pressão de correção - MTD5	66
Tabela 16 – Comparação entre as pressões de correção (em bar), obtidas com os métodos MTD-1, MTD-2 e MTD-5.	66
Tabela 17 – Avaliação da exatidão dos métodos.	68
Tabela 18 – Variáveis aleatórias atribuídas a cada fonte de incerteza.	69
Tabela 19 – Simulação individual de cada fonte de incerteza.	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FE	Fundo de Escala
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LMCI	Laboratório de Motores de Combustão Interna
PME	Pressão Média Efetiva
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
VR	Valor de Referência

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Limite inferior de um distribuição de probabilidade
β	Limite superior de um distribuição de probabilidade
μ	Valor médio
σ	Desvio padrão amostral da média
E_0	Tensão de polarização do transdutor
G	Ganho do transdutor
k	Coefficiente politrópico
P_{abs}	Pressão absoluta
P_i	Uma pressão específica
P_{me}	Pressão média efetiva
P_{max}	Pressão máxima
rpm	Rotações por minuto
V_d	Volume deslocado
V_m	Volume morto
V_t	Volume total
V_θ	Volume em um determinado ângulo de manivela

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa da Escolha do Tema	17
1.2	Objetivos	18
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	18
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Os Motores de Combustão Interna	19
2.2	A Medição de Pressão	23
2.2.1	<i>Medidores mecânicos de pressão</i>	25
2.2.2	<i>Os transdutores piezoelétricos</i>	27
2.3	Sinais e Sistemas	31
2.4	A Precisão da Medição	33
2.5	Os Métodos de Referencial de Pressão	35
2.5.1	<i>Referência pelo coletor de admissão</i>	36
2.5.2	<i>Referência pelo coletor de escape</i>	37
2.5.3	<i>Referência por coeficientes politrômicos constantes</i>	37
2.5.4	<i>Referência por coeficientes politrômicos variáveis</i>	39
2.5.5	<i>Referência pela pressão de intra-ciclo com um transdutor e uma chave de comutação</i>	40
2.5.6	<i>Referência pela pressão intra-ciclo com o transdutor instalado na parede do cilindro</i>	41
2.5.7	<i>Referência pela pressão de intra-ciclo com um transdutor de pressão diferencial</i>	41
2.5.8	<i>Referência pela Lei dos Gases Ideais</i>	43
2.5.9	<i>Referência pela contrapressão de escape</i>	44
3	MATERIAL E MÉTODOS	46
3.1	Materiais	46
3.2	O aparato experimental	47
3.3	Procedimentos	50
4	RESULTADOS	53

4.1	Referência pelo coletor de admissão (MTD-1)	53
4.2	Referência pelo coletor de escape (MTD-2)	57
4.3	Referência por coeficientes politrópicos constantes (MTD-3)	58
4.4	Referência por coeficientes politrópicos variáveis (MTD-4)	59
4.5	Referência pela pressão intra-ciclo com o transdutor instalado na pa- rede do cilindro (MTD-5)	60
4.6	Análise das fontes de incerteza na determinação da PME	68
5	CONCLUSÕES	73
	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

Motores de combustão interna são máquinas projetadas com o objetivo de converter a energia química dos combustíveis liberada durante a combustão em trabalho mecânico (HEYWOOD, 1988). A queima da mistura ar-combustível e, por conseguinte, a expansão dos gases no interior do cilindro de combustão aumentam a pressão na face do pistão que, por sua vez, transmite uma força ao conjunto biela/manivela que faz girar o eixo do motor. Então, pode-se considerar que o aproveitamento da energia química liberada na combustão se inicia com a pressão gerada na câmara de combustão.

A energia liberada com a queima da mistura ar-combustível gera temperaturas elevadíssimas no interior da câmara de combustão e é um fenômeno que ocorre de forma extremamente rápida (HEYWOOD, 1988; LEE *et al.*, 2008). Por conseguinte, a expansão dos gases da combustão torna a pressão interna do cilindro uma grandeza dinâmica com variações abruptas. Ligando isso ao fato de que os motores são sistemas complexos e compactos, tem-se um nível elevado de dificuldades para instalação de sensores na câmara de combustão e medição da pressão durante a queima do combustível.

Os dados de pressão da câmara de combustão são utilizados para avaliação de parâmetros como, por exemplo, a análise de liberação de energia, a determinação de coeficientes politrópicos, a estimativa da temperatura de chama, entre outros (BRUNT; POND, 1997). Esses fatos tornam o conhecimento do comportamento da pressão no cilindro de combustão um requisito muito importante em análises de funcionamento do motor. Essa medição de pressão deve ser tão precisa quanto for o nível de exigência da análise abordada (BRUNT; EMTAGE, 1996).

Alguns dos pré-requisitos para métodos que possibilitem uma estimativa precisa dos resultados obtidos para pressão do cilindro são a qualidade do sinal e a precisão na aquisição e processamento de dados (ERIKSSON; THOMASSON, 2017). Atualmente, os transdutores do tipo piezoelétrico são normalmente utilizados para a medição nesses estudos devido às suas características, que são bastante adequadas ao objetivo em questão: baixo tempo de resposta, ótima exatidão, ampla faixa de medição, resistência mecânica e durabilidade, características térmicas que possibilitam sua utilização em altas temperaturas e pequeno tamanho (BRUNT; POND, 1997; LEE *et al.*, 2008).

Uma característica intrínseca dos sensores piezoelétricos é a capacidade de se induzir internamente uma carga elétrica proporcional à variação de uma força mecânica atuando em

sua superfície. Os transdutores piezoelétricos medem a pressão dinâmica, variação de pressão em relação à variação de tempo, em vez da pressão absoluta. Uma vez que os dados de pressão absoluta são utilizados em muitas aplicações, faz-se necessária a determinação de uma pressão de referência para o tratamento adequado dos dados obtidos com o transdutor piezoelétrico (BRUNT; POND, 1997; LEE *et al.*, 2008; ERIKSSON; THOMASSON, 2017).

Existem diversos métodos que podem ser utilizados para a determinação dessa pressão de referência, os chamados *pegging methods*. Este trabalho avaliou a capacidade de quatro desses métodos (referência pelo coletor de admissão, referência pelo coletor de escape, referência por coeficientes politrópicos constantes e referência por coeficientes politrópicos variáveis) com base na avaliação da precisão e comparação de cada um com o método de referência experimental, que por sua vez utiliza como referência a pressão no cárter.

1.1 Justificativa da Escolha do Tema

Atualmente os transdutores de pressão piezoelétricos são a primeira alternativa utilizada para a medição da pressão interna da câmara de combustão durante a queima de combustíveis. Esses dados de pressão são parâmetros de entrada para uma série de análises, como a determinação de coeficientes politrópicos, fração de massa queimada e temperatura de chama.

Devido aos princípios do fenômeno piezoelétrico, a resposta dos transdutores que se utilizam desse fenômeno gera um sinal de derivada da pressão. Esses dados de resposta, em algumas análises já citadas, precisam ser processados para se obter valores de pressão absoluta. Então, utilizam-se métodos para integração que necessitam de uma constante de integração ou de um valor de referência para a pressão inicial.

Neste trabalho, propõe-se um método de referencial pelo cárter em que se utiliza um transdutor de pressão instalado na parede do cilindro de combustão para medir a pressão tanto no cilindro como no cárter, para que esse método possa ser utilizado como base para se avaliar a exatidão de outros métodos.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo geral*

Este trabalho objetivou avaliar a precisão e a exatidão dos métodos utilizados para determinação de um referencial para os dados de pressão obtidos com um transdutor piezoelétrico (referência pelo coletor de admissão, referência pelo coletor de escape, referência por coeficientes politrópicos constantes e referência por coeficientes politrópicos variáveis), por meio da comparação com o método de referência pelo cárter.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- a) Realizar experimentos para obtenção de dados;
- b) Desenvolver algoritmos para tratamento dos dados brutos;
- c) Propor melhorias na utilização do transdutor piezoelétrico;
- d) Avaliar precisão e exatidão dos quatro métodos citados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo reunir, de forma mais específica e objetiva, os conceitos utilizados para uma análise mais cuidadosa dos métodos utilizados para a medição da pressão interna de um cilindro de combustão, visando garantir a confiança dos resultados obtidos com a aplicação de cada um dos métodos. Para tanto, inicia-se explorando os conceitos e os princípios de funcionamento de motores de combustão interna, para guiar as ações na definição da estrutura do sistema a ser utilizado na experimentação e avaliação dos métodos de referencial de pressão.

Todo o trabalho gira em torno do objetivo de se apontar a melhor metodologia para medição da pressão interna do cilindro de combustão. Com isso, são abordadas técnicas de medição, processamento de sinais, análise de incerteza dos resultados, entre outras, para se alcançar esse objetivo de forma viável e, principalmente, confiável.

2.1 Os Motores de Combustão Interna

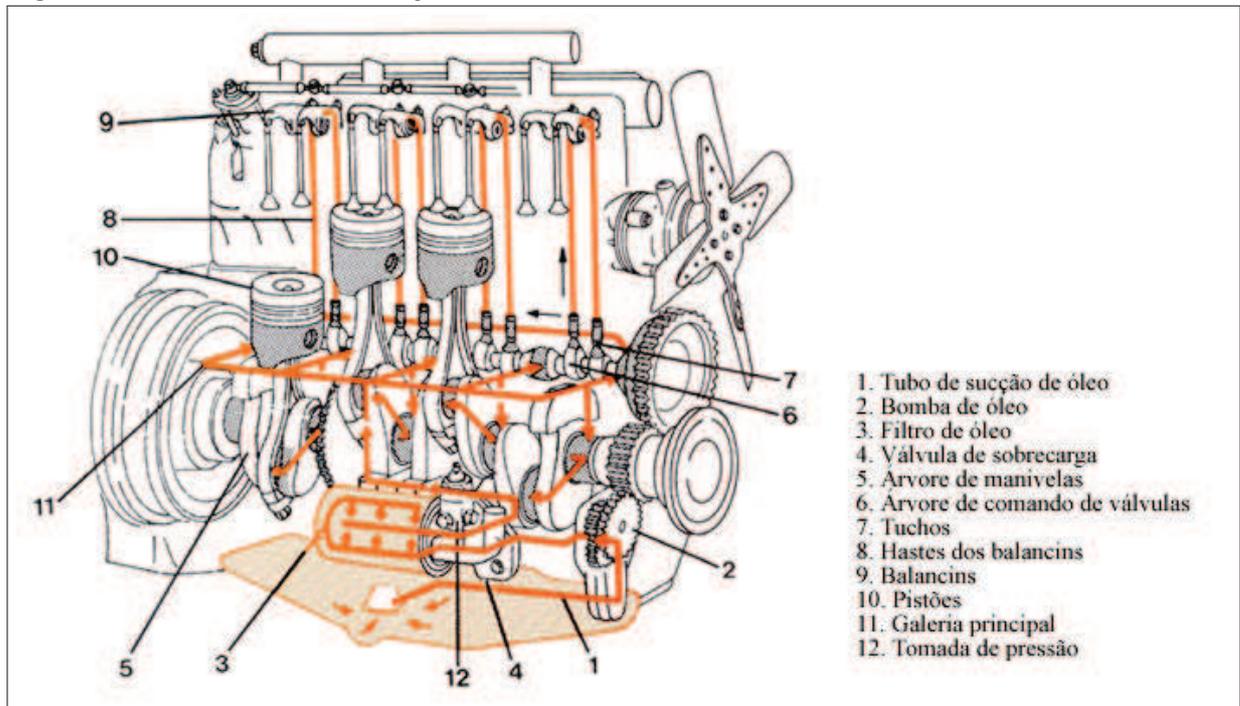
Motores de combustão interna são máquinas desenvolvidas com o propósito de produzir potência mecânica a partir da energia química de combustíveis. Os motores de combustão interna se distinguem dos motores de combustão externa devido ao fato de o combustível sofrer combustão ou oxidação no interior do motor, em uma câmara de combustão composta de um arranjo cilindro-pistão (HEYWOOD, 1988).

Os principais tipos de motores de combustão interna são os motores de ignição por centelha e os motores de ignição por compressão (MORAN; SHAPIRO, 2009). Nos motores de ignição por centelha, a mistura ar-combustível é inflamada pela centelha gerada por uma vela de ignição. Nos motores de ignição por compressão, o ar é comprimido até que se atinjam condições de pressão e temperatura suficientes para que a combustão ocorra, de forma espontânea, quando o combustível for injetado no cilindro.

Esse segundo tipo, os motores de ignição por compressão, geralmente denominados de motores do ciclo diesel (HEYWOOD, 1988), são normalmente utilizados em aplicações em que se necessite de economia de combustível e potência relativamente alta, como em caminhões pesados e ônibus, locomotivas e navios, unidades auxiliares de potência etc. (MORAN; SHAPIRO, 2009). Esse tipo de motor será abordado em mais detalhes por ser o tipo de motor utilizado para os experimentos realizados neste trabalho.

Um motor é um organismo mecânico extremamente complexo, no qual todos os componentes devem realizar suas funções de forma bem sincronizada e em harmonia com os demais sistemas que compõem esse motor. Na Figura 1, tem-se o circuito de lubrificação das partes móveis internas, que já mostra uma ideia inicial da complexidade de um motor diesel.

Figura 1 – Sistema de Lubrificação de um Motor Diesel



Fonte: adaptada de (MWM, 2005)

Os pistões, um dos elementos (o elemento 10) destacados na Figura 1, possuem seus movimentos sincronizados pela árvore de manivelas (elemento 5), de tal forma que os motores que operam no ciclo diesel realizam um ciclo (equivalente a duas revoluções da árvore de manivelas) em quatro fases ou quatro tempos, como descrito na sequência:

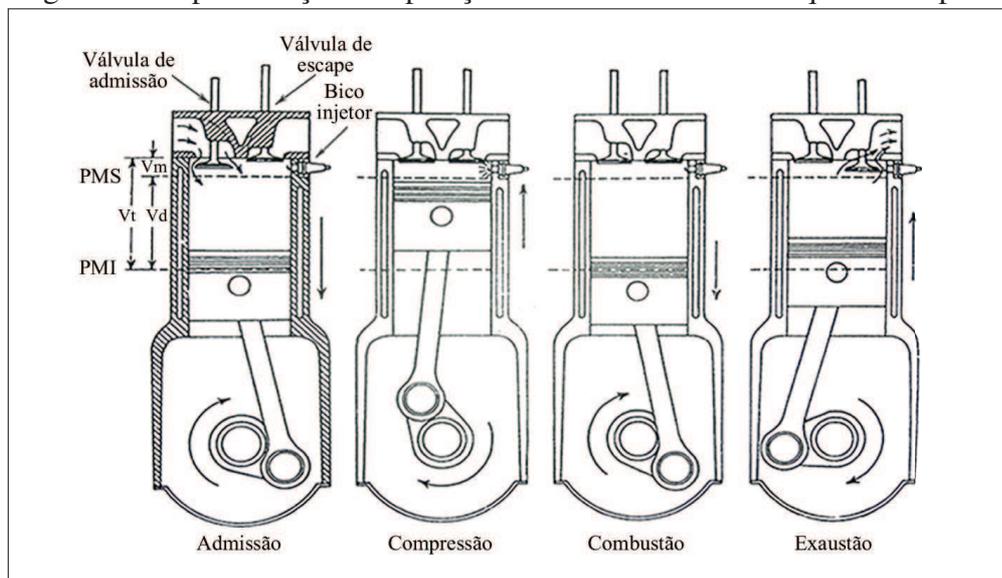
- **Admissão** - Nesta fase, o pistão desce, estando a válvula de admissão aberta e a de escape fechada. Ao descer, o pistão cria uma depressão no cilindro. O ar é então forçado pela pressão atmosférica a entrar no cilindro, passando pelo filtro de ar e pela tubulação de admissão. A quantidade de ar admitida é sempre a mesma, qualquer que seja a potência que estiver sendo utilizada ou a posição do acelerador.
- **Compressão** - Então, o pistão sobe, enquanto as válvulas de admissão e de escape estão fechadas. O ar admitido na fase de admissão é comprimido até ocupar o volume da câmara de combustão. Devido à compressão, o ar se aquece.

No final da compressão, o bico injetor injeta, finamente pulverizado, o óleo diesel no interior da câmara de combustão. O óleo diesel, em contato com o ar aquecido, inflama-se, iniciando assim a combustão.

- **Combustão** - O pistão desce, acionado pela força de expansão dos gases queimados. As válvulas de admissão e de escape estão fechadas. A força de expansão dos gases queimados é transmitida pelo pistão à biela e desta ao virabrequim, provocando assim o movimento de rotação do motor. Essa é a única fase que transforma a energia química do óleo diesel em energia mecânica, sendo que as outras três fases consomem uma parte dessa energia. A energia produzida é acumulada pelas massas do virabrequim e do volante.
- **Exaustão** - O pistão sobe, estando a válvula de escape aberta e a de admissão fechada. Os gases queimados são expulsos através da passagem dada pela válvula de escape.

Na Figura 2, tem-se um esquema da dinâmica do ciclo diesel em suas quatro fases.

Figura 2 – Representação da operação de um ciclo diesel em quatro tempos.

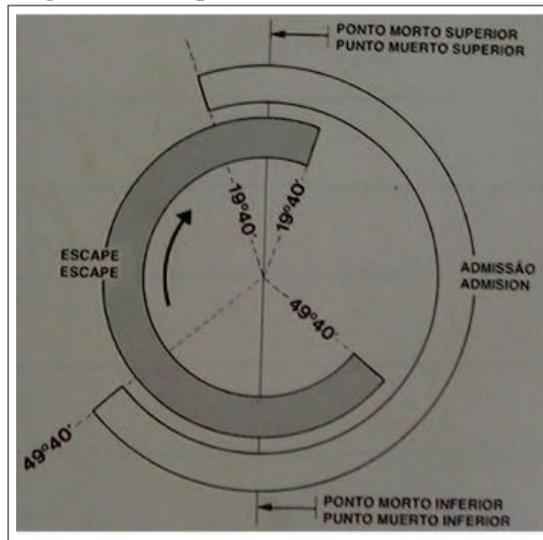


Fonte: adaptado de (HEYWOOD, 1988).

Ainda na Figura 2, tem-se indicado o ponto de altura máxima que o pistão pode alcançar no movimento ascendente, denominado de Ponto Morto Superior (PMS), ponto onde o volume delimitado pelo arranjo cilindro-pistão é mínimo, denominado de volume morto (V_m). O ponto de altura mínima, Ponto Morto Inferior (PMI), é o ponto onde o volume delimitado é máximo, chamado de volume total (V_t). O volume deslocado (V_d) é volume que varia entre o volume mínimo e o volume máximo, de acordo com o movimento do pistão.

Além de sincronizar o movimento dos pistões, a árvore de manivela também sincroniza o comando de válvulas para abertura e fechamento das válvulas de admissão e escape no tempo correto, para se garantir uma mistura de ar-combustível adequada à combustão. Na Figura 3, tem-se o esquema de valvulamento de um motor diesel, o motor utilizado nos experimentos.

Figura 3 – Esquema de valvulamento



Fonte: adaptado de (MWM, 2005).

Os arcos em destaque na Figura 3 representam os períodos em que as válvulas de admissão e escape permanecem abertas. Por essa figura, pode-se acompanhar o ciclo no sentido horário. No início do ciclo, no tempo de admissão, o pistão encontra-se no PMS, a válvula de admissão é aberta e então o pistão inicia seu movimento descendente e a válvula de admissão se fecha aproximadamente 30° após o pistão passar pelo PMI, já em movimento ascendente. No tempo de exaustão, a válvula de escape abre, aproximadamente, 30° antes do PMI, com o pistão em movimento descendente, e se fecha quando o pistão atinge o PMS.

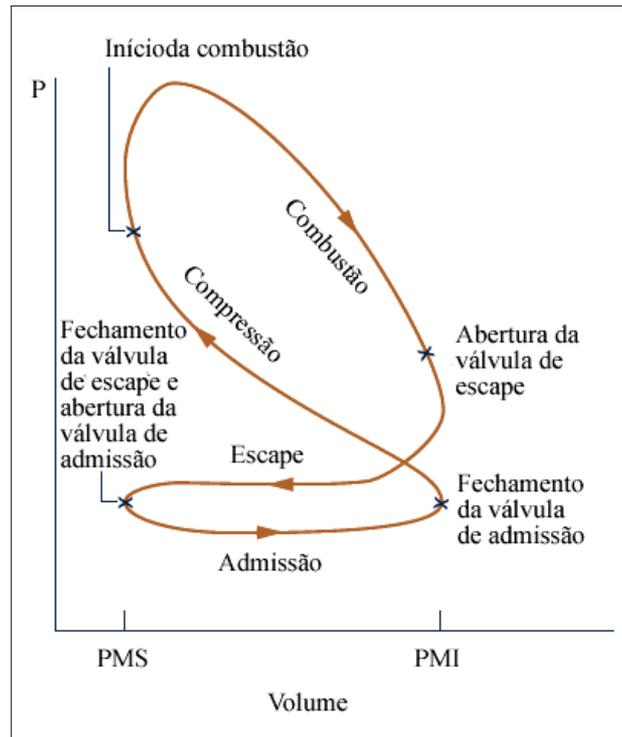
Os 30° a mais do PMI, durante o tempo de admissão, garantem uma maior quantidade de ar admitida e uma maior pressão no tempo de compressão. Já a abertura da válvula de escape 30° antes do PMI melhora a expulsão dos gases e de material particulado, aproveitando o final do fenômeno de expansão dos gases de combustão para esse objetivo.

O conhecimento desses e de outros detalhes de funcionamento do motor diesel, como o regime de funcionamento, é muito importante para análise e interpretação de resultados obtidos na medição da pressão interna do cilindro de combustão, porque a interação do fluido contido no arranjo cilindro-pistão com esses mecanismos irá influenciar os valores obtidos como resultado

da medição.

Na literatura, existem diversas formas de se utilizar e apresentar os dados de pressão de um cilindro de combustão. Uma das formas é representar os ciclos reais dos motores descritos num diagrama p-V (pressão x volume), conforme (MORAN; SHAPIRO, 2009).

Figura 4 – Diagrama de Pressão x Volume da câmara de combustão



Fonte: adaptado de (MORAN; SHAPIRO, 2009).

Da Figura 4, extrai-se uma ideia de como é o comportamento da pressão no cilindro de combustão de um motor. Dessa figura, observa-se o aumento, quase que linear, da pressão e o salto abrupto com o início da combustão. Nota-se ainda que a combustão inicia-se um pouco antes de o pistão atingir o PMS, aproximadamente 7° , segundo Heywood (1988). Essa informações podem ser utilizadas para se determinar o trabalho realizado durante o ciclo e outros parâmetros de análises, sendo que os valores de pressão geralmente são obtidos com um transdutor de pressão instalado no topo do cilindro (MORAN; SHAPIRO, 2009).

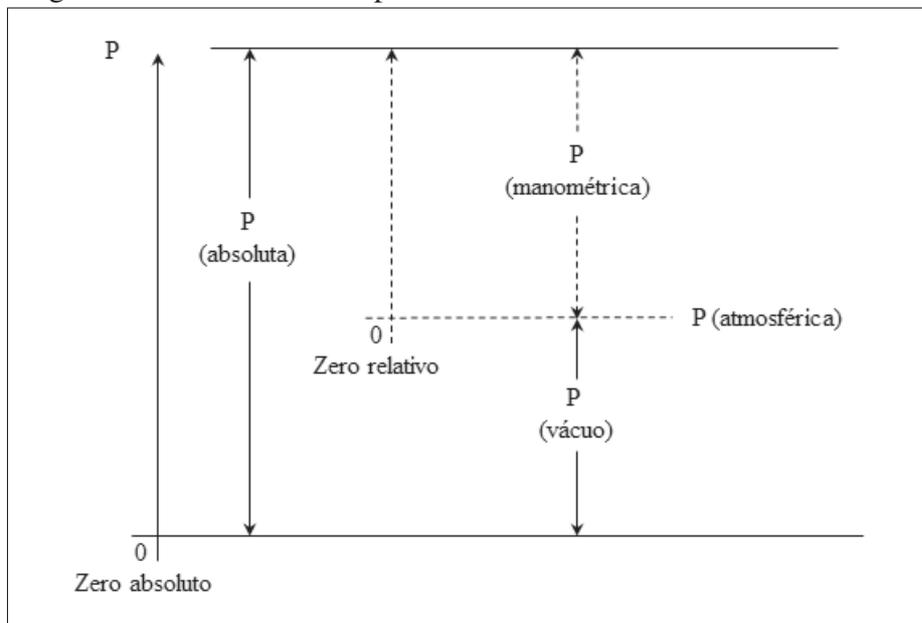
2.2 A Medição de Pressão

Por definição, a pressão é uma grandeza realizada pela atuação, perpendicularmente, de uma força sobre uma superfície (MORAN; SHAPIRO, 2009). Segundo Couto *et al.* (2010), numa forma geral, a pressão é resultante do efeito da força do impacto das moléculas de um

fluido, líquido ou gasoso, nas paredes de um recipiente no qual o fluido está contido.

A medição de pressão é sempre realizada a partir de um valor referencial. Dependendo do referencial utilizado, como mostrado na Figura 5, as modalidades de pressão medidas são: pressão absoluta, pressão manométrica, vácuo e pressão diferencial.

Figura 5 – Modalidades de pressão.



Fonte: o autor.

A pressão absoluta (P_{abs}) é a pressão que está acima da pressão “zero absoluto” (COUTO *et al.*, 2010). A pressão manométrica é um caso especial de medição de pressão diferencial quando a pressão absoluta medida for maior que a pressão atmosférica local. Vácuo é um caso especial de medição de pressão diferencial quando a pressão absoluta medida for menor que a pressão atmosférica local. A diferença entre duas pressões P_1 e P_2 é denominada pressão diferencial. Nesta modalidade de pressão, o valor da pressão referencial, P_1 ou P_2 , não é a pressão atmosférica local como também não é a pressão “zero absoluto”.

Os instrumentos de medição de pressão podem ser classificados, segundo Couto *et al.* (2010), em dois grandes grupos: fundamentais e relativos. Os instrumentos fundamentais medem pressão a partir da definição da grandeza. Neste grupo incluem-se o manômetro de coluna líquida e a balança de pressão. Os instrumentos relativos medem a pressão em função de uma propriedade física ou um fenômeno físico. Neste grupo estão compreendidos os manômetros, vacuômetros, transdutores/transmissores de pressão, etc.

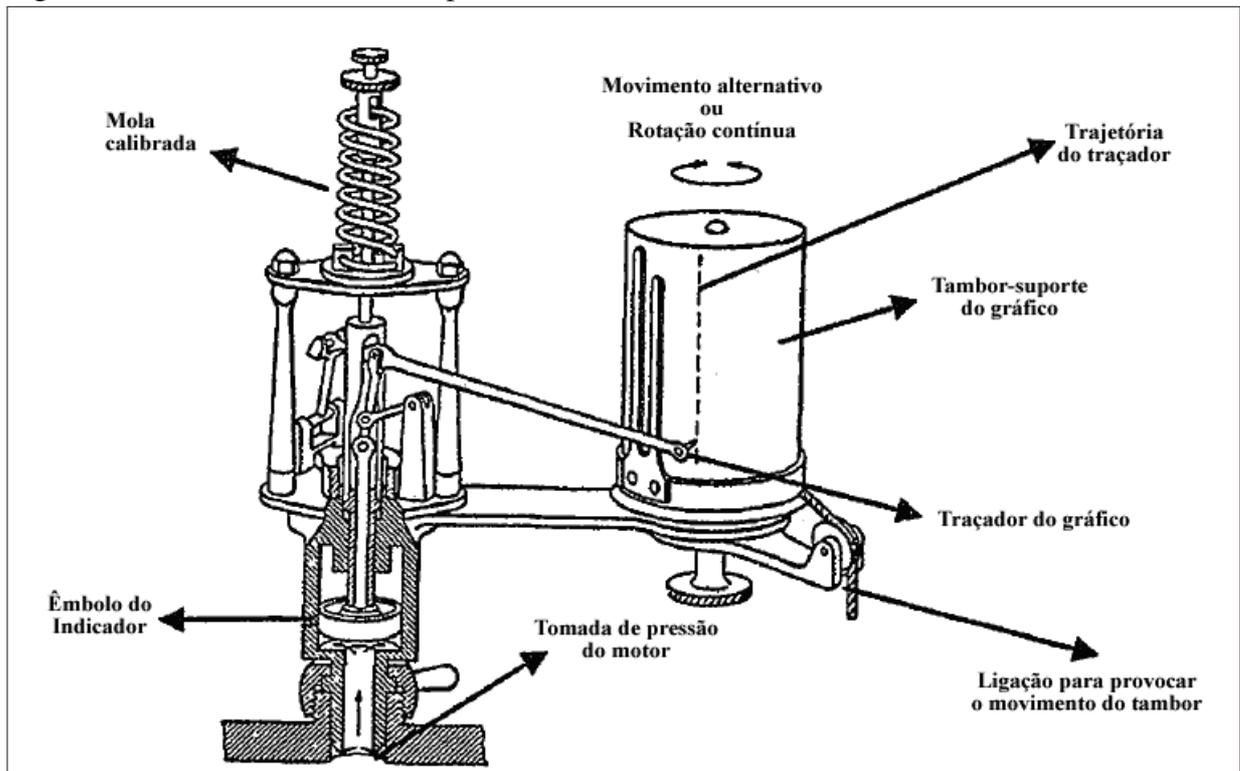
Historicamente os instrumentos de medição de pressão vêm sendo utilizados com objetivo de captar informações que podem ser tratadas e apresentadas para uma melhor

compreensão do comportamento do ciclo termodinâmico em um motor de combustão.

2.2.1 Medidores mecânicos de pressão

Um indicador mecânico de pressão, como mostrado na Figura 6, é utilizado com o objetivo de se traçar um gráfico $P \times V$, como mostrado na Figura 4.

Figura 6 – Indicador mecânico de pressão.



Fonte: (BRUNETTI, 2012).

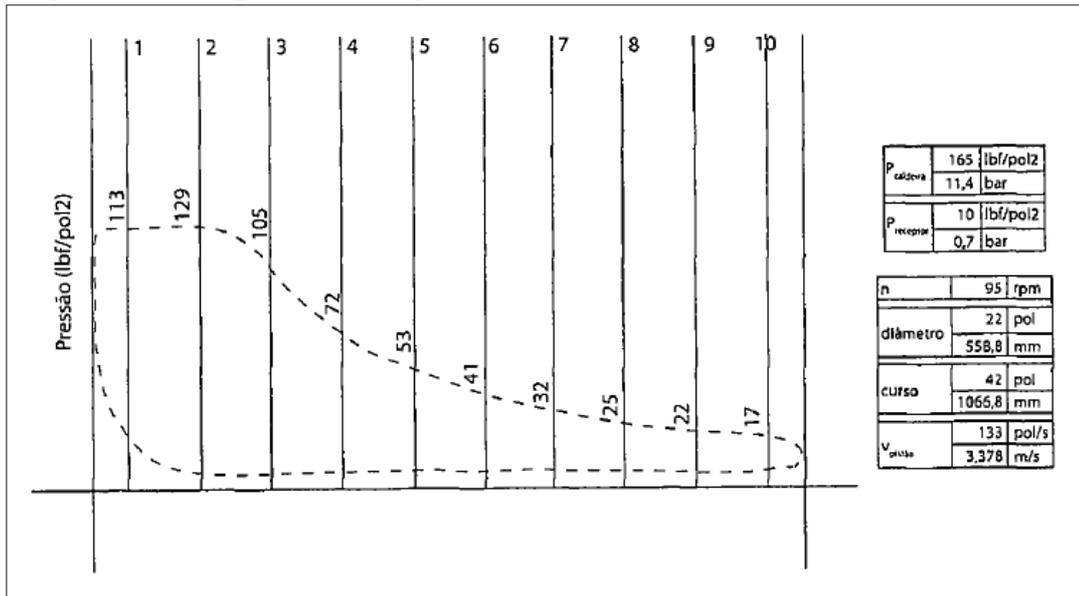
Esse equipamento constitui-se de um mecanismo cilíndrico conectado ao cilindro do motor, do qual faz continuamente a tomada da pressão. Esse mecanismo realiza a medição da pressão por meio do deslocamento de um êmbolo que comprime uma mola calibrada para se obter uma deformação proporcional à pressão aplicada na face do êmbolo. O movimento desse êmbolo é transmitido a um braço mecânico, que risca um tambor em movimento rotatório, sincronizado com o movimento do pistão do motor ou de seu eixo.

Brunetti (2012) explica que nessas aplicações o tipo de gráfico traçado depende do movimento do tambor que pode sofrer um movimento de vaivém em torno de seu eixo ou uma rotação contínua.

Um exemplo de gráfico gerado no primeiro caso é mostrado na Figura 7, no qual se tem um diagrama P-V. Nesse caso, em ordenadas o traçado é proporcional à pressão e as

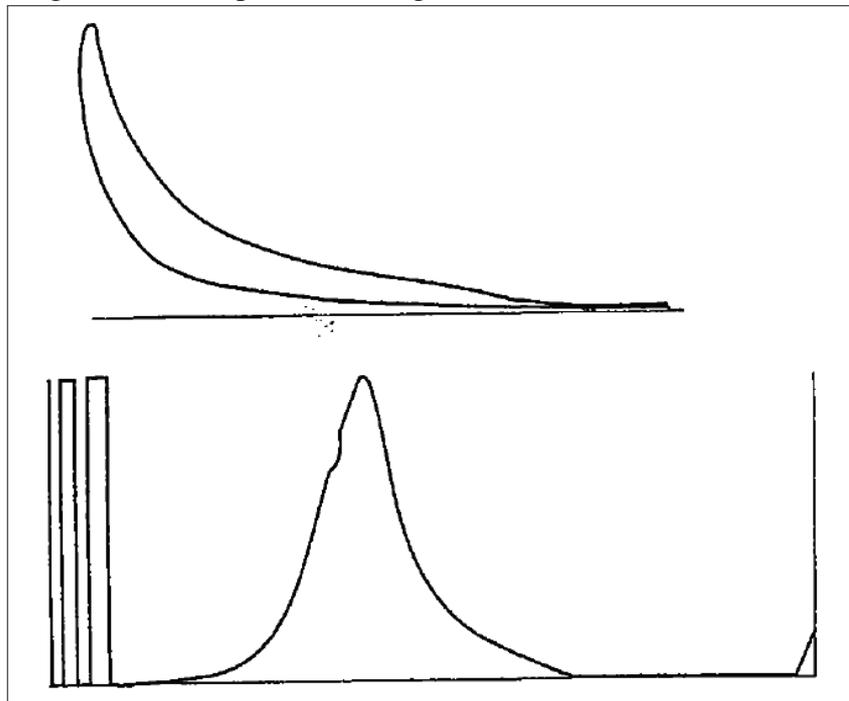
abscissas são proporcionais ao volume do fluido pressurizado no arranjo cilindro-pistão.

Figura 7 – Exemplo de um diagrama P-V.



Fonte: (BRUNETTI, 2012).

Figura 8 – Exemplo de um diagrama P- α .



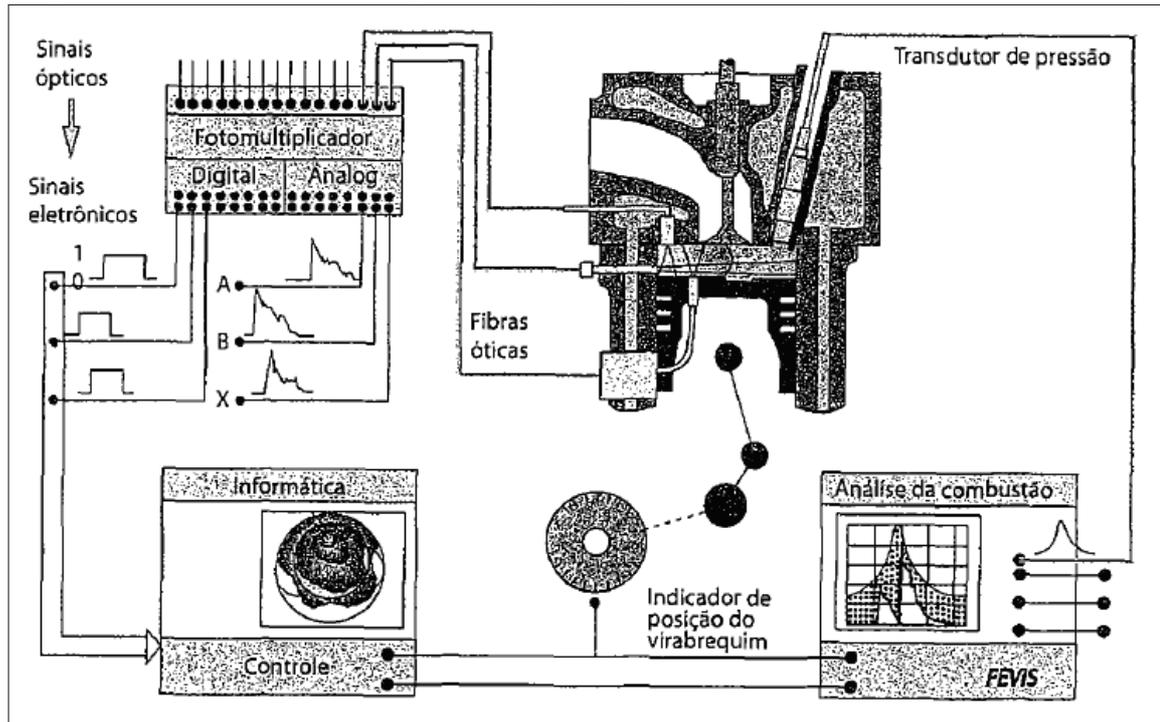
Fonte: (BRUNETTI, 2012).

No segundo caso, obtém-se um gráfico como mostrado no exemplo da Figura 8. Brunetti (2012) explica que quando o tambor gira continuamente, a sincronização realiza-se com o eixo do motor de forma que cada pressão terá correspondência com o ângulo percorrido pela

manivela em relação à posição de PMS. Nesse caso, o gráfico traçado denomina-se "diagrama P- α do motor", onde α é o ângulo descrito pela manivela.

Brunetti (2012) relata que Nikolaus Otto, em 1876, fazia uso de um indicador mecânico de pressão para avaliar a eficiência do seu invento. Hoje é comum o uso da eletrônica para o monitoramento da pressão em motores, como apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Sistema eletrônico para medição de pressão.



Fonte: (BRUNETTI, 2012).

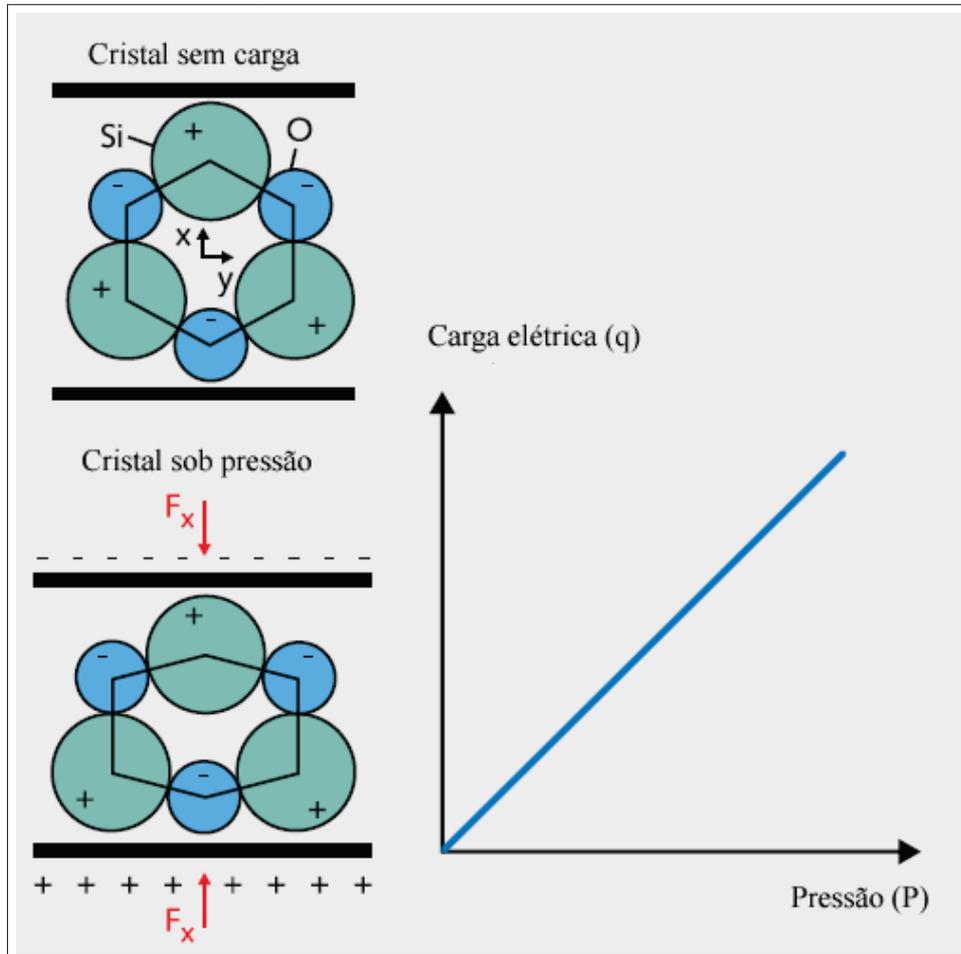
Esse aparato supera algumas das limitações do sistema mecânico. Constitui-se basicamente de um sistema de aquisição de dados que se comunica com um computador para análise e apresentação dos dados da combustão. Esse dados provêm dos sinais de um transdutor de posição angular e de um transdutor de pressão. Segundo Brunt e Pond (1997), normalmente se utiliza um transdutor de pressão piezoelétrico para essas aplicações, porque estes apresentam características mais adequadas aos objetivos da aplicação.

2.2.2 Os transdutores piezoelétricos

Vários princípios de medição são utilizados nas tecnologias de medição de pressão (KISTLER, 2017). No entanto, o desenvolvimento dessas tecnologias se baseou, principalmente, em dois princípios físicos: piezoelétrico e piezoresistivo. Neste trabalho foi utilizado um sensor de pressão piezoelétrico e portanto será avaliada em mais detalhes apenas essa tecnologia.

Nos transdutores piezoelétricos, o elemento de medição é um cristal, de material como o quartzo, que produz uma carga elétrica diretamente proporcional à pressão aplicada.

Figura 10 – Princípio de funcionamento do elemento piezoelétrico.



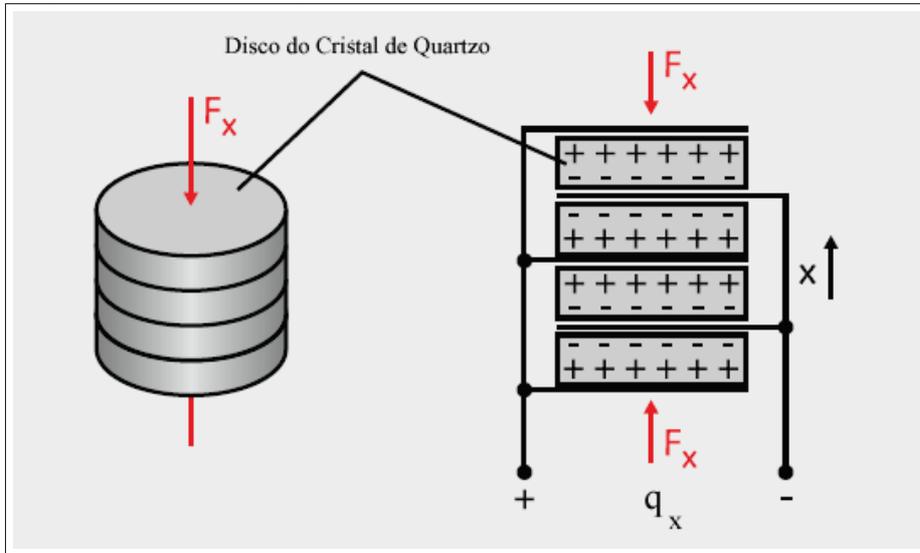
Fonte: (KISTLER, 2017).

O efeito piezoelétrico é responsável por produzir cargas elétricas positivas ou negativas quando uma carga mecânica é aplicada às superfícies externas do cristal. A carga é gerada porque os elementos de rede cristalina positiva e negativa, como representados na Figura 10, são deslocados um em relação ao outro, formando assim um dipolo elétrico. A carga gerada com isso é proporcional à força, e por consequência à pressão, agindo sobre o cristal.

A carga gerada depende apenas do material do elemento de medição, independentemente da forma geométrica desse elemento, que pode assumir diversas geometrias e dimensões (KISTLER, 2017).

Uma das formas mais utilizadas para a confecção do elemento de medição é a forma de disco, como ilustrado na Figura 11, sendo possível arranjar vários discos em uma ligação em paralelo, objetivando-se melhorar a sensibilidade do transdutor como um todo.

Figura 11 – O cristal piezoelétrico.



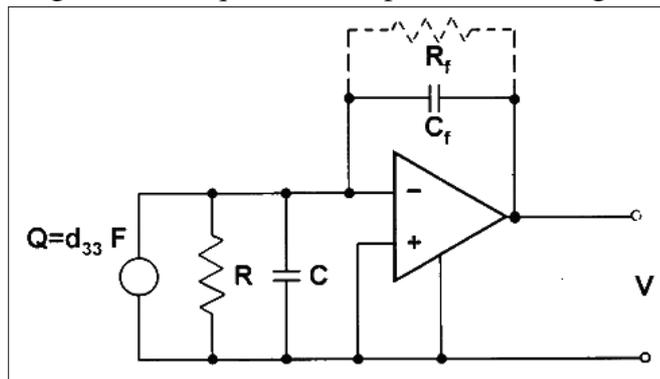
Fonte: (KISTLER, 2017).

Segundo Webster (1999), a carga “q” gerada no sensor piezoelétrico pode ser convertida em corrente “i” de acordo com a expressão:

$$i = \frac{dq}{dt} = d_{33} \frac{dF}{dt} \quad (2.1)$$

Onde: dq e dt são as variações de carga elétrica e de tempo, respectivamente. E d_{33} é o denominado coeficiente longitudinal do sensor. O diferencial “dF” indica a variação de força atuando na face do sensor.

Figura 12 – Esquema do amplificador de carga.



Fonte: (WEBSTER, 1999).

Um sistema de medição piezoelétrico consiste, basicamente, em um transdutor, para gerar o sinal de carga elétrica, um amplificador, com a função de converter o sinal do transdutor em tensão elétrica, e um sistema capaz de ler o sinal de tensão, processar e exibir resultados. Segundo Webster (1999), o módulo composto pelo transdutor e amplificador pode ser estruturado como mostrado na Figura 12.

Na Figura 12, tem-se um exemplo de aplicação da conversão da carga gerada por um transdutor piezoelétrico em tensão (V), com a utilização de um circuito elétrico conectando o transdutor a um amplificador de carga.

Para superar as dificuldades de utilização de amplificadores de tensão para medições piezoelétricas, Webster (1999) propõe um chamado amplificador de carga, mostrado na Figura 12. Observe que a entrada inversora do amplificador operacional é usada com um capacitor C_f no loop de feedback. Supondo que a corrente de entrada e a tensão do amplificador operacional sejam insignificantes, pode-se relacionar a carga no transdutor com a tensão de saída por:

$$V = \frac{-q}{C_f} = d_{33} \frac{F}{C_f} \quad (2.2)$$

Observa-se que a Equação 2.2 fornece a resposta independente de frequência do sinal de entrada, onde a tensão de saída é determinada apenas pelo coeficiente piezoelétrico d_{33} e pela capacitância conhecida C_f . Webster (1999) destaca que essa vantagem é difícil de se perceber, pois mesmo uma pequena corrente de entrada do amplificador irá carregar o capacitor de feedback, levando à saturação do mesmo. Portanto, um resistor de derivação R_f é adicionado ao circuito (linha pontilhada na Figura 12), o que evita esse carregamento. Levando em consideração o circuito RC do circuito de retorno, a tensão de saída terá a forma:

$$V = \frac{d_{33}F}{C} \frac{j\omega\tau}{1 + j\omega\tau} \quad (2.3)$$

Agora a tensão de saída se torna dependente da frequência ω conhecida e com $\tau = RC$. Neste caso, a constante de tempo τ é determinada pelos parâmetros do circuito de retorno e não depende da capacitância do transdutor, dos cabos de conexão ou da capacitância de entrada do amplificador. Isso proporciona uma vantagem importante ao amplificador de carga quando comparado ao amplificador de tensão comum. No entanto, Webster (1999) ressalta que, de acordo com a Equação 2.3, a sensibilidade do circuito é muito reduzida com a diminuição de C . Se τ não é suficientemente grande, o corte de baixa frequência não permite medições piezoelétricas em condições quase estáticas ou de baixa frequência.

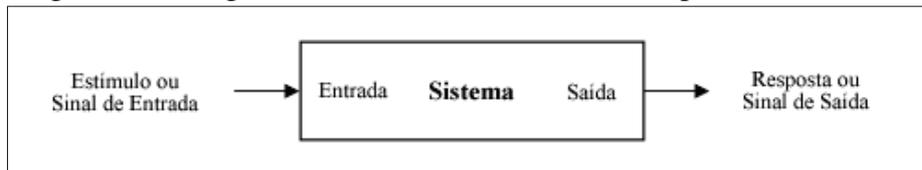
Em seu trabalho, Bueno *et al.* (2009) aplicaram uma simplificação do circuito apresentado na Figura 12, composto pelo amplificador operacional e pelo resistor de referência, sendo que a saída desse circuito é a entrada para um segundo amplificador operacional. Luján *et al.* (2010) aplicam uma configuração alternativa, composta apenas do amplificador e do resistor de referência, também obtendo bons resultados. Nessas aplicações o modelo matemático para o sinal de tensão pode ser reescrito substituindo força por pressão.

Eriksson e Thomasson (2017) também aplicam uma ramificação do circuito da Figura 12 e, em seu trabalho, eles destacam a importância de um bom sistema de condicionamento e processamento do sinal desses transdutores piezoelétricos para uma estimativa segura de parâmetros dependentes desse sinal.

2.3 Sinais e Sistemas

O sinal gerado pelo transdutor piezoelétrico é amostrado e registrado por um sistema de aquisição de dados para posterior tratamento e apresentação, de forma que se possa utilizar essa informação para tomadas de decisões. Mas, segundo Roberts (2009), sinais são modificados por sistemas. Quando um ou mais sinais de estímulo ou sinais de entrada são aplicados a uma ou mais entradas do sistema, estes produzem uma ou mais respostas ou sinais de saída, como representado na Figura 13, em um diagrama de blocos de um sistema com uma única entrada e única saída.

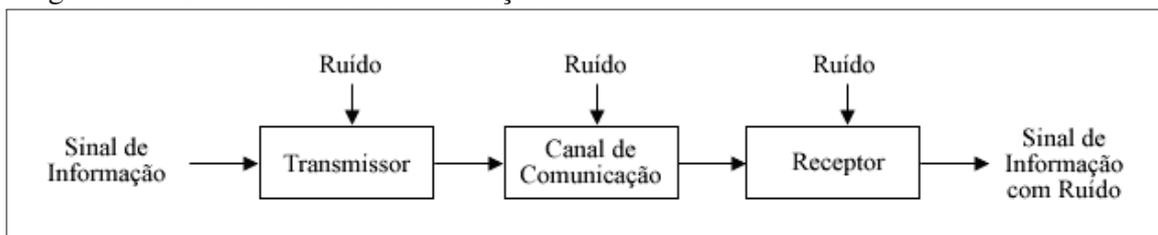
Figura 13 – Diagrama de blocos de um sistema simples.



Fonte: (ROBERTS, 2009).

Roberts (2009) explica que, em um sistema, o transdutor gera o sinal de interesse, um sinal de informação, e o transmissor envia esse sinal ao receptor por meio de um canal de comunicação, que é o caminho que o sinal percorre desde o transmissor até o receptor. Roberts (2009) afirma, ainda, que a presença de ruídos é inevitável no transmissor, canal e receptor, muitas vezes em múltiplos pontos, como representado na Figura 14.

Figura 14 – Um sistema de comunicação.



Fonte: (ROBERTS, 2009).

Payri *et al.* (2010) relatam que o sinal de respostas do transdutor piezoelétrico sofre

a influência de várias fontes de ruídos, tanto ruídos mecânicos como elétricos. Isso normalmente exige que esse sinal seja processado por meio de filtros, analógicos ou digitais, antes de sua exposição. Payri *et al.* (2010) indicam também que um processamento no domínio do tempo é geralmente preferido, devido à aquisição de dados ser em função da posição angular.

Payri *et al.* (2010) fornecem, ainda, sugestões para minimizar os efeitos dos ruídos, tanto mecânicos como elétricos. Os ruídos provocados pelas vibrações mecânicas podem ser minimizados por meio da compensação da aceleração do transdutor de pressão. Os ruídos elétricos podem ser reduzidos com a utilização de um excelente isolamento do módulo do sistema composto pelo transdutor, cabo e amplificador.

Randolph (1990b) demonstra excelentes técnicas para montagem do transdutor e configuração de filtros mecânicos para maximizar a precisão dos resultados obtidos com o transdutor. Ambrosio *et al.* (2015) apresentam um excelente trabalho com a aplicação de filtros digitais e uma análise no domínio da frequência, obtendo resultados muito satisfatórios.

Em seu trabalho, Brunt e Emtage (1996) identificaram que o sinal do transdutor piezoelétrico se mostrou mais suscetível a ruídos em posições próximas ao ponto médio do percurso do pistão, sendo menos suscetível em posições próximas do PMS e do PMI. Brunt e Emtage (1996) explicam, ainda, que a suscetividade ao ruído tende a crescer com a resolução do transdutor de posição angular, utilizado no sistema como gatilho para aquisição de dados, devido ao fato de que quanto melhor a resolução maior será a probabilidade de um pico de ruído coincidir com a leitura de pressão.

Além dos ruídos, Randolph (1990a) aponta que o sinal gerado pelo transdutor de pressão sofre influência de outros fatores, como choque térmico, variações entre ciclos, variações ao longo de um ciclo, fatores relacionados a montagem e operação do transdutor e do sistema como um todo. Esses e outros fatores, atuando simultaneamente, irão contribuir em maior ou menor grau para imprecisões nos valores obtidos para a pressão interna do cilindro de combustão.

Asad *et al.* (2011) alertam para a importância de um sistema de medição bem estruturado para a realização de testes com melhor qualidade e confiança nos resultados obtidos.

Muitos trabalhos exemplificam a importância do processamento adequado dos sinais obtidos com o transdutor de pressão piezoelétrico para diagnósticos mais precisos e seguros sobre o objeto de estudo (PATTERSON, 2008; DESBAZEILLE *et al.*, 2010; HOUNTALAS *et al.*, 2014; FINESSO *et al.*, 2016).

2.4 A Precisão da Medição

Vários são os exemplos de trabalhos que aplicam os dados de pressão do cilindro de combustão para análises de diversos parâmetros, como (KHAJORNTRAIDET; ITO, 2016; SZABADOS; BERECZKY, 2018). Nesses trabalhos, a qualidade dos resultados utilizados para suas conclusões está, diretamente, influenciada pela precisão da medição de pressão no cilindro de combustão, entre outros fatores.

Segundo o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), precisão de uma medição é: "O grau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas"(INMETRO, 2012). Da mesma publicação, tem-se que exatidão de medição é: "O grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro dum mensurando".

Esses dois conceitos são algumas vezes confundidos em sua utilização, mas eles podem ser utilizados como um balizador para guiar as ações necessárias à execução deste estudo, como forma de se garantir que seus objetivos sejam alcançados de forma confiável.

Para a avaliação da exatidão dos métodos, faz-se necessária a definição de um valor de referência (o valor verdadeiro do mensurando). Neste trabalho, assumiu-se um método como referência para avaliação da exatidão dos demais.

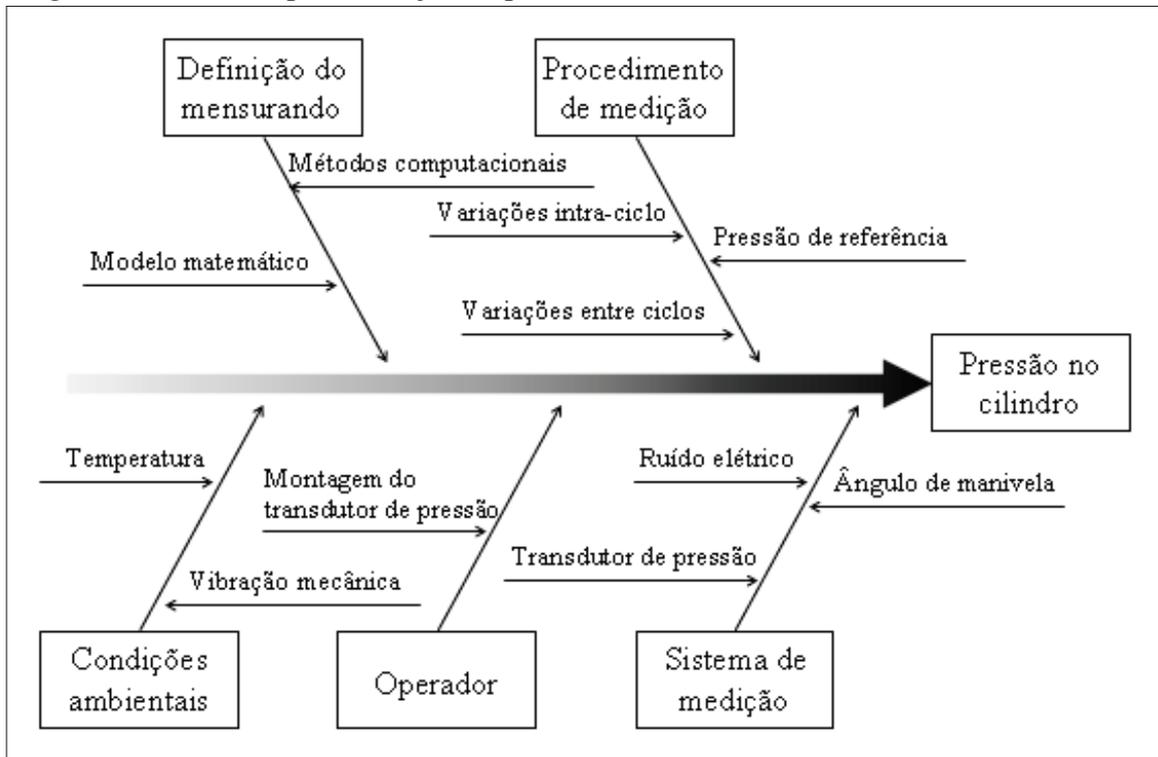
Segundo Albertazzi e Sousa (2018), a precisão (de medição) pode ser calculada pelo produto entre a incerteza-padrão (de medição) e o respectivo coeficiente t de *Student*. A incerteza de medição é definida como: "Parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas."(INMETRO, 2012).

Para uma análise adequada desse parâmetro, Albertazzi e Sousa (2018) recomendam caracterizar bem o processo de medição, porque este envolve muito mais que apenas o transdutor ou sistema de medição. Fatores como o meio de medição, o procedimento, o agente que efetua a medição, o método de medição e a própria definição do mensurando são fatores que irão influenciar, em maior ou menor grau, o resultado da medição.

Em seu trabalho, Asad *et al.* (2011) destacam a importância da precisão dos dados empíricos para as análises a serem realizadas e apresentam a estrutura de um sistema para a medição da pressão interna dum cilindro de combustão. Benajes *et al.* (2014) destacam a importância de se avaliar as incertezas dos dados fornecidos por esse sistema. E Storm *et al.* (2017) realizam uma análise do impacto de algumas das fontes de erro e incerteza apresentadas na Figura 15 na determinação de taxa de liberação de energia e na PME.

Na Figura 15 estão representados os principais elementos presentes no processo de medição da pressão em um cilindro de combustão, conforme apontado por Brunt e Pond (1997), que irão gerar incertezas nos resultados obtidos.

Figura 15 – Sistema para medição de pressão.



Fonte: o autor.

Como o objetivo deste trabalho engloba a medição de uma grandeza, cujo valor varia em função do tempo durante o período em que a medição é realizada, Albertazzi e Sousa (2018) sugerem mais cuidados para se garantir resultados com melhor exatidão.

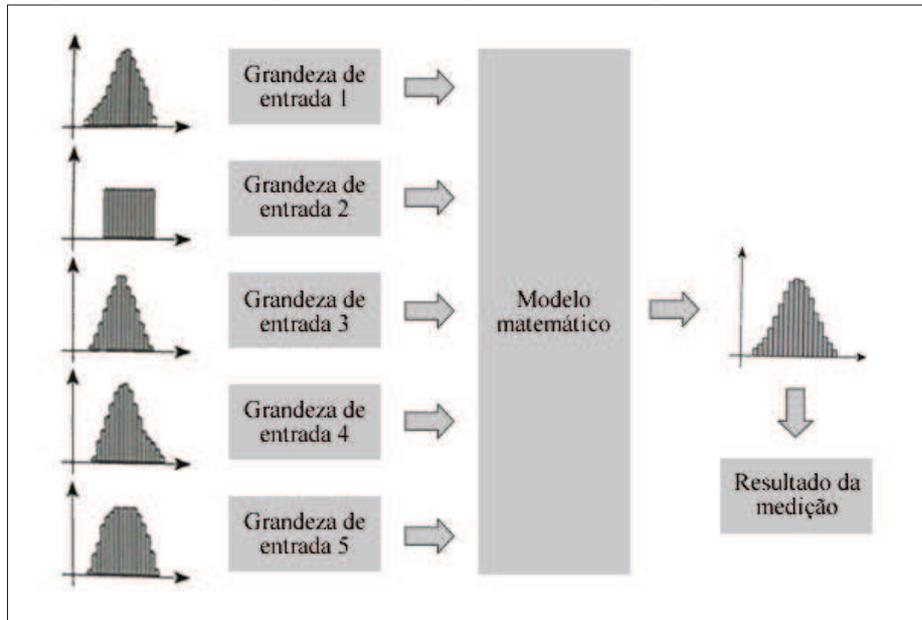
A avaliação e quantificação da influência de cada uma das fontes de incerteza de medição podem ser realizadas com base em ferramentas estatísticas e/ou se utilizando de rotinas numéricas. Dada a complexidade de estrutura e de relacionamento entre os elementos que compõem o sistema de medição em estudo, neste trabalho foi utilizada uma abordagem numérica para estimativa das incertezas de medição.

Neste trabalho, foram aplicados os conceitos de simulação numérica por meio do método de Monte Carlo, como aplicado em trabalhos de igual complexidade, como (BUYUKADA, 2017; SIERESA; CAMPO, 2018).

Na Figura 16, tem-se um esquema da simulação numérica aplicada a um processo de medição, onde as grandezas de entrada que irão influenciar significativamente o sinal de saída

são combinadas por meio de um modelo matemático e analisadas estatisticamente.

Figura 16 – Simulação numérica aplicada a medição.



Fonte: (ALBERTAZZI; SOUSA, 2018).

Segundo Albertazzi e Sousa (2018), a essência do método de Monte Carlo é realizar simulações numéricas a partir de um número massivo de repetições e obter conclusões sobre fenômenos a partir da análise estatística das respostas. Neste trabalho, a simulação por meio do método de Monte Carlo foi aplicada para avaliar a influência das principais fontes de incerteza identificadas na Figura 15, agindo simultaneamente sobre os resultados obtidos com os métodos de referencial de pressão.

Detalhes e exemplos de uma abordagem numérica para determinação da incerteza dos resultados de medição podem ser encontrados em JCGM (2008).

2.5 Os Métodos de Referencial de Pressão

Devido ao princípio físico de funcionamento dos transdutores piezoelétricos, descrito na Equação 2.1, quando se trabalha com esse tipo de transdutor e se precisa de valores absolutos de pressão, uma etapa importante do trabalho foi a determinação de uma pressão de referência para tratamento adequado dos dados obtidos. Os métodos utilizados com esse objetivo são comumente chamados de métodos *pegging* (ERIKSSON; THOMASSON, 2017); aqui serão chamados de métodos de referencial de pressão, porque consistem em um conjunto de atividades estruturadas de forma a se estabelecer um valor de pressão como referencial para o tratamento

dos dados de diferencial de pressão obtidos com um transdutor piezoelétrico. Neste trabalho serão apresentados nove e avaliados, em maiores detalhes, quatro desses métodos, onde, segundo Randolph (1990b), em cada um são assumidas suposições que irão influenciar em maior ou menor grau a precisão do método. Um quinto método foi analisado e melhorado para que possa ser utilizado como referência para a análise da exatidão dos outros quatro métodos.

2.5.1 Referência pelo coletor de admissão

Segundo Brunt e Pond (1997), na aplicação desse método assume-se que a pressão interna do cilindro, quando o pistão passa pelo PMI, é igual à pressão no coletor de admissão. Randolph (1990b) explica que para uma melhor exatidão na aplicação desse método, recomenda-se assumir como referência uma média de três valores de pressão em torno do PMI, pegando-se a pressão no PMI, um grau antes e um grau depois.

Esse é um procedimento muito preciso em sistemas de admissão sem otimização ou em velocidades muito baixas em sistemas otimizados. Isso porque qualquer fluxo de ar na portinhola de acesso ao cilindro pode provocar alterações na pressão (RANDOLPH, 1990b). Em seu trabalho, Brunt e Pond (1997) relatam algumas opções para a aplicação desse método:

1. Utilizando apenas um transdutor de pressão absoluta, montado na via principal do coletor de admissão.
2. Utilizando apenas um transdutor de pressão absoluta, montado na ramificação de entrada do cilindro em estudo.
3. Utilizando múltiplos transdutores na entrada de cada cilindro.

Brunt e Pond (1997) listam ainda algumas fontes de erros, presentes na segunda opção, mas que podem ser estendidas às outras duas:

1. Erros do próprio transdutor de pressão.
2. Diferenças entre a pressão no coletor de admissão e a pressão no cilindro de combustão.
3. Diferenças entre as pressões nos cilindros.
4. Erros na medição da pressão no cilindro.
5. Variações da pressão do cilindro durante o ciclo.

Muitas vezes o erro proveniente do transdutor de pressão pode ser negligenciado, desde que o transdutor tenha sido bem especificado, levando-se em consideração a faixa de medição, exatidão, frequência de medição etc. Uma atenção maior deve ser dedicada à diferença

entre as pressões no coletor de admissão e no cilindro de combustão, não se esquecendo de tomar medidas com objetivo de reduzir a influência de ruídos na medição.

2.5.2 *Referência pelo coletor de escape*

Esse método é muito semelhante ao anterior, com a diferença fundamental de que a referência é estabelecida na fase de escape ou exaustão do ciclo e a pressão é medida no coletor de escape, supondo-se que a pressão no cilindro será igual à pressão no coletor de escape. Assim como o método anterior, esse método apresenta um desempenho melhor em sistemas não otimizados (RANDOLPH, 1990b). Os vários tubos do coletor de escape promovem oscilações na pressão do coletor de escape que geram diferenças entre a pressão no coletor de escape e a contrapressão medida no cilindro de combustão.

Com o objetivo de melhorar o desempenho desse método, Randolph (1990b) recomenda a utilização da média de pressões medidas ao longo de vários ângulos de manivela, o que contribui também para a redução de ruídos aleatórios. A pressão média de escape a ser utilizada pode ser determinada como a média de 100 medições realizadas no intervalo entre 40 graus após o PMI e 40 graus antes do PMS.

2.5.3 *Referência por coeficientes politrópicos constantes*

Heywood (1988) explica que o comportamento observado para a compressão da mistura ar-combustível antes da combustão, bem como a expansão dos gases após a combustão, aproxima-se de processos isentrópicos e adiabáticos (para os quais: $PV^k = constante$ e $k = c_p/c_v$). Baseado nisto, na aplicação deste método, supõe-se que a fase de compressão do ciclo ocorre por um processo politrópico, o qual é definido por Moran e Shapiro (2009) como:

$$PV^k = constante \quad (2.4)$$

Onde:

P - pressão,

V - Volume,

k - coeficiente politrópico.

Heywood (1988) destaca, ainda, que muitos estudos obtiveram valores para o coeficiente politrópico: $k = 1,30 \pm 0,05$, para os combustíveis convencionais.

Randolph (1990b) demonstra que uma relação entre o sinal de tensão (E) gerado pelo transdutor e a pressão (P) em função do ângulo de manivela (θ) pode ser definida como:

$$E(\theta) = \frac{P(\theta)}{G} + E_0 \quad (2.5)$$

Onde:

$E(\theta)$ - Tensão;

$P(\theta)$ - Pressão;

G - Ganho do transdutor;

E_0 - Tensão de polarização do transdutor.

Tomando a diferença de pressão entre dois pontos da fase de compressão como:

$$\Delta P = P_2 - P_1 \quad (2.6)$$

Substituindo a Equação 2.5 em 2.6:

$$\Delta P = G[E(\theta_2) - E(\theta_1)] \quad (2.7)$$

Então combinando as Equações 2.7 e 2.9 e resolvendo para E_0 :

$$E_0 = E(\theta_1) - \frac{E(\theta_2) - E(\theta_1)}{\left[\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k - 1 \right]} \quad (2.8)$$

Com base nesse princípio, Brunt e Pond (1997) realizam uma outra abordagem substituindo a Equação 2.4 em 2.6 e rearranjando-a matematicamente, obtém-se:

$$\Delta P = P_1 \left[\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k - 1 \right] \quad (2.9)$$

Para se obter valores de pressão absoluta, Brunt e Pond (1997) orientam que os valores de pressão obtidos com o transdutor piezoelétrico sejam corrigidos somando-se a esses valores o valor de pressão de correção (P_c), obtido a partir da Equação 2.9 como:

$$P_c = -P_1 + \frac{\Delta P}{\left[\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k - 1 \right]} \quad (2.10)$$

Em seu trabalho, Wenig *et al.* (2010) utilizaram esse método para realizar análises de um motor a gasolina, que dependiam dos valores de pressão absoluta, por ser o mais utilizado em sua base de dados de ensaios.

Brunt e Pond (1997) ressaltam que esse método é utilizado por sistemas proprietários de aquisição e tratamento de dados, comercializados para análises na área de combustão. Randolph (1990b) destaca que as duas principais desvantagens deste método são a necessidade de se fixar um valor de k que pode estar ligeiramente errado e a suposição de que a compressão é um processo politrópico, quando falhas de hardware, referência de fase do ângulo de manivela ou características dos mecanismos envolvidos nesse processo podem fazer com que a compressão real não seja politrópica.

2.5.4 Referência por coeficientes politrópicos variáveis

A desvantagem de se fixar um coeficiente politrópico como constante, do método anterior, pode ser atenuada considerando a compressão politrópica e calculando o coeficiente politrópico. Rearranjando a Equação 2.8 e resolvendo para $\Delta E(\theta_{2-1})$:

$$\Delta E(\theta_{2-1}) = E(\theta_2) - E(\theta_1) = [E(\theta_1) + E_0] \left[\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k - 1 \right] \quad (2.11)$$

Escolhendo um θ_2 diferente:

$$\Delta E(\theta_{3-1}) = E(\theta_3) - E(\theta_1) = [E(\theta_1) + E_0] \left[\left(\frac{V_1}{V_3} \right)^k - 1 \right] \quad (2.12)$$

Dividindo a Equação 2.11 pela Equação 2.12:

$$\frac{E(\theta_2) - E(\theta_1)}{E(\theta_3) - E(\theta_1)} = \frac{\left[\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k - 1 \right]}{\left[\left(\frac{V_1}{V_3} \right)^k - 1 \right]} \quad (2.13)$$

A Equação 2.13 pode ser resolvida para $k = k_0$ por meio de uma expansão em série de Taylor, desconsiderando todos os termos de ordem maior ou igual a dois:

$$k = k_0 + Z_1 \left(\frac{E(\theta_2) - E(\theta_1)}{E(\theta_3) - E(\theta_1)} - Z_2 \right) \quad (2.14)$$

Onde:

k_0 - é a melhor aproximação para k

$$Z_1 = \frac{K^{k_0} - 1}{J^{k_0} \ln(J) - \left(\frac{J^{k_0} - 1}{K^{k_0} - 1} \right) K^{k_0} \ln(K)}$$

$$Z_2 = \frac{J^{k_0} - 1}{K^{k_0} - 1}$$

$$J = \frac{V_1}{V_2}$$

$$K = \frac{V_1}{V_3}$$

A simplificação de se desconsiderar os termos de ordem superior é válida para k_0 próximo de k . Randolph (1990b) relata que se obtêm resultados satisfatórios com a utilização de $k_0 = 1, 3$.

Com o valor de k calculado, determina-se a tensão de polarização do transdutor por meio da Equação 2.8. Randolph (1990b) relata que esse método é muito sensível a ruídos, recomendando o cálculo de k para vários pontos e então utilizar a média desses valores, alertando, ainda, que valores de k fora da faixa de 1,25 - 1,35 são muito suspeitos e devem ser questionados.

Em seu trabalho, Lee *et al.* (2007) realizaram a análise de vários métodos baseados na determinação de um referencial por coeficientes politrópicos variáveis, além de proporem um método que pode ser utilizado em aplicações de controle em tempo real.

Fanelli *et al.* (2012) realizaram uma análise comparativa de três variantes desse método de referencial por coeficientes politrópicos, na qual os coeficientes politrópicos são determinados com base em três pontos, em uma regressão linear por mínimos quadrados e em uma regressão não linear por mínimos quadrados. Conclui-se que os três métodos apresentam precisão bastante parecida, de tal forma que se pode optar pelo método de três pontos por ser de mais fácil implementação computacional.

Ressalta-se que, como o método anterior, este considera uma compressão politrópica, o que nem sempre é verdade.

2.5.5 Referência pela pressão de intra-ciclo com um transdutor e uma chave de comutação

Neste procedimento, utiliza-se um dispositivo de comutação, que expõe o transdutor de pressão à ação do fluido de trabalho do motor somente quando a pressão no cilindro de

combustão atinge determinado valor, estabelecido previamente. Então o transdutor de pressão mede somente a faixa de valores de pressão acima ou abaixo do valor estabelecido, dependendo de como tenha sido configurado o dispositivo de comutação. Com isso algumas faixas de pressão são cortadas da medição.

Para Randolph (1990b), idealmente esse método é potencialmente muito bom, devido ao fato de se poder proteger o transdutor de pressão de alguns efeitos da combustão e de se poder estabelecer de forma bem precisa o ponto de início de medição, como uma pressão absoluta de referência. Mas, devido ao relativamente elevado tempo de ação dos dispositivos de comutação, a potencialidade deste método torna-se bastante reduzida. Além disso, o uso de um adaptador de comutação exige uma passagem de acesso adicional ao cilindro.

2.5.6 Referência pela pressão intra-ciclo com o transdutor instalado na parede do cilindro

Um transdutor montado na parede do cilindro mede a pressão deste quando os anéis do pistão estão abaixo do local de medição e mede a pressão do cárter quando os anéis do pistão estão acima do local de medição. Como a pressão do cárter é relativamente constante e de fácil medição, isso serve como uma referência efetiva de pressão absoluta.

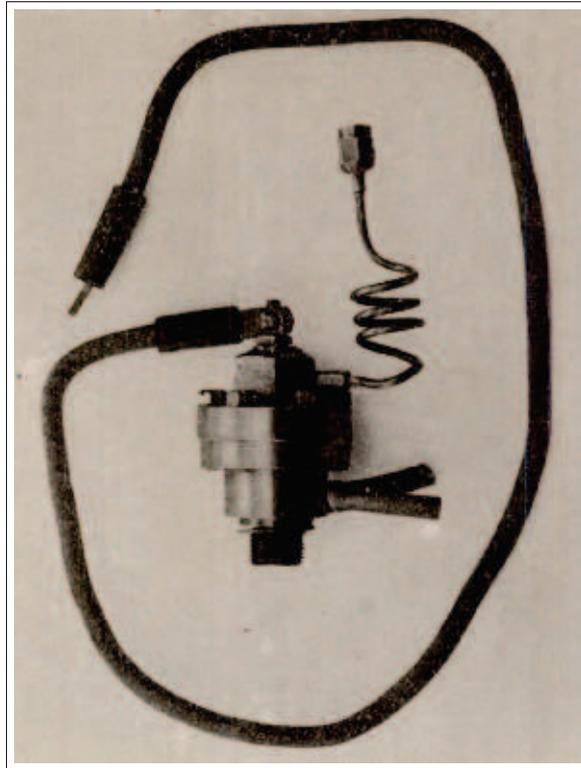
Segundo Randolph (1990b), este procedimento oferece a vantagem de fornecer verificações de pressões absolutas logo após a abertura da válvula de escape, perto do final da admissão e durante a compressão inicial. Mas Randolph (1990b) relata, ainda, que estudos realizados com a aplicação desse método foram afetados por erros provocados pelas oscilações na pressão do cárter.

Davis e Patterson (2006) apresentam bons resultados obtidos com a aplicação desse método em comparação com duas técnicas de referencial pela pressão de admissão, destacando como desvantagem desse método em relação aos outros a complexidade da montagem do transdutor.

2.5.7 Referência pela pressão de intra-ciclo com um transdutor de pressão diferencial

Um transdutor de pressão diferencial consiste em um sistema, como mostrado na Figura 17, composto basicamente de um mecanismo dividido em duas seções por um diafragma (elemento 1 indicado na Figura 18), que entra em contato com o fluido ativo do cilindro de combustão de um lado e com um sensor capacitivo (elemento 4) de outro (DICKINSON; NEWELL, 1921).

Figura 17 – Indicador de pressão diferencial.



Fonte: (DICKINSON; NEWELL, 1921).

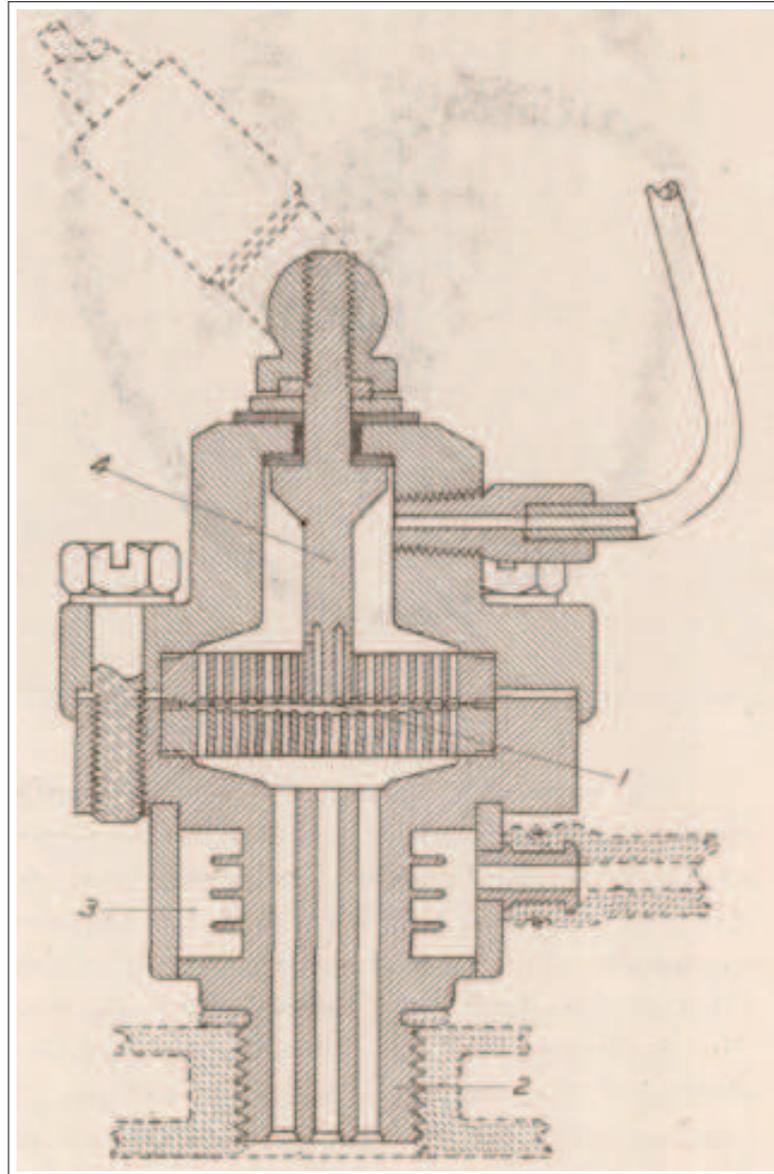
Quando o diferencial de pressão através do diafragma é suficiente para causar uma pequena deflexão, esta é captada pelo sensor capacitivo. Na Figura 18, tem-se, em corte, a vista frontal do indicador, onde é possível notar os detalhes de funcionamento desse instrumento.

Esse instrumento pode ser conectado ao motor em um orifício de vela de ignição pela parte inferior roscada (elemento 2 na Figura 18). Essa conexão com o motor necessita de refrigeração por água, sendo realizada por meio de uma cavidade anular (elemento 3).

A pressão do cilindro é, portanto, transmitida ao diafragma com um mínimo de inércia. A pressão de equilíbrio aplicada na parte superior do diafragma é fornecida por sistema de ar comprimido ou outro gás conduzido através de tubos para a câmara superior do instrumento e transmitida deste espaço através das perfurações no suporte para o diafragma.

O esquema do sistema utilizado para medição de pressão balanceada é mostrado na Figura 19. Segundo Randolph (1990b), de forma inconveniente, o atraso inerente aos circuitos, a aderência do diafragma aos assentos, a não linearidade do sensor capacitivo, as propriedades físicas variáveis do diafragma sob pressão e temperatura e a deflexão permanente do mesmo nas pressões de pico de combustão causam incertezas na determinação do ponto de equilíbrio.

Figura 18 – Detalhes do indicador de pressão balanceada.



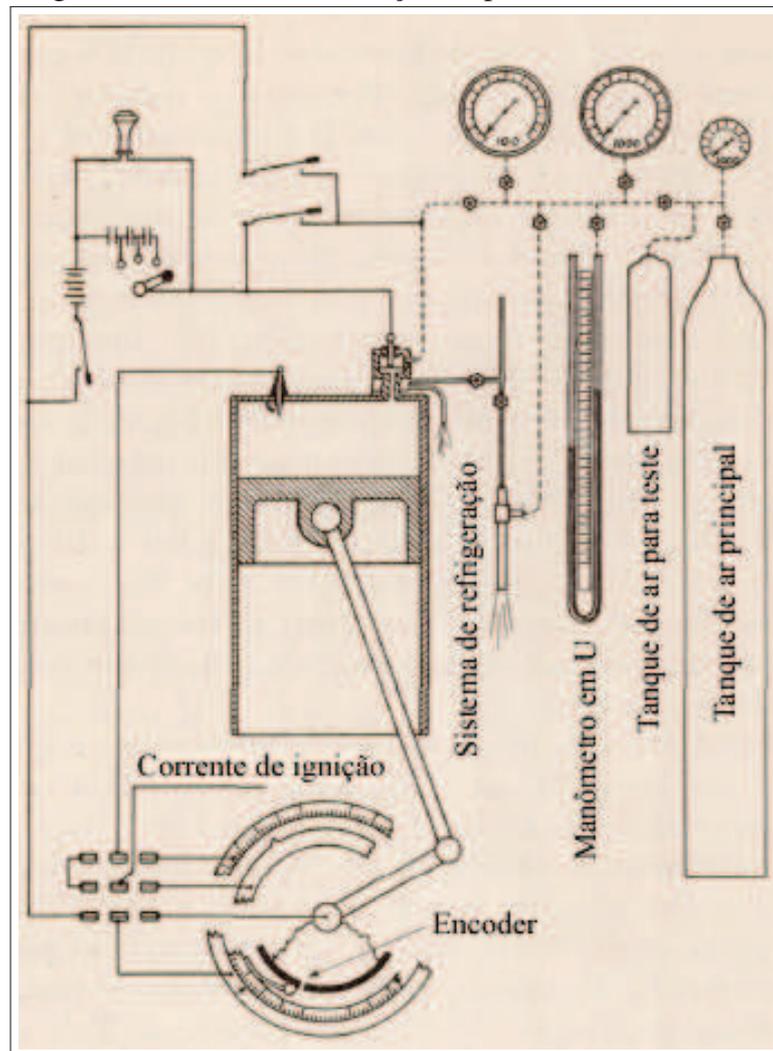
Fonte: (DICKINSON; NEWELL, 1921).

2.5.8 *Referência pela Lei dos Gases Ideais*

A pressão absoluta em um dado ponto do ciclo poderia ser calculada com a aplicação da Lei dos Gases Ideais se o volume do cilindro, a massa, o peso molecular e temperatura do conteúdo do cilindro fossem conhecidos.

Valores precisos para esses parâmetros exigem o conhecimento da concentração e de propriedades físicas dos resíduos no cilindro, bem como as características de transferência de calor da câmara de combustão. Devido a esse requisito, os erros no uso dessa técnica podem ser significativos.

Figura 19 – Sistema de medição de pressão diferencial.



Fonte: (DICKINSON; NEWELL, 1921).

2.5.9 Referência pela contrapressão de escape

Esta é uma variante simplificada do método da seção 2.5.2, mas utiliza como referência o valor de medição em um único ponto ao invés da média de várias medições ao longo do curso de escape. Contar com uma medição pontual na fase de escape em torno do PMS é especialmente propenso a erros devido às pulsações de pressão geradas pela descarga em todas as condições de queima. Então, torna-se fácil concluir que o método da seção 2.5.2 deve produzir resultados mais precisos.

Dos nove métodos descritos, os métodos de (1) a (4) requerem apenas um transdutor de pressão, enquanto os métodos (5) e (6) requerem dois, o método (7) requer a instalação de um transdutor de pressão balanceada e os métodos (8) e (9) são obviamente muito passíveis a erros, segundo Randolph (1990b).

Da revisão bibliográfica realizada, percebe-se que cada método produz resultados diferentes. E nesse contexto, este estudo objetiva fazer uma análise mais detalhada e comparativa da aplicação de cinco dos nove métodos citados, excluindo o método que utiliza um transdutor de pressão diferencial por ser um sistema em desuso, o método que se utiliza de um dispositivo de comutação por também estar em desuso devido ao tempo de resposta do mecanismo de comutação, o método de referencial pela contrapressão de escape se utilizando de apenas um ponto, por ser notadamente mais impreciso que o método que utiliza a média de vários pontos ao longo da fase de escape, e o método baseado na lei dos gases ideais por ser muito propício a erros devido às idealizações, segundo Randolph (1990b).

A comparação foi realizada levando em consideração a variabilidade que cada método introduz nos valores de PME e de liberação de energia (Q) devido à sua aplicação. Essa variabilidade foi estimada por uma abordagem estatística dos dados experimentais, juntamente com uma abordagem numérica para determinação da precisão dos resultados obtidos com a aplicação de cada um dos métodos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Materiais

Nesta seção estão apresentadas as especificações técnicas dos principais materiais utilizados nos experimentos realizados. Informações mais completas e detalhadas podem ser encontradas nos manuais e/ou *DataSheet* do material.

Na Tabela 1, têm-se as principais especificações técnicas do motor diesel de seis cilindros, com partida direta, turbo alimentado, fabricado pela MWM do Brasil, que foi utilizado nos experimentos.

Tabela 1 – Informações técnicas do motor

Característica	Especificação
Marca - Série - Nº de cilindros	MWM - 229 - 6
Cilindrada	5,88 l
Potência máxima	120 cv (88kW) a 2000 rpm
Torque máximo	331 Nm a 2000 rpm
Entrada de ar	Turbo alimentado

Fonte: (MWM, 2005).

Na Tabela 2, têm-se as especificações técnicas dos dois transdutores de pressão piezoelétricos, retiradas dos seus respectivos *DataSheets*. Observa-se que a linearidade dos transdutores é fornecida em um percentual relativo ao Fundo de Escala (FE) do transdutor. Destaca-se, ainda, que o transdutor de modelo 6054BR, que é o transdutor utilizado na parede do cilindro, apresenta uma maior variação em sua indicação com a influência de choques térmicos, em comparação ao transdutor de modelo 7061B, utilizado no cabeçote do motor.

Na Tabela 3, têm-se as principais propriedades dos dois transdutores de pressão absoluta, utilizados para medição da pressão no coletor de admissão e no cárter (o transdutor de modelo 4005BA10F) e no coletor de escape (o transdutor de modelo PX01C1-050A).

Na Tabela 4, têm-se as principais informações do transdutor de posição angular, utilizado para controlar a aquisição de dados.

A amostragem do sinal, realizada pelo sistema de aquisição de dados NI SCXI-1600, é sincronizada com o sinal pulso transmitido pelo transdutor de posição angular, que envia um pulso a cada $0,1^\circ$. Então para cada ciclo avaliado, que corresponde a duas voltas de manivela, são registrados 7200 valores de informação para cada transdutor monitorado nos procedimentos experimentais.

Tabela 2 – Informações técnicas dos transdutores piezoelétricos

Característica	Especificação	
	Modelo 7061B	Modelo 6054BR
Faixa de medição (bar)	0 - 250	0 - 250
Sensibilidade (pC/bar)	-80,49	-13,78
Frequência natural (kHz)	≈ 45	≈ 150
Linearidade (%FE)	≤ ±0,5	≤ ±0,3
Temperatura de operação (°C)	-20 - 350	-20 - 350
Varição de sensibilidade		
(Com refrigeração: 50 ± 35°C) (%)	≤ ±0,5	≤ ±0,5
(Sem refrigeração: 23 – 350°C) (%)	≤ ±2,0	≤ ±1,5
Choque térmico a (15001 rpm) e $p_{me} = 9$ bar		
Δp (variações curtas) (%)	≤ ±0,1	≤ ±0,5
Δp_{me} (%)	≤ ±0,5	≤ ±2,0
Δp_{max} (%)	≤ ±0,5	≤ ±1,0

Fonte: (KISTLER, 2010b).

Tabela 3 – Informações dos transdutores de pressão absoluta

Característica	Especificação	
	Modelo 4005BA10F	Modelo PX01C1-050A
Faixa de medição (bar)	0 - 10	0 - 3,4
Sensibilidade (V/bar)	1	1,47
Linearidade (%FE)	±0,3	±0,05
Temperatura de operação (°C)	-40 - 125	-46 - 121

Fonte: (KISTLER, 2005; OMEGA, 2018).

Tabela 4 – Informações do transdutor angular
(modelo 2614A4 da Kistler)

Característica	Especificação
Sinal de ângulo (°)	720x0,5
Resolução (°)	3 600x0,1
Precisão dinâmica a 10 000 1 / min (°)	0,02
Temperatura de operação (°C)	-30 - 100

Fonte: (KISTLER, 2010a).

3.2 O aparato experimental

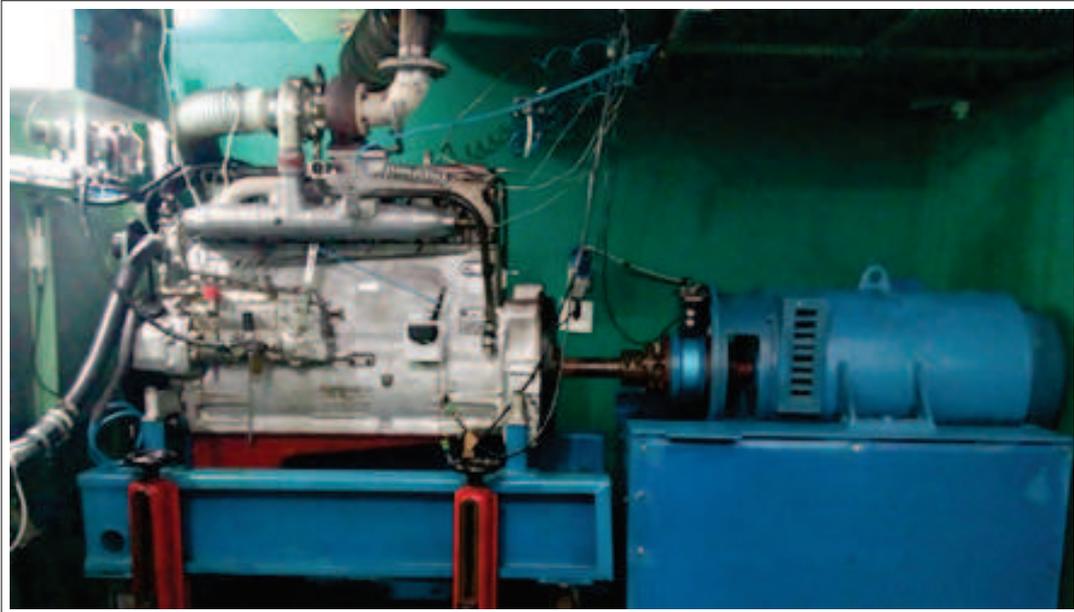
Os experimentos foram realizados no Laboratório de Motores de Combustão Interna (LMCI) utilizando uma bancada de teste dinamométrica, apresentada na Figura 20, equipada com um motor diesel de seis cilindros MWM TD-229-6, com injeção direta e turbo alimentado.

A bancada de ensaios, bem como o motor, é controlada por uma interface de usuário desenvolvida em LabView, mostrada na Figura 21, que se comunica com um módulo de aquisição de dados NI SCXI-1600, que por sua vez realiza a aquisição dos sinais de todos os instrumentos utilizados nos experimentos.

Por meio dessa interface, realiza-se o monitoramento e controle das condições de

funcionamento do motor, bem como realiza-se o controle de aquisição e registro de dados experimentais, para posterior tratamento.

Figura 20 – Bancada de teste do motor.

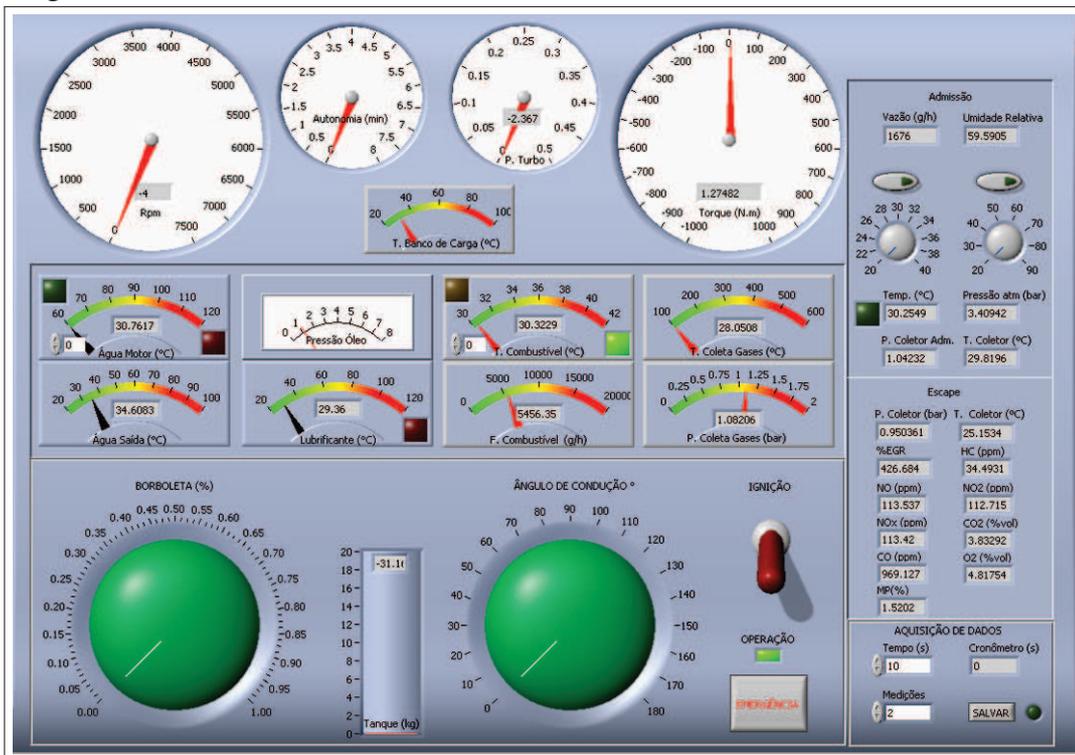


Fonte: o autor.

Na Figura 22, tem-se de forma esquemática as ligações e interações dos componentes do sistema de medição. Nela, têm-se indicados no motor os cinco pontos de medição de pressão, que foram utilizados de forma específica dependendo do método avaliado. A medição de pressão foi realizada de forma sincronizada com o sinal do transdutor de deslocamento angular, mostrado no esquema. Os sinais de resposta dos transdutores piezoelétricos foram submetidos a um circuito de amplificação que também funciona como filtro analógico passa-baixas. Os sinais de todos os instrumentos foram coletados por um sistema de aquisição de dados, que os transmite ao computador, que por sua vez registra todos os dados experimentais.

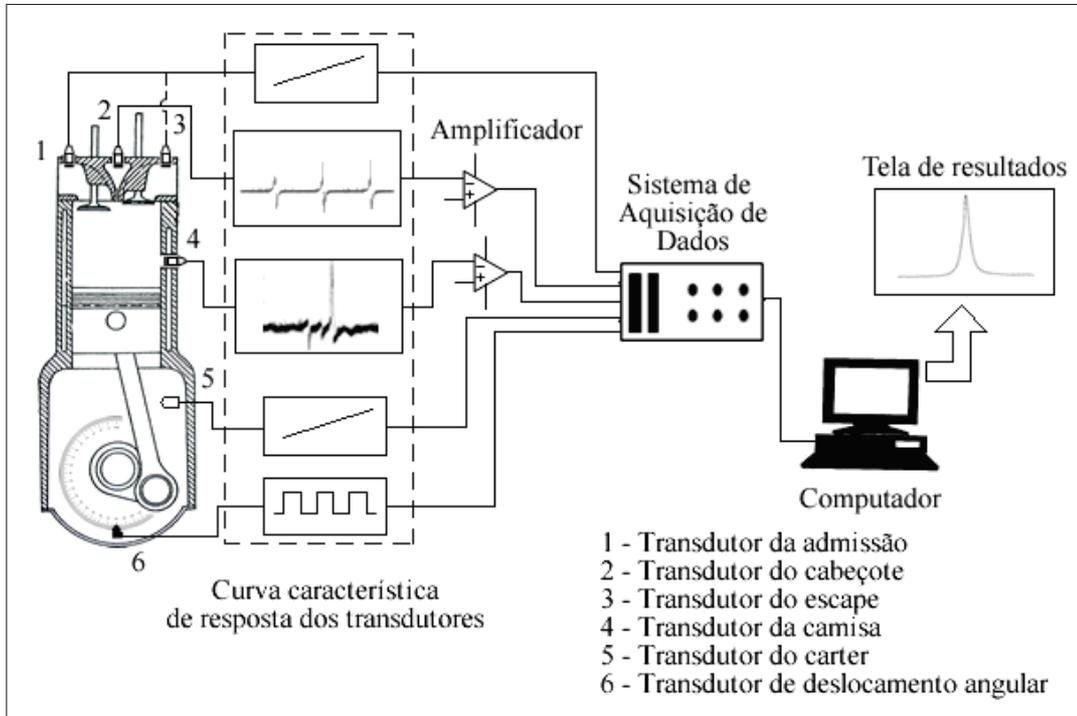
O sinal de pressão foi gerado por um transdutor piezoelétrico da Kistler, modelo 7061B, instalado na posição 1 (esquemático na Figura 22), um transdutor piezoelétrico, também da Kistler, modelo 6054BR, instalado na posição 4. A medição de pressão nas posições 1 e 5 foram realizadas por um transdutor piezoresistivo da Kistler, modelo 4005BA10F. Para medição da pressão na posição 3, utilizou-se um transdutor de pressão absoluta da Omega, modelo PX01C1-050A. A rotação do eixo do motor foi medida com um transdutor de posição angular (sensor de rotação na posição 6), modelo 2614A4, também da Kistler.

Figura 21 – Interface de controle da bancada de ensaio.



Fonte: o autor.

Figura 22 – Esquema do sistema de medição.



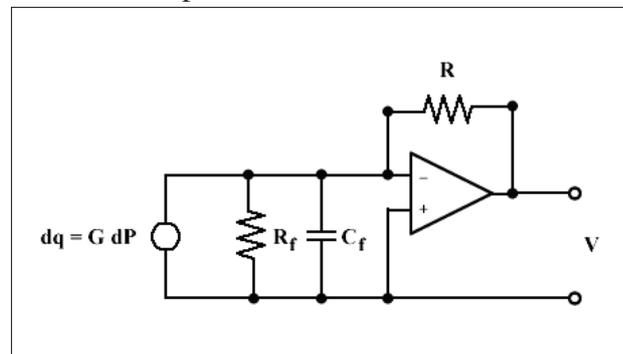
Fonte: o autor.

3.3 Procedimentos

Nos experimentos, para cada ensaio, foram registrados os dados referentes a 100 ciclos consecutivos, totalizando uma amostra de 720.000 dados por ensaio, sendo realizado pelo menos um ensaio para cada um dos métodos avaliados.

Os dados registrados pelo sistema de aquisição de dados são a variação de tensão (dV) e os pulsos do transdutor de posição angular ($d\theta$). A variação de tensão é gerada no módulo transdutor/amplificador, que neste trabalho foi executado seguindo o exemplo mostrado na Figura 12, com algumas modificações, como mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Esquema do sistema transdutor/amplificador utilizado.



Fonte: o autor.

Aqui a Equação 2.1 pode ser escrita de uma forma mais conveniente para os objetivos do trabalho como:

$$idt = dq = GdP \quad (3.1)$$

Onde dq é a variação de carga proporcional à variação de pressão (dP) na face do transdutor. A constante de proporcionalidade (G) é o ganho do transdutor.

Com as modificações do módulo transdutor/amplificador, como mostradas na Figura 23, a derivada da pressão (dP) pode ser expressa, convenientemente, em função da derivada do ângulo de manivela ($d\theta$) por:

$$\frac{dP}{d\theta} = \frac{V}{G\omega R} \quad (3.2)$$

Onde V é a tensão de saída do transdutor/amplificador, que surge da definição: $V = iR$, sendo R a resistência. A velocidade angular ω é obtida da relação: $d\theta = \omega dt$.

Em alguns métodos, como os métodos que se baseiam em coeficientes politrópicos, é necessário conhecer o volume do fluido no cilindro. Segundo (HEYWOOD, 1988), esse volume

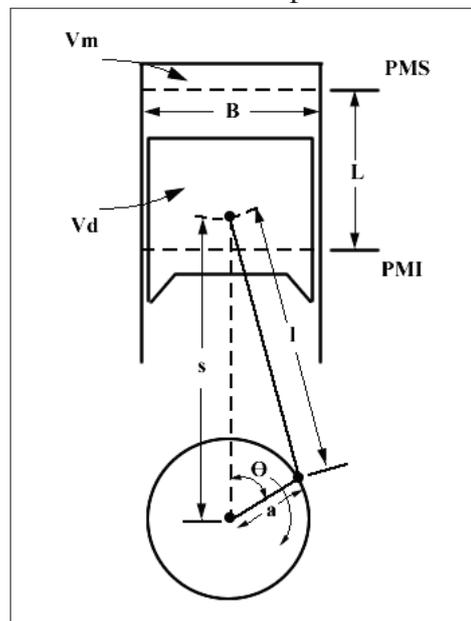
também pode ser expresso em função do ângulo de manivela como segue:

$$V_{\theta} = V_m + \frac{\pi B^2}{4}(l + a - s) \quad (3.3)$$

$$s = a \cdot \cos(\theta) + [l^2 - a^2 \cdot \sin^2(\theta)]^{1/2} \quad (3.4)$$

Onde os parâmetros a , B , l e s são identificados na Figura 24.

Figura 24 – Geometria do conjunto cilindro/pistão.



Fonte: (HEYWOOD, 1988).

Ainda da Figura 23, destaca-se que o circuito com o capacitor funciona, basicamente, como um filtro passa-baixa com uma frequência de corte, conforme Pertence (1988), expressa por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.5)$$

Utilizou-se esse circuito com o objetivo de reduzir os efeitos de ruídos elétricos no sinal do transdutor, como recomendado por Pertence (1988), que também orienta que a frequência de corte (f_c) deve ser por volta de dez vezes a frequência (f) do sinal de interesse, obtida a partir de:

$$f = 2\pi\omega \quad (3.6)$$

Com ω sendo expressa em rotações por segundo.

O dimensionamento adequado do circuito de amplificador e filtro irá contribuir de forma significativa para uma boa relação sinal/ruído e melhorar a precisão dos resultados obtidos com as medições realizadas.

Para Albertazzi e Sousa (2018), a precisão exprime a intensidade com que agem os erros aleatórios em repetidas medições do mesmo mensurando. Com o objetivo de se avaliar a precisão de cada um dos sete métodos *pegging*, neste trabalho foi realizada uma avaliação da precisão de cada método por meio de uma simulação numérica do efeito de cada uma das fontes de erro que pode influenciar de forma significativa os resultados obtidos com a aplicação do respectivo método. Para essa simulação numérica foi aplicado o método de Monte Carlo, como descrito em Albertazzi e Sousa (2018).

Finalmente, por meio de uma avaliação da exatidão e comparação da influência do método nos resultados de parâmetros dependentes, pode-se concluir qual o melhor. E por meio da avaliação da precisão, pode-se identificar limitações e melhorias na aplicação de cada um.

Para a determinação da pressão no cilindro de combustão, foram utilizados os valores de pressão obtidos com o transdutor piezoelétrico montado no cabeçote do motor, que monitora essa pressão durante todo o processo de combustão. Esses valores foram corrigidos com base em uma pressão de referência. Os valores para essa pressão de referência são determinados com base em medições realizadas em pontos predeterminados estrategicamente, conforme o método específico para os objetivos da medição. Neste trabalho foram analisados os seguintes métodos utilizados para a determinação de uma pressão de referência:

1. Referência pelo coletor de admissão.
2. Referência pelo coletor de escape.
3. Referência por coeficientes politrópicos constantes.
4. Referência por coeficientes politrópicos variáveis.

Todos esses métodos foram aplicados em três regimes de funcionamento do motor, sendo em 100% de carga, 66% e 33%, com o objetivo de se avaliar a influência do nível de carga aplicada no motor.

A precisão e exatidão desses quatro métodos foram avaliadas por comparação com um quinto método, assumido como padrão de referência, por se basear apenas em medições reais da pressão, diferentemente dos demais, que se fundamentam em suposições e idealizações que podem se distanciar um pouco da realidade. O método utilizado como padrão é o de **Referência pela pressão intra-ciclo com o transdutor instalado na parede do cilindro.**

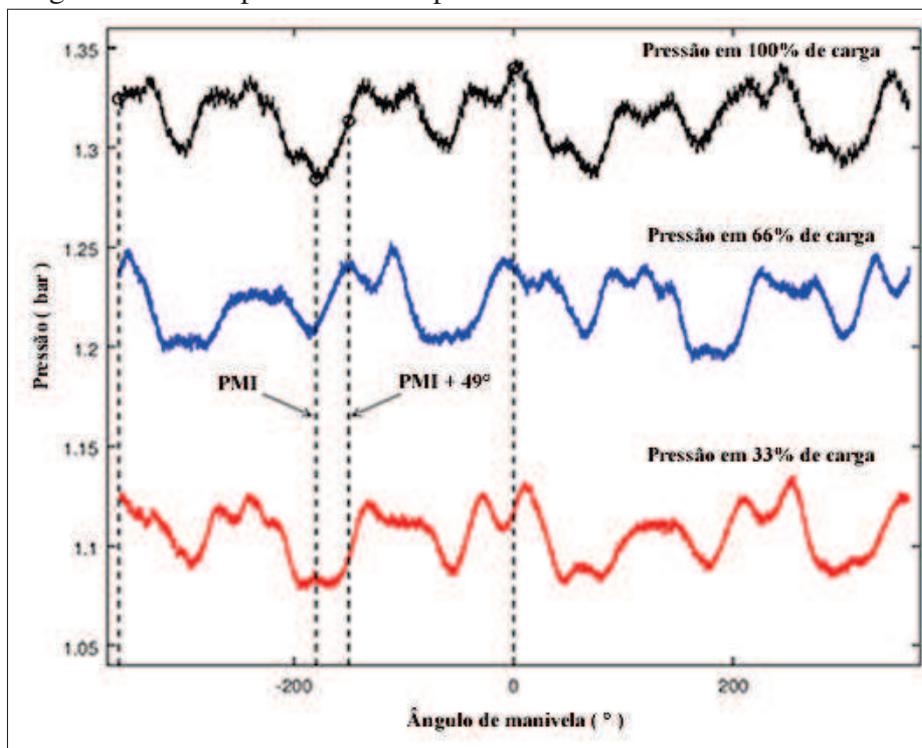
4 RESULTADOS

4.1 Referência pelo coletor de admissão (MTD-1)

Na Figura 25, tem-se o comportamento da pressão no coletor de admissão durante o processo de combustão, nos três regimes de carga ensaiados. Percebem-se oscilações significativas nos valores de pressão ao longo do processo. Essas oscilações são devidas ao sistema turbo-compressor e principalmente ao valvulamento do motor, como esquematizado na Figura 3, para os seus seis cilindros.

Na Figura 25, destaca-se o intervalo contendo os pontos a partir do PMI (-180°) até o ponto de PMI+ 49° (-131°), representando o intervalo a partir do momento em que o pistão passa pelo PMI, iniciando seu movimento de subida, até o momento em que a válvula de admissão é fechada. É recomendado que os pontos utilizados para a pressão de referência estejam nesse intervalo. Nesse intervalo são registrados 490 pontos de medição. Na Tabela 5, tem-se o resumo dessas informações para os três regimes de carga.

Figura 25 – Comportamento da pressão na admissão.



Fonte: O autor.

Na Tabela 5, são apresentados os valores máximos de pressão (P_{max}), os valores mínimos (P_{min}), a variação máxima ($\Delta P_{max-min}$), bem como a pressão média e o desvio-padrão

dos valores utilizados para o cálculo da média. Destaca-se que a variabilidade dos valores, tendo como base o desvio-padrão, é relativamente pequena devido à quantidade de pontos utilizados para os cálculos, com pontos em torno do centro do intervalo.

Tabela 5 – Pressão de correção - MTD-1

Carga	Pressão (bar) - No intervalo: -180° a -131°				
	P_{max}	P_{min}	$\Delta P_{max-min}$	Media	Des. Pad.
100%	1,2929	1,2874	0,0055	1,2902	0,0012
66%	1,1673	1,1542	0,0132	1,1616	0,0035
33%	1,0752	1,0697	0,0055	1,0729	0,0011

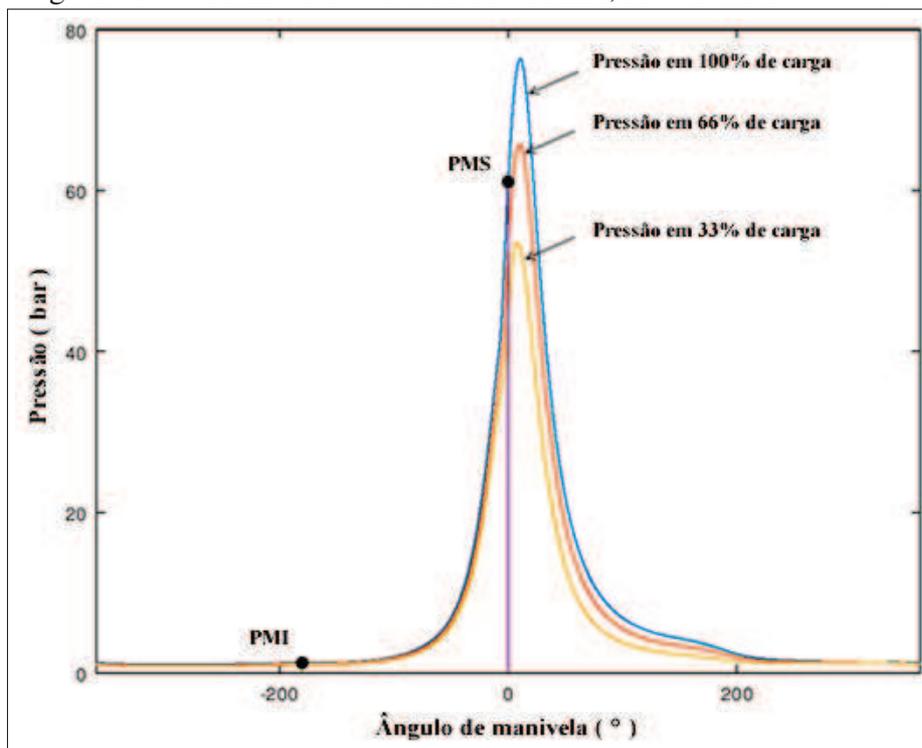
Fonte: O autor.

A pressão no cilindro de combustão pode ser determinada aplicando-se uma correção média de 1,2726 bar para o regime de 100% de carga, obtida a partir de:

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Pa_i - Pt_i) \quad (4.1)$$

Onde Pa é a pressão na admissão e Pt é a pressão medida no topo do cilindro. Na Figura 26, tem-se o resultado obtido para a pressão no cilindro de combustão nos três regimes de funcionamento.

Figura 26 – Pressão no cilindro de combustão, utilizando o MTD-1.

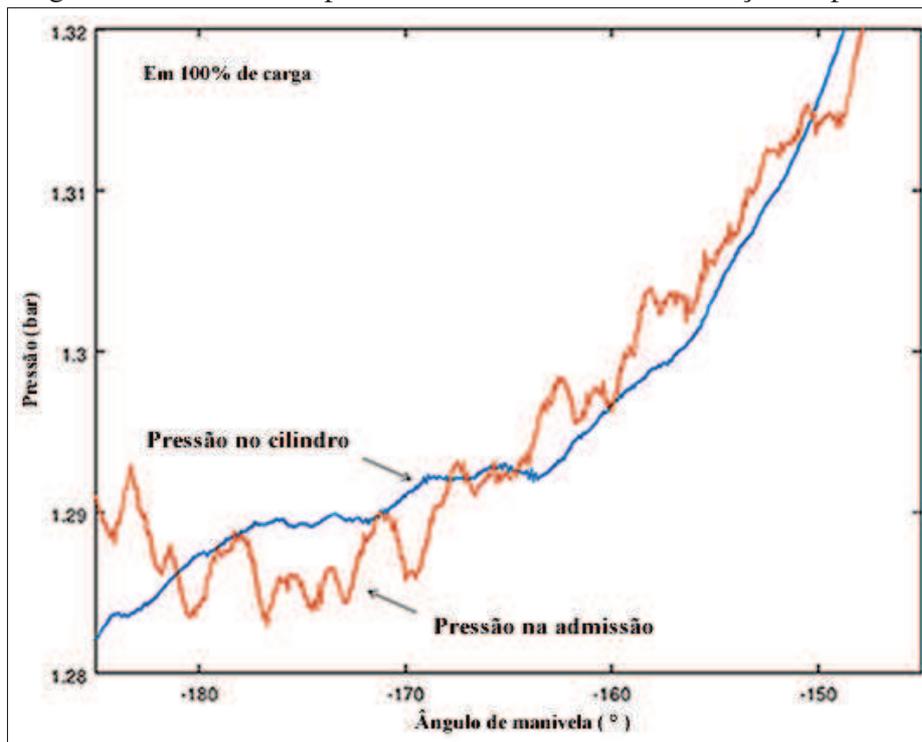


Fonte: O autor.

Na Figura 27, apresenta-se em detalhes o ajuste da curva de pressão medida pelo transdutor no topo do cilindro (instalado no cabeçote) pela curva de pressão na admissão, em um regime de 100% de carga. Por esses detalhes, percebe-se que as curvas se ajustam melhor na região próxima ao centro do intervalo. Esse mesmo comportamento é observado nos outros regimes de funcionamento a 66% e 33% de carga.

Calculando a média de três pontos, como recomendado por (RANDOLPH, 1990b), sendo um ponto um grau antes do PMI, um sobre o PMI e outro um grau depois, obtém-se uma correção de 1,2868 bar com um desvio-padrão de 0,0019 bar. Pegando três pontos, sendo um no meio do intervalo, outro um grau antes desse e o terceiro um grau depois, obtém-se uma correção de 1,2878 bar com um desvio-padrão de 0,0009 bar. O desvio-padrão indica que nessa região a incerteza da correção é menor, destacando-se que um comportamento similar é observado nos outros regimes de carga.

Figura 27 – Referência pelo coletor de admissão - Correção da pressão.



Fonte: O autor.

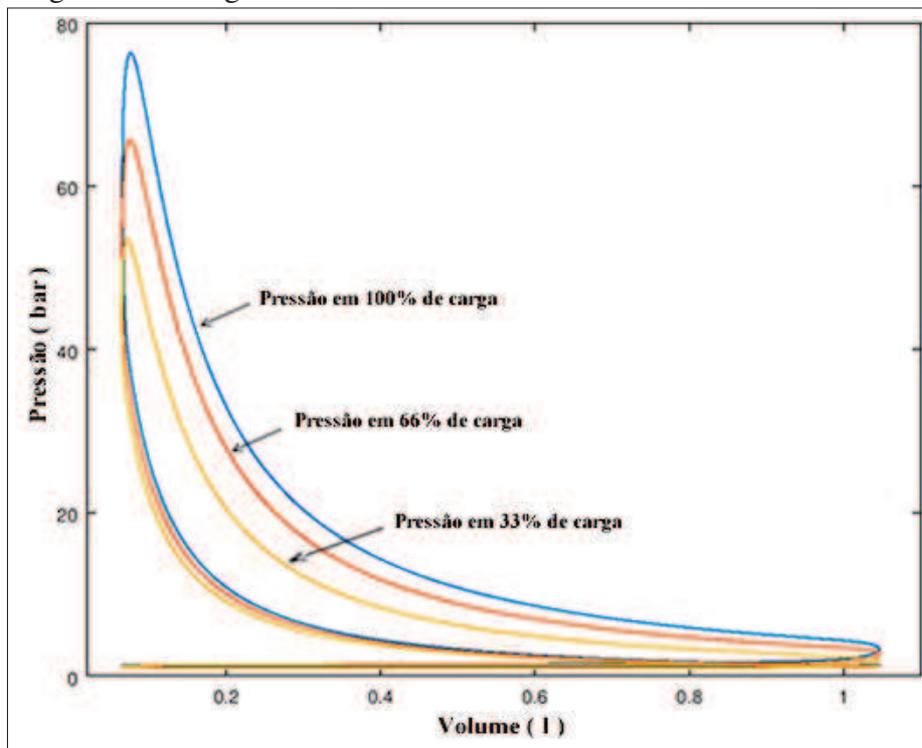
O diagrama de pressão versus volume para esses dados está representado na Figura 28. A partir dos valores de pressão e volume desse diagrama, é possível se calcular a PME, por umas das equações sugeridas por (BRUNT; EMTAGE, 1996):

$$PME = \frac{1}{2 \cdot V_d} \sum_{i=1}^{n2} [(P_i + P_{i+1}) \cdot (V_{i+1} - V_i)] \quad (4.2)$$

Onde n_1 e n_2 correspondem a um ponto no momento em que a válvula de admissão fecha ($49^\circ 40'$ depois do PMI) na fase de compressão e a um ponto no momento em que a válvula de escape abre ($49^\circ 40'$ antes do PMI) na fase de combustão, respectivamente.

Calculando-se a PME com base nos valores de pressão ajustados pelos três pontos, como recomendado por (RANDOLPH, 1990b), obtém-se um valor de 10,8440 bar, para o regime em 100% de carga, 8,5431 bar e 5,3570 bar para os regimes de 66% e 33% de carga, respectivamente, sendo que não houve variação perceptível na PME, devido ao desvio-padrão (de 0,0019 bar) dos valores de pressão utilizados na correção em 100% de carga. Destaca-se, ainda, que uma variação de 0,0132 bar, como a maior variação encontrada na pressão de referência da Tabela 5, também não é perceptível no cálculo da PME. Isso se deve ao fato de a PME abordar o trabalho ao longo do ciclo, que corresponde à soma dos trabalhos nas fases de compressão a partir do ponto em que a válvula de admissão é fechada e de combustão até o ponto onde a válvula de escape é aberta, que possuem sinais contrários, o que faz a variação em uma fase ser compensada por variações, de mesma magnitude, na outra.

Figura 28 – Diagrama PxV.

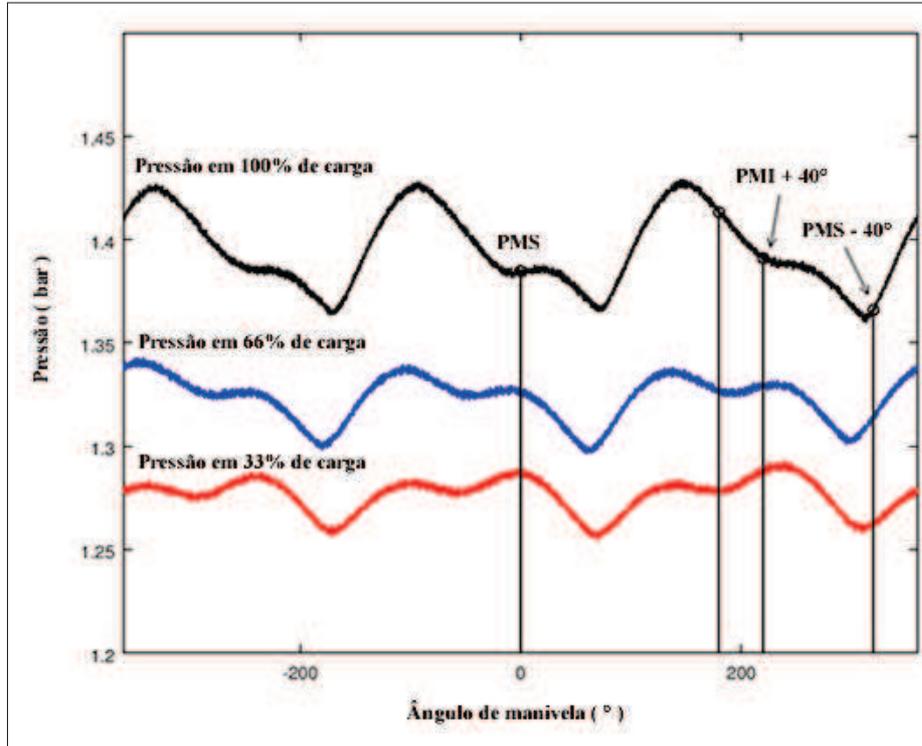


Fonte: O autor.

4.2 Referência pelo coletor de escape (MTD-2)

O comportamento da pressão no coletor de escape durante a combustão é apresentado na Figura 29, onde notam-se oscilações significativas durante o ciclo.

Figura 29 – Comportamento da pressão na admissão.



Fonte: O autor.

Destaca-se na Figura 29 o intervalo entre 40° após o PMI e 40° antes do PMS na fase de exaustão, que é o intervalo com os valores para determinação de uma pressão média a ser utilizada como referência para correção da pressão no cilindro, conforme recomendado (RANDOLPH, 1990b).

Na Tabela 6, tem-se o resumo das informações processadas para os pontos no intervalo de 40° após o PMI e 40° antes do PMS.

Tabela 6 – Pressão de correção - MTD-2

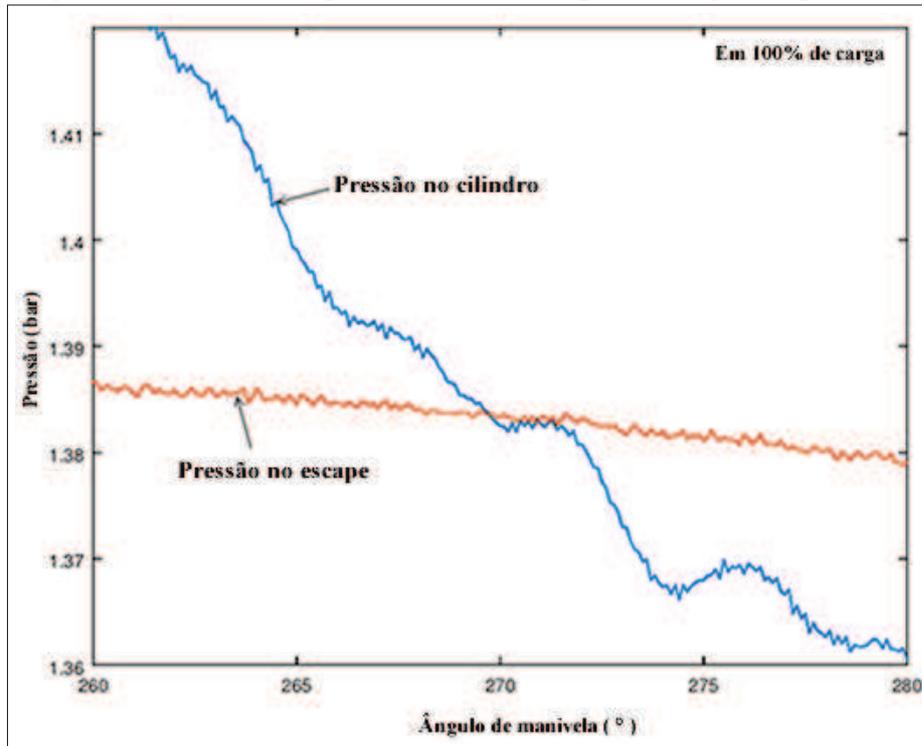
Carga	Pressão (bar) - No intervalo: 220° a 320°				
	P_{max}	P_{min}	$\Delta P_{max-min}$	Media	Des. Pad.
100%	1,2352	1,2051	0,0301	1,2197	0,0081
66%	0,9956	0,9779	0,0176	0,9884	0,0060
33%	0,9883	0,9680	0,0203	0,9768	0,0056

Fonte: O autor.

Os dados da Tabela 6 foram obtidos a partir de 100 pontos, como recomendado por

Randolph (1990b), em torno do centro do intervalo de abertura da válvula de escape.

Figura 30 – Referência pelo coletor de escape - Correção da pressão.



Fonte: O autor.

Nota-se que as variações observadas nas Tabelas 5 e 6 não apresentam grandes diferenças, com isso, evidencia-se que para esse sistema não há entre esses métodos a superioridade de um em relação a outro, em termos de precisão.

O gráfico de $P \times \theta$ e o diagrama de $P \times V$ para esses dados são semelhantes aos mostrados anteriormente, portanto não serão mostrados aqui, mas na Figura 30, tem-se o detalhe do ajuste da curva de pressão obtida com o transdutor no cabeçote pela curva de pressão do coletor de escape. Nota-se nessa figura que a qualidade do ajuste é inferior ao ajuste das curvas de referência pela admissão.

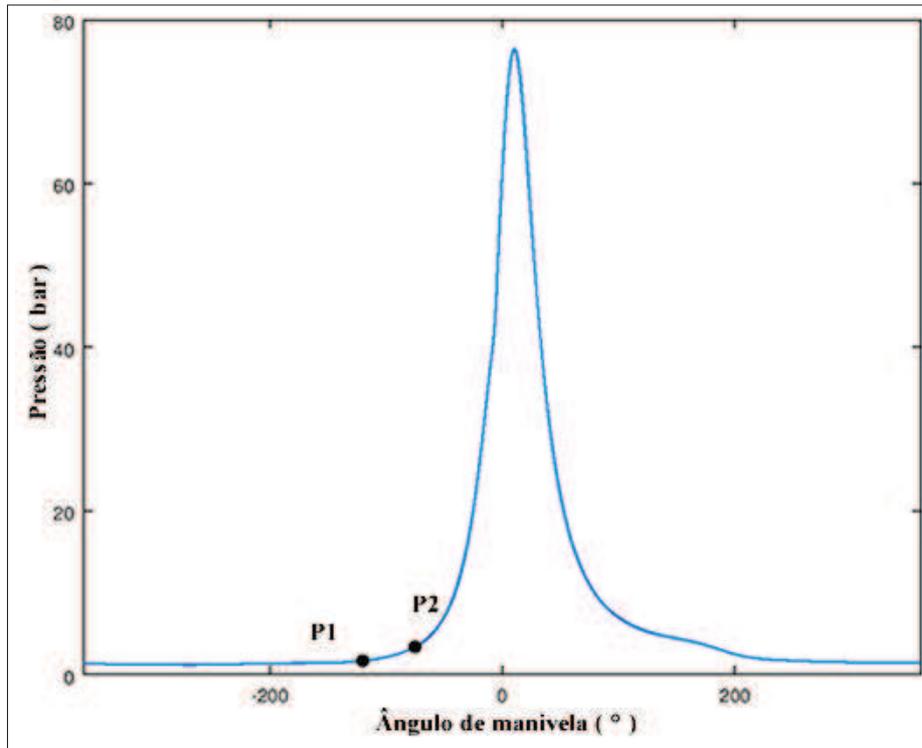
4.3 Referência por coeficientes politrópicos constantes (MTD-3)

Aplicando a Equação 2.10 para pontos localizados no intervalo de 120° e 70° antes do PMS conforme Brunt e Pond (1997) para reduzir os efeitos de ruídos e utilizando um coeficiente politrópico de 1,30, como recomendado por Heywood (1988), obtém-se o gráfico de $P \times \theta$, mostrado na Figura 31, onde são destacados os extremos do intervalo $P1$ e $P2$.

Os valores de pressão para correção obtidos com a aplicação da Equação 2.10 para

uma quantidade de 100 pontos no referido intervalo são resumidos na Tabela 7.

Figura 31 – Pressão no cilindro de combustão, utilizando o MTD-3.



Fonte: O autor.

Tabela 7 – Pressão de correção - MTD-3

Carga	Pressão (bar) - No intervalo: -100° a -70°				
	P_{max}	P_{min}	$\Delta P_{max-min}$	Média	Des. Pad.
100%	1,4438	1,2634	0,1804	1,3587	0,0529
66%	1,2655	1,0958	0,1697	1,1856	0,0499
33%	1,2040	1,0488	0,1552	1,1319	0,0456

Fonte: O autor.

Nota-se que os valores de pressão de correção possuem uma diferença considerável em relação aos outros dois métodos anteriores, bem como os valores de desvio-padrão. Segundo Randolph (1990b), Brunt e Emtage (1996), isso se deve principalmente à idealização de processo politrópico na fase de compressão.

4.4 Referência por coeficientes politrópicos variáveis (MTD-4)

Determinando os coeficientes politrópicos a serem utilizados na aplicação deste método com a Equação 2.14 e em seguida determinando a pressão de correção pela Equação 2.10, para o mesmo intervalo utilizado no método anterior, obtém-se um gráfico, não apresentado

aqui, semelhante ao mostrado na Figura 31. Os resultados obtidos para a pressão de correção são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Pressão de correção - MTD-4

Carga	Pressão (bar) - No intervalo: -100° a -70°				
	P_{max}	P_{min}	$\Delta P_{max-min}$	Media	Des. Pad.
100%	1,1306	0,9502	0,1804	1,0455	0,0528
66%	0,7186	0,5489	0,1697	0,6387	0,0499
33%	0,7006	0,5455	0,1552	0,6286	0,0456

Fonte: O autor.

Nota-se pelos valores da Tabela 8 a diferença significativa deste método em relação ao método de referência por coeficientes politrópicos constantes na magnitude das pressões de correção. As variações são bastante semelhantes, tanto que tomando como base esses parâmetros não se pode concluir que um método é melhor que outro.

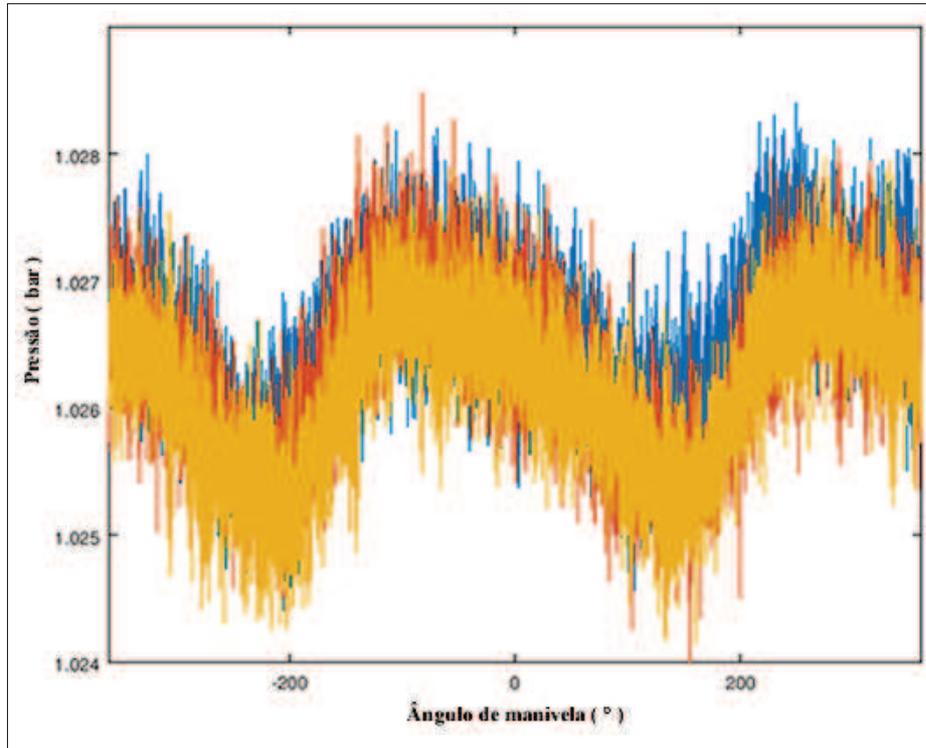
Sun *et al.* (2017) analisaram outros métodos de referência por coeficientes politrópicos variáveis calculados a partir de dados experimentais e propuseram, em seu trabalho, algumas melhorias na utilização desses métodos, mas as variações observadas na pressão de correção ainda são da ordem das observadas aqui. Segundo Randolph (1990b), essa imprecisão se deve à consideração da fase de compressão como um processo politrópico, enquanto o processo real não o é.

4.5 Referência pela pressão intra-ciclo com o transdutor instalado na parede do cilindro (MTD-5)

Nesse método, como relatado por Randolph (1990b), são utilizados dois transdutores de pressão, um transdutor piezoelétrico instalado no cabeçote do motor e um transdutor piezoresistivo instalado na parede do cilindro. Randolph (1990b), Davis e Patterson (2006) relataram que a desvantagem desse método se deve às variações na pressão do cárter. Essas oscilações podem ser atribuídas principalmente às oscilações causadas pelo movimento dos pistões e às vibrações impostas ao cilindro de combustão provenientes da dinâmica do pistão.

Como melhorias propostas neste trabalho, são utilizados três transdutores de pressão, um piezoelétrico instalado no cabeçote do motor, como todos os outros métodos, outro transdutor piezoelétrico instalado na parede do cilindro, que em parte do ciclo mede a pressão no cilindro e em outra parte mede a pressão no cárter, onde se tem o terceiro transdutor, de pressão absoluta, que monitora a pressão do cárter durante todo o ciclo.

Figura 32 – Pressão no cárter.



Fonte: O autor.

Na Figura 32, tem-se o comportamento da pressão no cárter durante os três regimes de funcionamento ensaiados. Nota-se que não há diferença entre as pressões nos três regimes, diferentemente do comportamento das pressões na admissão e no escape.

Tabela 9 – Comparação entre as pressões (em bar) na admissão, no escape e no cárter.

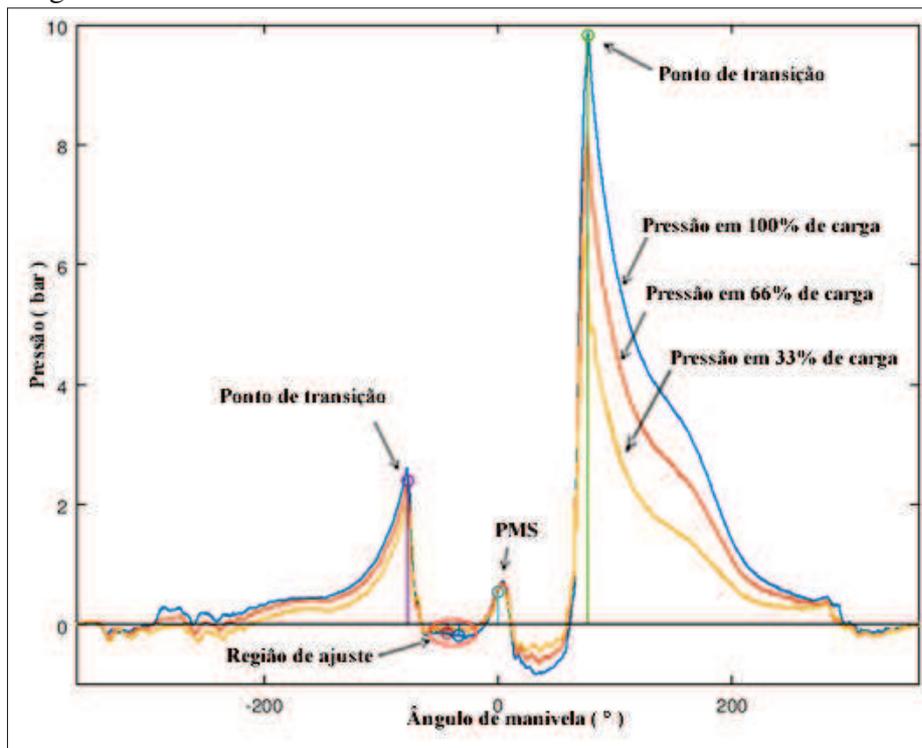
Carga	Pressão na admissão		Pressão no escape		Pressão no cárter	
	Media	Des. Pad.	Media	Des. Pad.	Media	Des. Pad.
100%	1,3067	0,0051	1,3834	0,0011	1,0268	0,0005
66%	1,2380	0,0026	1,3173	0,0017	1,0268	0,0003
33%	1,0877	0,0035	1,2801	0,0016	1,0267	0,0004

Fonte: O autor.

Pelos dados da Tabela 9, percebe-se que a pressão no cárter é a mais estável das três que foram comparadas, de onde se pode concluir que essa seria a melhor referência. Esses dados representam o resumo das informações de 100 pontos selecionados estrategicamente em regiões equivalentes a um intervalo de 10 graus de manivela que proporcionam a menor variação para o respectivo método de referência. Para a admissão utilizou-se o intervalo de -160° a -150° , para o escape utilizou-se o intervalo de 265° a 275° e para o cárter utilizou-se o intervalo de $-55,0^{\circ}$ a $-45,0^{\circ}$.

A Figura 33 apresenta o resultado obtido para pressão intra-ciclo sem correção, apenas o perfil do comportamento da pressão no cilindro e no cárter durante o ensaio. Os pontos de transição indicam a posição onde o transdutor deixa de medir a pressão no cilindro e passa a medir a pressão no cárter ou vice-versa. O intervalo de -77° a 77° , entre os pontos de transição, representa o período em que o transdutor mede a pressão no cárter e no restante do ciclo é medida a pressão no cilindro.

Figura 33 – Pressão Intra-ciclo.



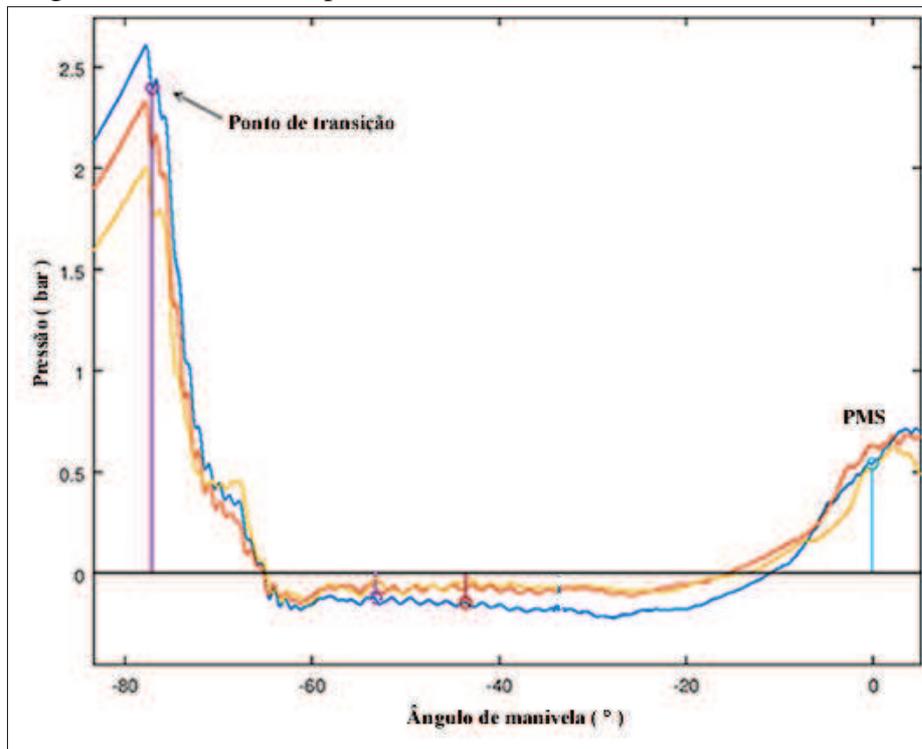
Fonte: O autor.

O intervalo de $-55,0^\circ$ a $-45,0^\circ$, utilizado para o ajuste da pressão do transdutor piezoelétrico da parede do cilindro pela pressão do transdutor de pressão absoluta instalado no cárter, foi escolhido por apresentar melhor estabilidade durante o período em que o transdutor da parede do cilindro está medindo a pressão no cárter, o que implica em uma menor variabilidade no dados de pressão.

Na Figura 34, tem-se em detalhes a região utilizada para o ajuste das pressões medidas com o transdutor na parede do cilindro pela pressão medida com o transdutor de pressão absoluta instalado no cárter.

Nota-se o padrão de oscilação da pressão na região destacada. Essa oscilação deve-se às vibrações do cilindro de combustão impostas pela dinâmica do movimento do pistão no interior do cilindro.

Figura 34 – Detalhe da pressão Intra-ciclo.



Fonte: O autor.

Na Tabela 10, tem-se o resumo das informações que caracterizam o comportamento da pressão medida pelo transdutor na parede do cilindro. Nota-se que o padrão de oscilação identificado na Figura 34 é transcrito em números com a observação que o desvio-padrão nos três regimes de operação do motor permanece com a mesma magnitude.

Tabela 10 – Pressão intra-ciclo sem correção

Carga	Pressão (bar) - No intervalo: $-55,0^\circ$ a $-45,0^\circ$				
	P_{max}	P_{min}	$\Delta P_{max-min}$	Media	Des. Pad.
100%	-0,1459	-0,1913	0,0454	-0,1713	0,0119
66%	-0,0574	-0,1037	0,0463	-0,0824	0,0118
33%	-0,0357	-0,0755	0,0398	-0,0621	0,0098

Fonte: O autor.

Tabela 11 – Pressão intra-ciclo filtrada e sem correção

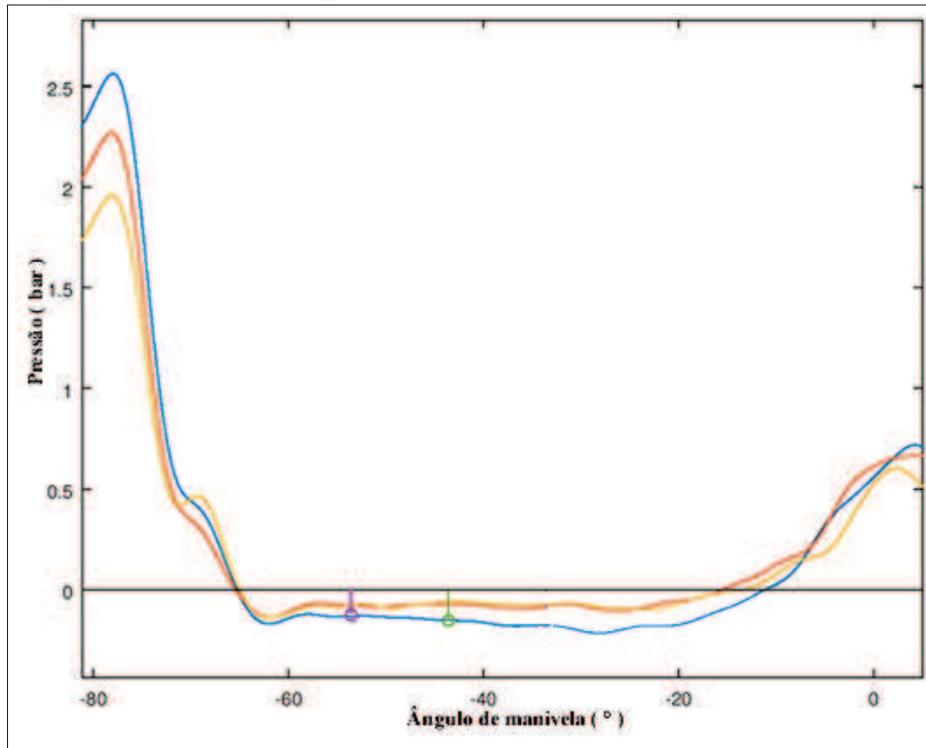
Carga	Pressão (bar) - No intervalo: $-55,0^\circ$ a $-45,0^\circ$				
	P_{max}	P_{main}	$\Delta P_{max-min}$	Media	Des. Pad.
100%	-0,1317	-0,1498	0,0181	-0,1379	0,0049
66%	-0,0726	-0,0849	0,0123	-0,0789	0,0043
33%	-0,0666	-0,0891	0,0206	-0,0792	0,0064

Fonte: O autor.

Na Tabela 11, tem-se a análise dos dados filtrados. Na Figura 35, tem-se o resultado

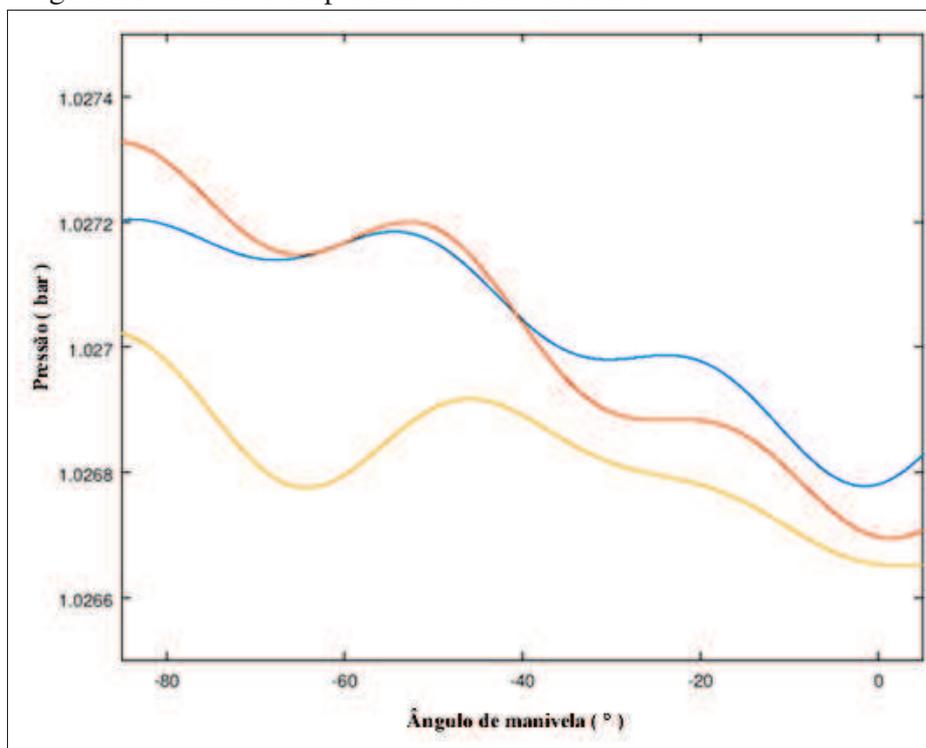
gráfico da aplicação de filtros digitais no sinal de pressão do transdutor da parede do cilindro.

Figura 35 – Detalhe da pressão Intra-ciclo filtrada.



Fonte: O autor.

Figura 36 – Detalhe da pressão filtrada no cárter.



Fonte: O autor.

Na Figura 36, tem-se em detalhes os dados filtrados da pressão no cárter. Na Tabela 12, tem-se a análise desses dados no intervalo de -55° e -45° , de onde conclui-se que a pressão no cárter pode ser considerada constante, pois a variação observada é insignificante.

Com os dados de pressão no cárter, pode-se corrigir a pressão intra-ciclo para ajustar a pressão medida pelo transdutor da parede do cilindro pela pressão medida com o transdutor no cárter. Os valores obtidos com essa correção são apresentados na Tabela 13.

Tabela 12 – Pressão no cárter filtrada

Carga	Pressão (bar) - No intervalo: $-55,0^{\circ}$ a $-45,0^{\circ}$				
	P_{max}	P_{min}	$\Delta P_{max-min}$	Media	Des. Pad.
100%	1,0272	1,0271	0,0001	1,0272	0,00002
66%	1,0272	1,0271	0,0001	1,0272	0,00002
33%	1,0269	1,0269	0,0000	1,0269	0,00002

Fonte: O autor.

Tabela 13 – Correção da pressão intra-ciclo filtrada

Carga	Pressão (bar) - No intervalo: $-55,0^{\circ}$ a $-45,0^{\circ}$				
	P_{max}	P_{min}	$\Delta P_{max-min}$	Media	Des. Pad.
100%	1,1769	1,1589	0,0180	1,1651	0,0049
66%	1,1121	1,0998	0,0123	1,1061	0,0043
33%	1,1161	1,0935	0,0226	1,1061	0,0064

Fonte: O autor.

Os valores de pressão medidos pelo transdutor de pressão na parede do cilindro, já filtrados e corrigidos, são utilizados para corrigir os valores medidos pelo transdutor instalado no cabeçote do motor. Esses valores são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Correção da pressão no cilindro

Carga	Pressão (bar) - No intervalo: $-170,0^{\circ}$ a $-160,0^{\circ}$				
	P_{max}	P_{min}	$\Delta P_{max-min}$	Media	Des. Pad.
100%	1,5313	1,5242	0,0071	1,5275	0,0021
66%	1,4519	1,4402	0,0117	1,4448	0,0038
33%	1,3433	1,3287	0,0146	1,3365	0,0044

Fonte: O autor.

As variações nos valores de pressão apresentados na Tabela 14, por meio do desvio-padrão, referem-se apenas às variações no ajuste da curva de pressão medida pelo transdutor na parede do cilindro e a curva de pressão medida pelo transdutor no cabeçote do motor. Essas variações não levam em conta as variações anteriores do ajuste das curvas de pressão do transdutor na parede do cilindro e do transdutor no cárter. Na Tabela 15, esses valores são apresentados,

levando-se em consideração as variações dos dois ajustes, por meio da combinação dos efeitos de cada um, como recomendado por Albertazzi e Sousa (2018).

Tabela 15 – Pressão de correção - MTD5

Carga	Pressão (bar) - No intervalo: -170,0° a -160,0°				
	P_{max}	P_{min}	$\Delta P_{max-min}$	Media	Des. Pad.
100%	1,5313	1,5242	0,0071	1,5275	0,0053
66%	1,4519	1,4402	0,0117	1,4448	0,0057
33%	1,3433	1,3287	0,0146	1,3365	0,0078

Fonte: O autor.

Nota-se na Tabela 15 que as variações na pressão de correção obtidas com esse método são da mesma magnitude das variações observadas nos métodos MTD-1 e MDT-2. Mas cabe lembrar que a quantidade de pontos utilizados para expressão dos resultados das Tabelas 5 e 6 foi diferente da quantidade utilizada aqui. Então, para uma melhor comparação, na Tabela 16 é apresentado o resumo dos resultados obtidos com a aplicação dos três métodos mais precisos, conforme observado neste estudo, MTD-1, MTD-2 e MTD-5. Os métodos foram aplicados com a mesma base de dados.

Tabela 16 – Comparação entre as pressões de correção (em bar), obtidas com os métodos MTD-1, MTD-2 e MTD-5.

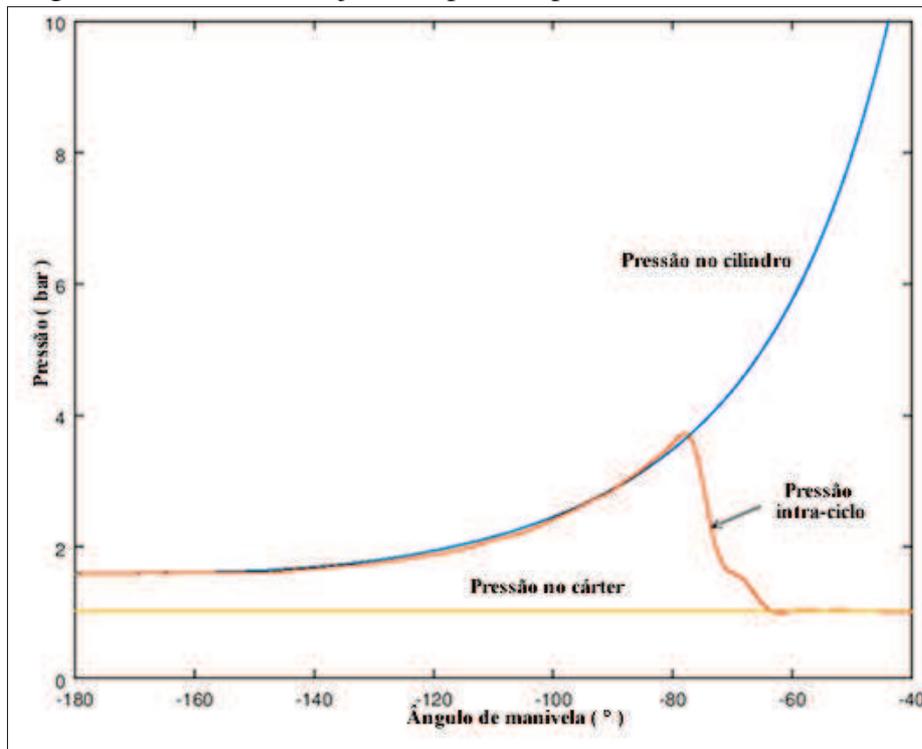
Carga	MTD-1		MTD-2		MTD-5	
	Media	Des. Pad.	Media	Des. Pad.	Media	Des. Pad.
100%	1,2133	0,0022	1,1781	0,0122	1,5275	0,0053
66%	1,1680	0,0043	1,0263	0,0050	1,4448	0,0057
33%	1,0610	0,0013	1,0006	0,0027	1,3365	0,0078

Fonte: O autor.

Nota-se, pela variação da pressão de correção, estimada por meio do desvio-padrão, que esses três métodos apresentam variações na mesma ordem de grandeza, com uma ligeira superioridade do MTD-1 em relação aos demais. Destaca-se que pelos respectivos perfis de ajuste das curvas de pressão para cada um desses métodos, o ajuste pela pressão no escape, como mostrado na Figura 30, é o que passa menor confiança. O detalhe do ajuste das curvas de pressão na aplicação do método MTD-5 é mostrado na Figura 37.

Nota-se na Figura 37 a qualidade do ajuste das curvas de pressão, tanto o ajuste da pressão medida com transdutor na parede do cilindro pela pressão medida no cárter como do ajuste da pressão medida pelo transdutor no cabeçote do motor pela pressão medida com o transdutor da parede do cilindro.

Figura 37 – Detalhe do ajuste de pressão pelo cárter.



Fonte: O autor.

Ressalta-se que o fato de o MTD-5, no experimento realizado neste estudo, utilizar três transdutores pode ser considerado por alguns como uma desvantagem, devido ao custo associado que bem maior, quando comparado com métodos que utilizam apenas um transdutor, por exemplo. Mas neste estudo se utilizaram três transdutores para uma melhor investigação dos problemas relatados (RANDOLPH, 1990b; DAVIS; PATTERSON, 2006) na aplicação desse método. Com essa abordagem foi possível identificar que as oscilações relatadas pelos autores citados não eram devidas a oscilações na pressão do cárter, mas sim devidas a vibrações no cilindro de combustão. Com essas informações, neste estudo, pôde-se aplicar um tratamento adequado aos dados de pressão obtidos com o transdutor da parede do cilindro, obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 15 e na Figura 37.

A grande vantagem desse método é que ele não parte de nenhuma suposição, como os MTD-1 e MTD-2, que supõem que em determinado ponto a pressão no cilindro de combustão é igual à pressão na admissão ou no escape, respectivamente, nem em uma idealização de um processo politrópico com os métodos MTD-3 e MTD-4. O MTD-5 se utiliza de dados reais dos experimentos, sendo que nessas condições pode ser considerado como Valor de Referência (VR) para se avaliar os outros quatro métodos quanto às suas respectivas exatidões. Como mostrado na Tabela 17, que apresenta o erro de cada um dos métodos avaliados em relação ao MTD-5.

Tabela 17 – Avaliação da exatidão dos métodos.

Carga	VR (bar) MTD-5	Erro (bar)			
		MTD-1	MTD-2	MTD-3	MTD-4
100%	1,5275	-0,3142	-0,3494	-0,0287	-0,1316
66%	1,4448	-0,2768	-0,4185	-0,0704	-0,3320
33%	1,3365	-0,2755	-0,3359	-0,0515	-0,3554

Fonte: O autor.

Acrescenta-se, ainda, que o MTD-5 pode ser aplicado utilizando-se dois transdutores, sendo um transdutor piezoelétrico instalado no cabeçote do motor e um transdutor piezoresistivo instalado na parede do cilindro, que fornece valores de pressão absoluta.

Destaca-se como uma das vantagens da aplicação desse método que, além de fornecer valores para a pressão no cilindro durante a combustão, os dados de pressão do transdutor da parede do cilindro podem ser utilizados para a determinação precisa da posição do PMS, considerado um parâmetro importante para algumas análises, como a avaliação do atraso de ignição em motores de combustão interna.

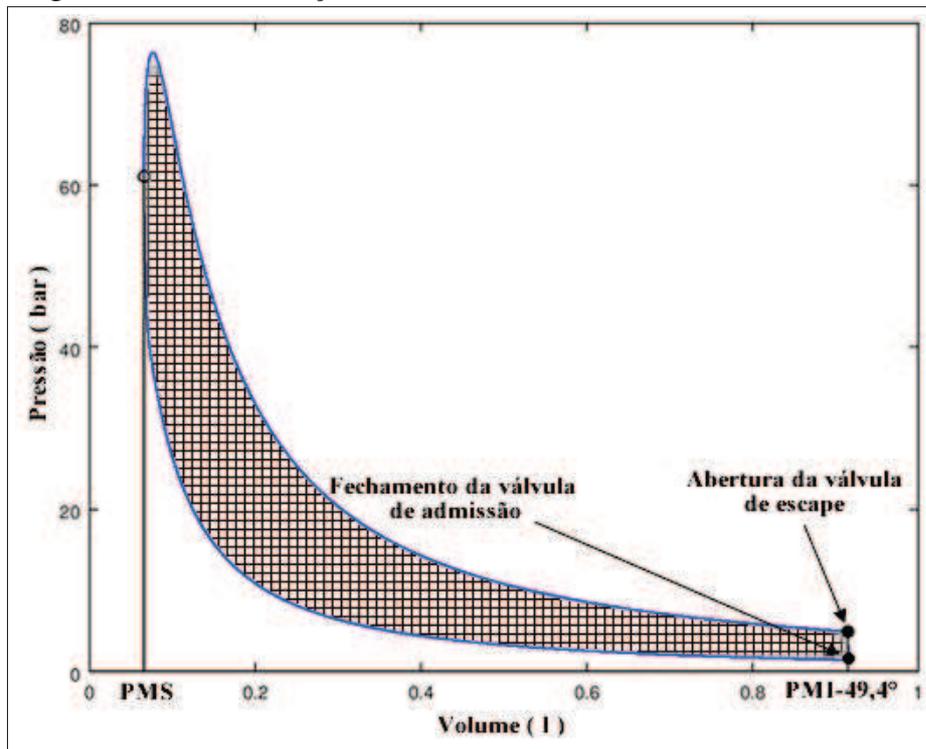
Vários trabalhos avaliaram a influência da pressão utilizada como referência no tratamento de dados de transdutores piezoelétricos em parâmetros como a PME e concluíram que essa influência era significativa (BRUNT; EMTAGE, 1996). Neste trabalho verificou-se que a pressão de referência não influencia de forma significativa a PME, devido à forma como esta é calculada. Então, realizou-se uma análise mais detalhada da influência, na PME, das outras fontes de incerteza presentes na medição da pressão no cilindro.

4.6 Análise das fontes de incerteza na determinação da PME

A PME é a integral da pressão no cilindro de combustão em relação ao volume dos gases no cilindro, calculada pela Equação 4.2 entre os pontos especificados pelo momento de fechamento da válvula de admissão e abertura da válvula de escape, dividida pelo volume deslocado (V_d). O resultado dessa integral pode ser observado na Figura 38, onde se destaca os pontos de fechamento e abertura das válvulas de admissão e escape, respectivamente.

Com objetivo de se realizar uma análise mais detalhada das fontes de incerteza presentes na medição de pressão, que irão influenciar a determinação da PME, foi realizada uma simulação numérica com a aplicação do método de Monte Carlo para simular variações nos parâmetros de entrada do modelo matemático expresso pela Equação 3.2 e consequentemente avaliar a influência dessa variação na PME.

Figura 38 – Determinação da PME.



Fonte: O autor.

Para cada uma dessas fontes de incerteza foi atribuída uma faixa de variação, como recomendado por Albertazzi e Sousa (2018), estimada com base em informações técnicas de fabricantes, observações experimentais etc. O resumo dessas informações é apresentado na Tabela 18. As distribuições de probabilidade, na segunda coluna da Tabela 18, foram assumidas como conveniente e adequada com base em experimentos realizados *a priori*.

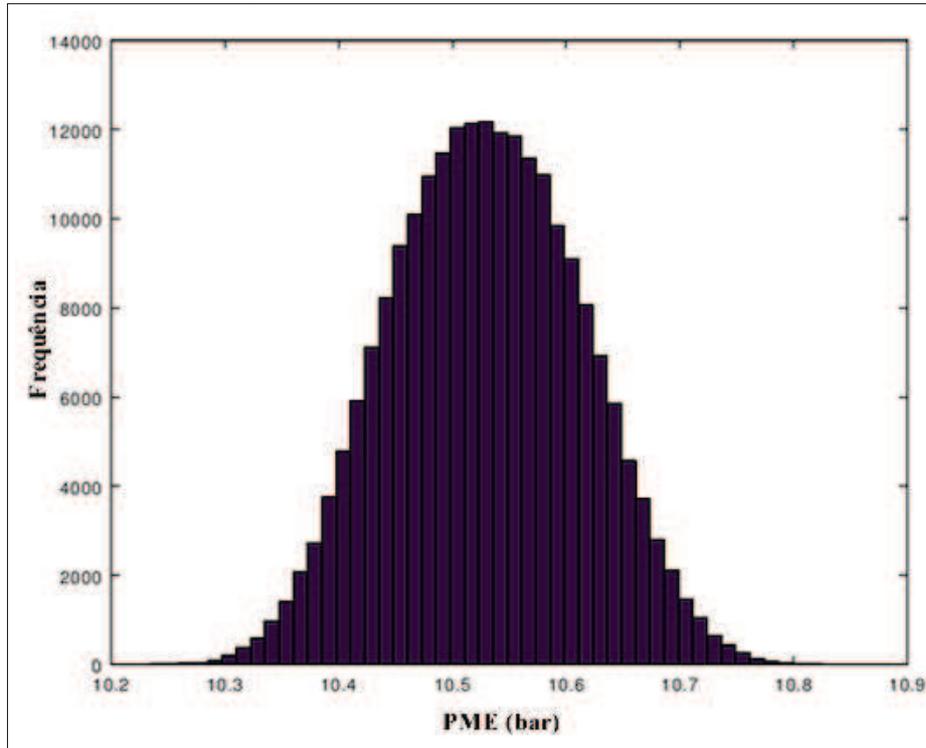
Tabela 18 – Variáveis aleatórias atribuídas a cada fonte de incerteza.

Fonte de incerteza	Distribuição	μ	Parâmetros da dispersão
Varição inter-ciclo	normal	0	$\sigma = 0,018/2 = 0,009$ (bar)
Varição da linha de base	normal	0	$\sigma = 0,000336/2 = 0,000168$ (pC/bar)
Incerteza do valor de resistência	retangular	R	$\alpha = 0,99 * R; \beta = 1,01 * R$ (hom)
Resolução do transdutor angular	retangular	0	$\alpha = -0,05; \beta = 0,05$ (°)
Resolução do indicador de velocidade	triangular	0	$\alpha = -0,5; \beta = 0,5$ (rpm)
Resolução do indicar de tensão	retangular	0	$\alpha = -0,0003; \beta = 0,0003$ (V)
Oscilação da velocidade angular	retangular	0	$\sigma = 10,0/2 = 5,0$ (rpm)
Ruido elétrico	normal	0	$\sigma = 0,024/2 = 0,012$ (V)
Sensibilidade do transdutor piezoelétrico	normal	k	$\sigma = 0,005 * k/2 = 0,0025 * k$ (pC/bar)
Varição na pressão de referência	normal	1,283	$\sigma = 0,064/2 = 0,032$ (bar)

Fonte: O autor.

Foram simuladas $n = 2,2 \cdot 10^5$ repetições. Foi obtida uma distribuição normal com média 10,5290 bar e desvio-padrão de 0,0835 bar, como mostrado na Figura 39. A incerteza de medição, calculada para 95,45% de probabilidade de abrangência foi de $\pm 0,1670$ bar.

Figura 39 – Histograma resultante da simulação.



Fonte: O autor.

O resultado anterior se refere à simulação da variação de todas as fontes de incerteza concomitantemente, mas esse método de simulação também pode ser aplicado fazendo-se variar apenas uma fonte por vez para se avaliar seu nível de influência nos resultados. Na Tabela 19, tem-se a simulação de cada uma das fontes de incerteza considerada, analisada individualmente.

Tabela 19 – Simulação individual de cada fonte de incerteza.

Fonte de incerteza	Distribuição	PME (bar)	
		μ	σ
Variação inter-ciclo	normal	10,5290	0,0000
Variação da linha de base	normal	10,5290	0,0000
Incerteza do valor de resistência	retangular	10,5290	0,0607
Resolução do transdutor angular	retangular	10,5290	0,0189
Resolução do indicador de velocidade	triangular	10,5290	0,0012
Resolução do indicador de tensão	retangular	10,5290	0,0000
Oscilação da velocidade angular	retangular	10,5290	0,0292
Ruído elétrico	normal	10,5290	0,0000
Sensibilidade do transdutor piezoelétrico	normal	10,5290	0,0527
Variação na pressão de referência	normal	10,5290	0,0000

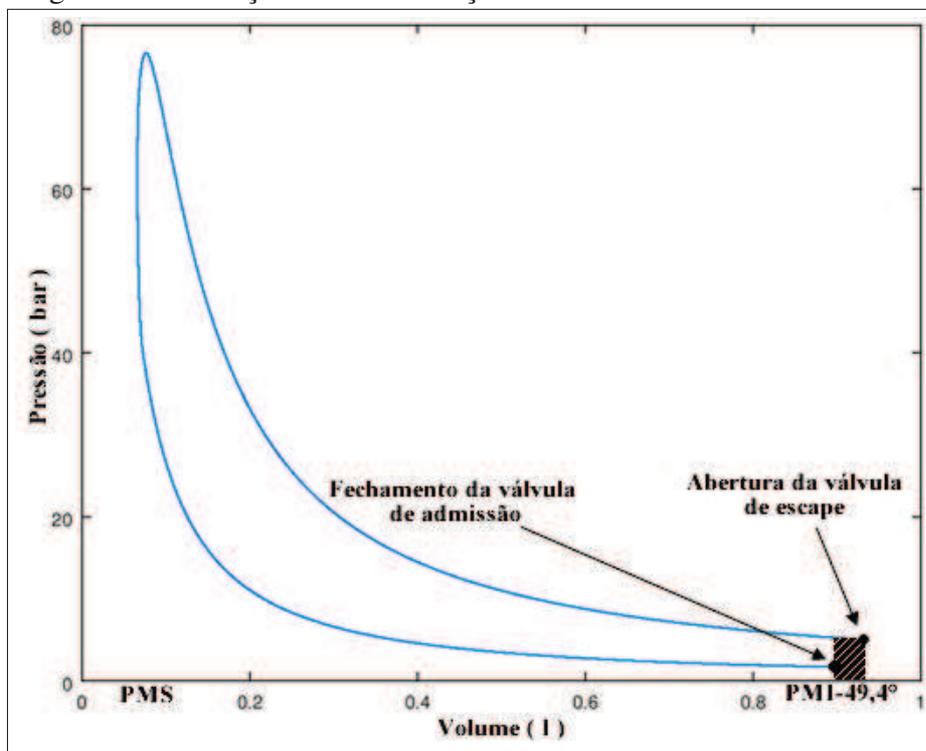
Fonte: O autor.

Nota-se que as variações inter-ciclo e as variações de linha de base (intra-ciclo) não tiveram influências significativas e isso se deve ao procedimento utilizado. Na execução dos experimentos, antes da realização das medições, aguarda-se que o motor atinja o regime de

funcionamento estável, fazendo com que as variações entre ciclos consecutivos sejam as mínimas possíveis. O fato de se aplicar uma correção da linha de base, assumindo que o sistema opera em ciclo e que as propriedades no final do ciclo são iguais às propriedades no início do ciclo, antes de se realizar a integração faz com que as variações residuais sejam insignificante.

Outro parâmetro que apresentou uma influência insignificativa foi a resolução do indicador de tensão, devido à elevada capacidade de medição do sistema utilizado. O ruído elétrico não apresentou uma influência bem maior nesse resultado devido à aplicação de filtros analógicos e digitais.

Figura 40 – Variação na determinação da PME.



Fonte: O autor.

A variação na pressão de referência provoca o deslocamento da área em destaque na Figura 38 no eixo vertical, variando para cima ou para baixo conforme a variação da pressão de referência, mas o valor numérico da área permanece o mesmo. Então, neste trabalho, notou-se que a pressão de referência para os transdutores piezoelétricos irá influenciar a PMS somente quando a válvula de escape for aberta em uma posição diferente da de fechamento da válvula de admissão.

Nota-se, ainda, que quanto maior essa diferença das referidas posições e quanto maior o valor de correção, maior será a influência da pressão de referência. Outro detalhe é que essa influência será maior se as válvulas abrirem após os instantes determinados, como por

exemplo, considerando os 3° de incerteza especificados pelo fabricante do motor, porque nessa situação a área a ser utilizada para o cálculo será área delimitada pela curva de exaustão e o eixo horizontal, como mostrado na Figura 40.

Nesse ponto, destaca-se que a fonte de incerteza com maior influência nos resultados obtidos foi a incerteza relacionada à resistência utilizada no amplificador de carga para converter o sinal do transdutor em um sinal de tensão. A segunda fonte de incerteza com influência bastante significativa nos resultados é a sensibilidade do transdutor. Outras fontes com influências consideráveis são a resolução do transdutor de posição angular e as variações na velocidade de rotação do motor.

Uma análise como essa serve para identificar onde agir para promover melhorias no sistema de medição utilizado para essa tarefa. Com os resultados da Tabela 19, identifica-se que ações com objetivo de melhorar o circuito de amplificação do sinal e a utilização de transdutores de pressão mais precisos podem reduzir bastante o nível de incerteza do resultado geral. Por outro lado, ações com objetivo de melhorar a precisão do medidor de velocidade angular do eixo do motor teriam um resultado sem melhorias significativas.

5 CONCLUSÕES

Nos experimentos realizados neste trabalho, foram analisados cinco métodos disponíveis na literatura científica. Inicialmente, por meio de uma investigação dos detalhes de funcionamento e das características do comportamento do sistema em análise a fim de se identificar fontes de incerteza no processo de medição e, posteriormente, comparando-os em relação a sua influência na determinação da PME, analisando-se a variabilidade dos resultados obtidos com a aplicação de cada um desses métodos.

Como melhorias propostas no método de referência pela pressão intra-ciclo com o transdutor instalado na parede do cilindro, neste trabalho utilizou-se um transdutor piezoelétrico na parede do cilindro e um transdutor de pressão absoluta no cárter, como também utilizaram-se filtros analógicos e digitais para tratamento dos sinais desses transdutores e, com isso, reduziu-se as variações nos resultados obtidos com a aplicação desse método, que em trabalhos anteriores eram consideradas bastante elevadas, ao ponto de se optar por outros métodos.

Com essas melhorias, que combinadas ao fato de que esse método é o único que não se baseia em suposições ou idealizações, em outras palavras, é o único que se fundamenta apenas em medições reais, ele pôde ser assumido como referência para se avaliar a exatidão dos demais métodos, que se baseiam em suposições ou idealizações.

Neste trabalho, avaliou-se tanto a precisão como a exatidão dos métodos, destacando-se que o mais preciso, nessa análise, foi o de referência pelo coletor de admissão, mas esse não é o mais exato, na verdade ele é um dos menos exatos e, curiosamente, o método mais exato é o de referencial por coeficientes politrópicos constantes, que é um dos mais imprecisos.

Com uma análise da incerteza na determinação da PME, foi possível calcular esse parâmetro com uma incerteza de 0,17 bar para um nível de 95,45% de confiança. E com uma análise mais detalhada das fontes de incerteza, foi possível identificar que devido ao modelo matemático e às condições de contorno utilizadas para o cálculo da PME, a diferença nas posições de fechamento e abertura das válvulas de admissão e escape, respectivamente, vai determinar se as variações na pressão de referência terão influência significativa ou não na PME, que é um fator que não foi identificado em trabalhos anteriores.

Com essa análise, também foi possível identificar pontos estratégicos, onde se pode agir para melhorar a precisão do sistema de medição. Foi possível concluir que o método de referência pelo coletor de admissão é o mais preciso e menos exato, bem como o método de referência por coeficientes politrópicos constante é o mais exato e o menos preciso.

REFERÊNCIAS

- ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. **fundamentos de METROLOGIA científica e industrial**. Barueri-SP: Manole, 2018.
- AMBROSIO, S.; FERRARI, A.; GALLEANI, L. In-cylinder pressure-based direct techniques and time frequency analysis for combustion diagnostics in ic engines. **Energy Conversion and Management**, v. 99, p. 299–312, 2015.
- ASAD, U.; KUMAR, R.; HAN, X.; ZHENG, M. Precise instrumentation of a diesel single-cylinder research engine. **Measurement**, v. 44, p. 1261–1278, 2011.
- BENAJES, J.; OLMEDA, P.; MARTÍN, J.; CARRENO, R. A new methodology for uncertainties characterization in combustion diagnosis and thermodynamic modelling. **Applied Thermal Engineering**, v. 71, p. 389–399, 2014.
- BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna: volume 1**. São Paulo: Blucher, 2012.
- BRUNT, M. F. J.; EMTAGE, A. L. Evaluation of imep routines and analysis errors. **SAE TECHNICAL PAPER SERIES**, n. 960609, p. 85–101, 1996.
- BRUNT, M. F. J.; POND, C. R. Evaluation of techniques for absolute cylinder pressure correction. **SAE TECHNICAL PAPER SERIES**, n. 970036, p. 5–18, 1997.
- BUENO, A. V.; VELÁSQUEZ, J. A.; MILANEZ, L. F. A new engine indicating measurement procedure for combustion heat release analysis. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, p. 1657–1675, 2009.
- BUYUKADA, M. Probabilistic uncertainty analysis based on monte carlo simulations of co-combustion of hazelnut hull and coal blends: Data-driven modeling and response surface optimization. **Bioresource Technology**, v. 225, p. 106–112, 2017.
- COUTO, P. R. G.; OLIVEIRA, L. H. P. de; OLIVEIRA, J. da S.; FERREIRA, P. L. S. **CALIBRAÇÃO DE TRANSDUTOR/TRANSMISSOR DE PRESSÃO**: Guia de calibração. Rio de Janeiro, 2010. 22 p.
- DAVIS, R. S.; PATTERSON, G. J. Cylinder pressure data quality checks and procedures to maximize data accuracy. **SAE Technical Paper**, n. 2006-01-1346, p. 13, 2006.
- DESBAZEILLE, M.; R.B.RANDALL; F.GUILLET; M.ELBADAOU; C.HOISNARD. Model - based diagnosis of large diesel engines based on angular speed variations of the crankshaft. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 24, p. 1529–1541, 2010.
- DICKINSON, H. C.; NEWELL, F. B. **A HIGH-SPEED ENGINE PRESSURE INDICATOR OF THE BALANCED DIAPHRAGM TYPE**. WASHINGTON, 1921. 16 p. (REPORT No. 107.).
- ERIKSSON, L.; THOMASSON, A. Cylinder state estimation from measured cylinder pressure traces - a survey. **IFAC PaperOnLine**, v. 50, p. 11029–11039, 2017.
- FANELLI, I.; CAMPOREALE, S. M.; FORTUNATO, B. Efficient on-board pegging calculation from piezo-electric sensor signal for real time in-cylinder pressure offset compensation. **SAE Int. J. Engines**, n. 2012-01-0901, p. 11, 2012.

- FINESSO, R.; SPESSA, E.; YANG, Y. Fast estimation of combustion metrics in di diesel engines for control-oriented applications. **Energy Conversion and Management**, v. 112, p. 254–273, 2016.
- HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. New York: McGraw-Hill, 1988.
- HOUNTALAS, D.; PAPAGIANNAKIS, R.; ZOVANOS, G.; ANTONOPOULOS, A. Comparative evaluation of various methodologies to account for the effect of load variation during cylinder pressure measurement of large scale two-stroke diesel engines. **Applied Energy**, v. 113, p. 1027–1042, 2014.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais de termos associados**: (vim 2012). Duque de Caxias, 2012. 94 p.
- JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY. **Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method**: (jcg-m-101:2008). Paris, 2008. 90 p.
- KHAJORNTRAIDET, C.; ITO, K. An application of in-cylinder pressure for compression heat transfer estimation. **IFAC-Papers OnLine**, v. 49, p. 769–774, 2016.
- KISTLER GROUP. **Crank Angle Encoder Set**: Precise angle signals from 0 ... 20 000 1/min. Winterthur, 2010. 2 p.
- KISTLER GROUP. **Engine Combustion Analysis**: Engine pressure measurement for research and development. Winterthur, 2010. 66 p.
- KISTLER GROUP. **Test & Measurement Pressure**: Measurement equipment for demanding t&m applications. Winterthur, 2017. 56 p.
- KISTLER INSTRUMENTE AG. **Piezoresistive Pressure Sensor**: with m5 thread, for pressures up to 10 bar. Winterthur, 2005. 2 p.
- LEE, K.; KWON, M.; SUNWOO, M.; YOON, M. An in-cylinder pressure referencing method based on a variable polytropic coefficient. **SAE Technical Paper**, n. 2007-01-3535, p. 13, 2007.
- LEE, K.; YOON, M.; SUNWOO, M. A study on pegging methods for noisy cylinder pressure signal. **Control Engineering Practice**, v. 16, p. 922–929, 2008.
- LUJÁN, J. M.; BERMÚDEZ, V.; GUARDIOLA, C.; ABBAD, A. A methodology for combustion detection in diesel engines through in-cylinder pressure derivative signal. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 24, p. 2261–2275, 2010.
- MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- MWM MOTORES DIESEL LTDA. **Manual de Oficina**: Série 229. São Paulo, 2005. 233 p.
- OMEGA, E. I. **Very High Accuracy Amplified Voltage Output Pressure Transducer, G 1/8 or G 1/4 Connections, 0 to 5 Vdc Output, 0-160 mbar to 0-400 bar**. 2018. Disponível em: <<https://www.omega.nl/pptst/PXM01-5V.html>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

- PATTERSON, G. J. A technique for processing cylinder pressure and test bed data sets for engine speed-sweep tests to allow reduced testing time with enhanced interpretation of results. **SAE Technical Paper**, n. 2008-01-3006, p. 10, 2008.
- PAYRI, F.; LUJÁN, J. M.; MARTÍN, J.; ABBAD, A. Digital signal processing of in-cylinder pressure for combustion diagnosis of internal combustion engines. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 24, p. 1767–1784, 2010.
- PERTENCE, A. **Amplificadores operacionais e filtros ativos: teoria, projetos, aplicações e laboratório**. São Paulo: McGraw-Hill, 1988.
- RANDOLPH, A. L. Cylinder-pressure-transducer mounting techniques to maximize data accuracy. **SAE TECHNICAL PAPER SERIES**, n. 900171, p. 22, 1990.
- RANDOLPH, A. L. Methods of processing cylinder-pressure transducer signals to maximize data accuracy. **SAE TECHNICAL PAPER SERIES**, n. 900170, p. 12, 1990.
- ROBERTS, M. J. **Fundamentos em sinais e sistemas**. São Paulo: McGraw-Hill, 2009.
- SIERESA, J.; CAMPO, A. Uncertainty analysis for the experimental estimation of heat transfer correlations combining the wilson plot method and the monte carlo technique. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 129, p. 309–319, 2018.
- STORM, X.; SALMINEN, H. J.; VIRRANKOSKI, R.; NIEMI, S.; HYVONEN, J. Analysis of cylinder pressure measurement accuracy for internal combustion engine control. **SAE Technical Paper**, n. 2017-01-1067, p. 15, 2017.
- SUN, W.; DU, W.; DAI, X.; BAI, X.; WU, Z. A cylinder pressure correction method based on calculated polytropic exponent. **SAE Technical Paper**, n. 2017-01-2252, p. 7, 2017.
- SZABADOS, G.; BERECZKY, A. Experimental investigation of physicochemical properties of diesel, biodiesel and tbk-biodiesel fuels and combustion and emission analysis in ci internal combustion engine. **Renewable Energy**, v. 121, p. 568–578, 2018.
- WEBSTER, J. G. **Measurement, Instrumentation, and Sensors: The handbook**. N.W.: CRC Press LLC, 1999.
- WENIG, M.; GRILL, M.; BARGENDE, M. Fundamentals of pressure trace analysis for gasoline engines with homogeneous charge compression ignition. **SAE Technical Paper**, n. 2010-01-2182, p. 18, 2010.