

UMA METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DA PRESSÃO NO CILINDRO DE COMBUSTÃO DE UM MOTOR DIESEL

J.H.B. Silva, jackson.h.b.silva@gmail.com¹

F. A. F. Gomes, f.augustofgomes@gmail.com²

F.P.F. Dias, felipe.dias@fanor.edu.br³

D. C. Silva, daniel.carlos@alu.ufc.br¹

A.V. Bueno, bueno@ufc.br¹

¹ Universidade Federal do Ceará - UFC, CE, Brasil, Campus Universitário do PICI, Bloco 714, CEP 60455-760,

² Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, SP, Brasil, Rua Dr. Olímpio da Silva Miranda, nº 646, Cidade Universitária.

³ Faculdade do Nordeste – Devry, CE, Brasil, Rua Jornalista Nertan Macedo, nº 165, Cocó, CEP 60192-450,

Resumo: Muitos parâmetros utilizados para análise e desenvolvimento na área de motores de combustão interna se baseiam em valores de pressão medidos no cilindro durante a queima do combustível. Logo, a qualidade dessas análises está diretamente relacionada à precisão dos valores obtidos para a pressão durante o processo em estudo. Este trabalho propõe uma metodologia para aquisição, processamento e expressão dos resultados da medição de pressão no cilindro de combustão, utilizando um transdutor de pressão piezoelétrico. A metodologia proposta foi aplicada, experimentalmente, para medição da pressão no cilindro de combustão de um motor diesel, durante a queima de biocombustíveis. Nessa aplicação, utilizaram-se métodos para minimizar erros na determinação de uma pressão de referência para o tratamento dos dados obtidos com o transdutor piezoelétrico, atingindo-se, assim, uma melhor qualidade e uma maior confiabilidade nos resultados com uma exatidão de $\pm 0,67$ bar.

Palavras-chave: medição de pressão, sensor piezoelétrico, combustão interna.

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 gera uma 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. Além disso, o processo de medição deve ser específico para o objetivo em questão, porque um determinado método pode ser adequado para uma situação e não ser para outras (Lee, 2008).

Os dados de pressão da câmara de combustão são utilizados para avaliação de parâmetros como, por exemplo, análise de liberação de energia, determinação de coeficientes politrópicos, estimativa da temperatura de chama, dentre outros (Brunt, 1997). Esses fatos tornam o conhecimento do comportamento da pressão no cilindro de combustão um requisito muito importante para essas análises. E indica, que essa medição de pressão deve ser tão precisa quanto for o nível de exigência da análise abordada (Brunt, 1996 e Asad, 2011).

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, 2017). Atualmente, os transdutores piezoelétrico são normalmente utilizados para a medição de pressão nesses estudos, devido suas características, que são bastante adequadas ao objetivo em questão: tempo de resposta, ótima precisão, faixa de medição, resistência e durabilidade, características térmicas, tamanho etc. (Brunt, 1997; Lee, 2008).

Uma característica intrínseca dos sensores piezoelétricos é a capacidade de se induzir internamente uma carga elétrica proporcional a variação de uma força mecânica atuando em sua superfície. Os transdutores piezoelétricos medem a pressão dinâmica em vez da pressão absoluta, uma vez que os dados de pressão absoluta são utilizados em muitas aplicações, faz-se necessário a determinação de uma pressão de referência ou “pegging” (Brunt, 1997; Lee, 2008 e Eriksson, 2017).

Existem diversos métodos que podem ser utilizados para a determinação dessa pressão de referência, os chamados; métodos “peggings” ou “pegging methods”. A aplicação desses métodos exige que os objetivos da medição estejam bem definidos por que um pode ter melhor exatidão que outro, dependendo dos objetivos e das condições da medição a ser realizada, uma abordagem detalhada de alguns desses métodos foi realizada por (Brunt, 1997; Lee, 2008; Eriksson, 2017 e Randolph, 1990).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Por definição a pressão é uma grandeza realizada pela atuação, perpendicularmente, de uma força sobre uma superfície. Segundo (Couto, 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 Fig. 1, as modalidades de pressão medida são: pressão absoluta, pressão manométrica, vácuo e pressão diferencial.

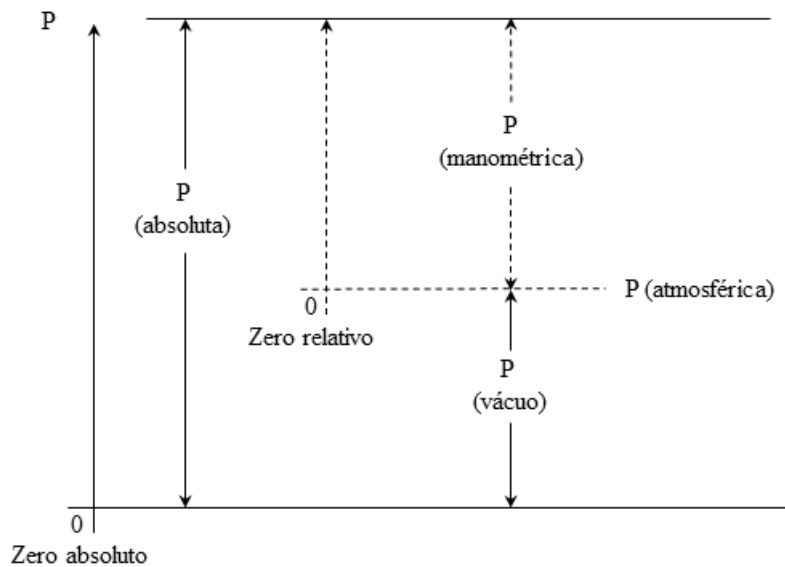


Figura 1 - Modalidades de pressão.

A pressão absoluta (P_{abs}) é a pressão que está acima da pressão “zero absoluto” (Couto, 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. A pressão manométrica avalia o quanto seu valor está acima da 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. Vácuo avalia o quanto a pressão está abaixo da 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 a pressão “zero absoluto”.

Os instrumentos de medição de pressão podem ser classificados, segundo (Couto, 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.

Dentre os medidores relativos, tem-se o transdutor piezoelétrico, que pode ser considerado um tipo especial de medidor de pressão devido suas características peculiares de gerar um sinal de resposta proporcional a variação da força atuando em sua superfície sensora. Segundo (Webster, 1999), a carga “ q ” gerada no sensor piezoelétrico pode ser convertida em corrente “ i ” de acordo com a expressão:

$$i = \frac{dq}{dt} = d_{33} \frac{dF}{dt} \quad (1)$$

onde: dq e dt são as variações de carga e 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. Na Fig. 2, tem-se um exemplo de aplicação da conversão da carga gerada em um sensor piezoelétrico em tensão (V), com a utilização de um circuito elétrico conectando o sensor a um amplificador de carga.

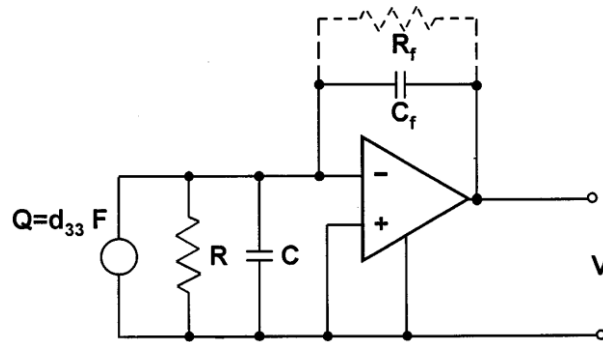


Figura 2 - Circuito elétrico do sensor piezoelétrico conectado ao amplificador de carga (Webster, 1999).

Para superar as dificuldades de utilização de amplificadores de tensão para medições piezoelétricas, (Webster, 1999) propõe um chamado amplificador de carga, mostrado na Fig. 2. 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:

$$V = -q/C_f = -d_{33}F/C_f \quad (2)$$

A Eq. (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 . Infelizmente, essa vantagem é difícil de 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 Fig. 2), o que evita esse carregamento. Levando em consideração o circuito RC do circuito de retorno, a tensão de saída terá a forma:

$$V = \frac{d_{33}F}{C} \frac{j\omega\tau}{1 + j\omega\tau} \quad (3)$$

Isto é, torna-se dependente da frequência ω conhecida e com $\tau = RC$. Neste caso, a constante de tempo t 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 Eq. (3), a sensibilidade do circuito é muito reduzida com a diminuição de C . Se t não é suficientemente grande, o corte de baixa frequência não permite medições piezoelétricas em condições quase estáticas ou de baixa frequência.

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 possamos utilizar essa informação. 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, este produz uma ou mais respostas ou sinais de saída em suas saídas, como representado na Fig. 3, em um diagrama de blocos de um sistema com uma única entrada e única saída.

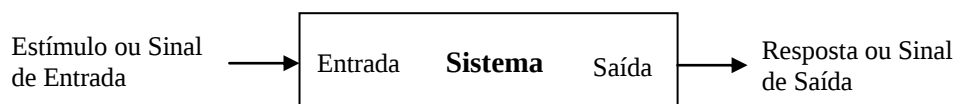


Figura 3 - Diagrama de blocos de um sistema simples (Roberts, 2009).

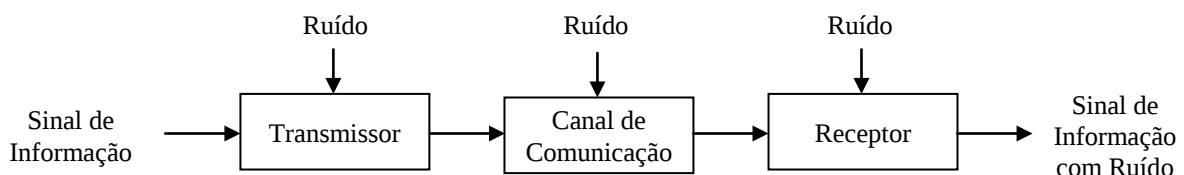


Figura 4 - Um sistema de comunicação (Roberts, 2009).

Em um sistema, o transmissor gera o sinal e o receptor recupera-o. Um canal é o caminho que o sinal percorre desde o transmissor até o receptor e a presença de ruídos é inevitável no transmissor, canal e receptor, muitas vezes em múltiplos pontos, como representado na Fig. 4.

De acordo com (Júnior, 1988), o circuito apresentado na Fig. 2 também funciona como um filtro ativo passa baixa que atenua a influência de fontes de ruído. A frequência de corte (f_c) desse filtro pode ser determinada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4)$$

Um filtro bem dimensionado pode atenuar bastante a influência de sinais indesejados nos dados de informação e consequentemente evitar imprecisões nos resultados das medições. (Júnior, 1988) sugere uma regra prática de se estabelecer uma frequência de corte em torno de dez vezes maior que a frequência do sinal desejado. Em seu trabalho, (Brut, 1997) alerta para várias outras fontes externas que podem influenciar os resultados das medições de pressão em cilindro de combustão. (Albertazzi, 2000) recomenda caracterizar bem o processo de medição, porque esse 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.

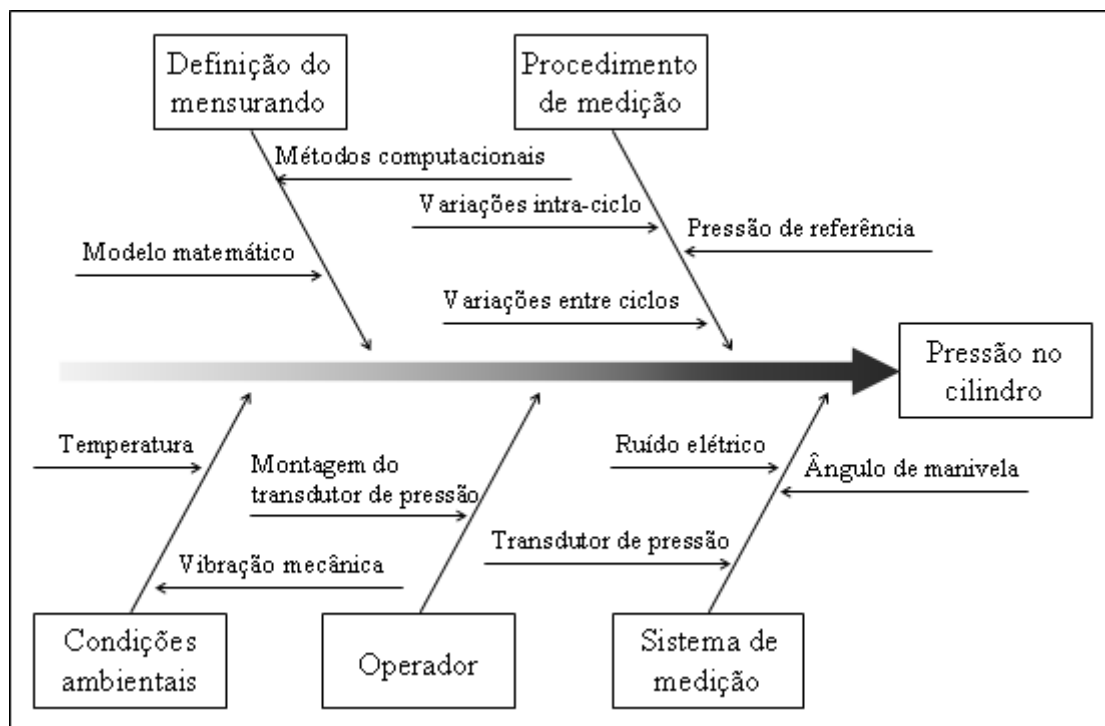


Figura 5 - Elementos do processo de medição.

Na Fig. 5, estão representados os principais elementos presentes no processo de medição da pressão em um cilindro de combustão, conforme apontado por (Brut, 1997). Como o objetivo deste trabalho engloba a medição de uma grandeza, cujo seu valor varia em função do tempo durante o período em que a medição é realizada, (Albertazzi, 2000) sugere mais cuidados para se garantir resultados mais precisos.

3. METODOLOGIA

Esse trabalho foi realizado no Laboratório de Motores de Combustão Interna - LMCI da Universidade Federal do Ceará – UFC, em um motor diesel MWM TD-229-6, com injeção direta e turbo alimentado. Esse motor é controlado por uma interface de usuário desenvolvida em LabView, que se comunica com um módulo de aquisição de dados NI SCXI-1600. O sinal de pressão foi gerado por um transdutor piezoelétrico da Kistler modelo 6054BR e a rotação do eixo do motor foi medida com um transdutor de posição angular (sensor de rotação), tipo 2614A4, também da Kistler, com resolução de 0,1°.

Esse aparato foi montado conforme indicado na Fig. 6, a seguir, que se constitui em cinco módulos: o transdutor de pressão, um amplificador operacional, um transdutor de posição angular, um sistema de aquisição de dados e um sistema computacional para tratamento e apresentação dos resultados.

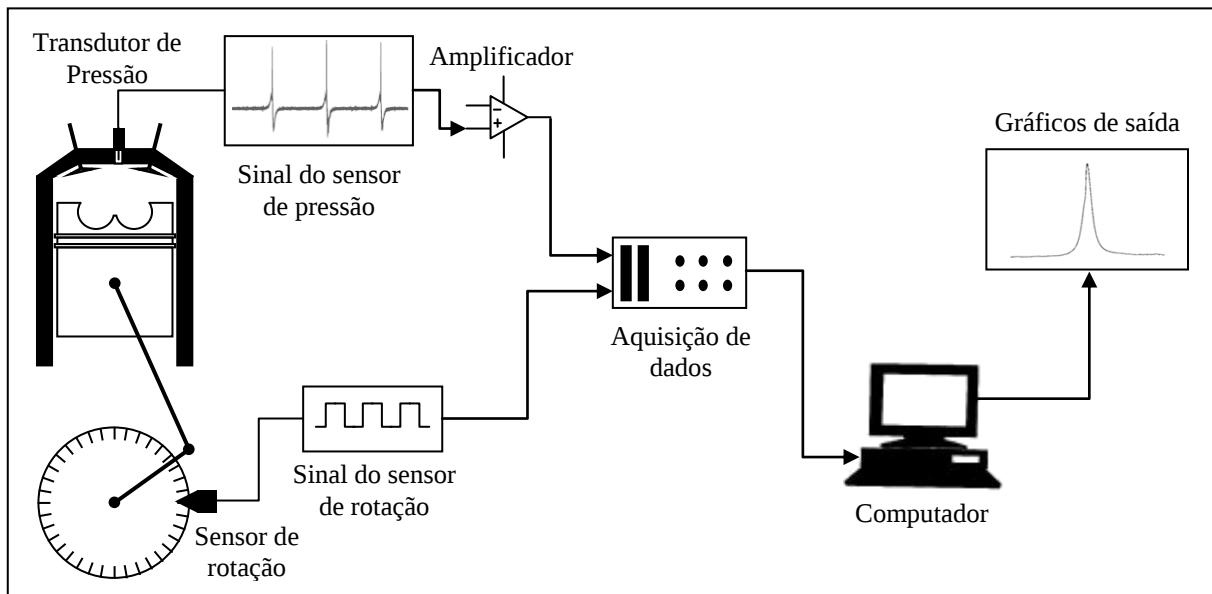


Figura 6 - Configuração do sistema de medição da pressão no cilindro de combustão.

Nesse sistema de medição, o transdutor de posição angular é utilizado para se estabelecer uma correlação entre a pressão e a posição do pistão durante a combustão e pode ser utilizado também para a integração da diferencial da pressão em relação à diferencial angular conforme mostrado em (Randolph, 1990) e modelado a seguir.

Neste trabalho, optou-se por um sensor piezoelétrico por ser amplamente utilizados em diversos trabalhos e por suas características apropriadas como um rápido tempo de resposta, um pequeno tamanho e alta resistência a impactos mecânicos (Bueno, 2009; Eriksson, 2017; *et al*).

De Eq. (2) e Eq. (3), o efeito piezoelétrico do transdutor de pressão implica em:

$$dq = -kdP \quad (4)$$

Onde uma variação de carga (dq) é proporcional a variação de pressão (dp) com uma constante de proporcionalidade, ou sensibilidade, ($-k$).

Esse transdutor piezoelétrico foi utilizado juntamente com um amplificador operacional, como apresentado na Fig. 2, semelhante aos descritos em (Bueno, 2009 e Eriksson, 2017). Nesse trabalho o sistema amplificador foi configurado para funcionar como um filtro de ruídos e para converter o sinal de corrente em tensão, pois o sistema de aquisição de dados realiza a leitura do sinal em unidade tensão. Com os dados de variação de tensão e da posição angular podemos determinar a variação de pressão em relação à variação angular:

$$\frac{dP}{d\theta} = -\frac{V}{k \cdot \omega \cdot R} \quad (5)$$

Onde V é o valor de tensão, ω é a rotação e R é resistência utilizada no amplificador para converter o sinal de corrente em tensão.

Os dados de pressão e da posição angular são captados, após o motor atingir um regime permanente de funcionamento termodinâmico, pelo sistema de aquisição de dados a cada 0.1 graus e transmitidos para um computador com uma interface que controla aquisição de dados, sendo registrados os dados de 100 ciclos consecutivos.

Os dados registrados são tratados numericamente, para posterior apresentação em gráficos de $P \times \theta$. Como os dados obtidos são da diferencial de pressão em relação à diferencial da posição angular θ , faz-se necessário uma integração numérica para se determinar os valores de pressão relativa. Para essa integração, utilizou-se o método de Runge-Kutta de quarta ordem, com a premissa de que a pressão no inicial é igual à pressão final de cada ciclo.

Como toda medição de pressão necessita de um referencial e nesse caso mais ainda devido ao fato de os valores obtidos com o transdutor de pressão ser um diferencial de pressão. Com a premissa destacada, podemos obter a variação de pressão (pressão relativa) durante todo o ciclo entre duas quaisquer posições angular diferentes, mas não podemos obter o valor de pressão absoluto, em relação a zero absoluto definido na Fig. 1.

Nos trabalhos de (Brut, 1997; Randolph, 1990 e Lee, 2008), encontram-se vários métodos para se determinar um referencial absoluto para esse tipo de medição. Para os objetivos deste trabalho, de apresentar uma metodologia para medição da pressão em um cilindro de combustão, optou-se por se aplicar o método que consiste em estabelecer a pressão do coletor de admissão como referência, o que não traz, de forma alguma, nenhum prejuízo aos objetivos deste trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados obtidos com o transdutor de pressão são diferenciais da tensão em relação à diferencial angular, conforme Fig. 7. Esse é o sinal típico desse tipo de medição, onde pode ser observado o período de injeção do combustível como uma pequena ascensão e logo em seguida um declive, compreendida no intervalo de -15 a -10° , seguido do início da ignição e então o ápice da explosão.

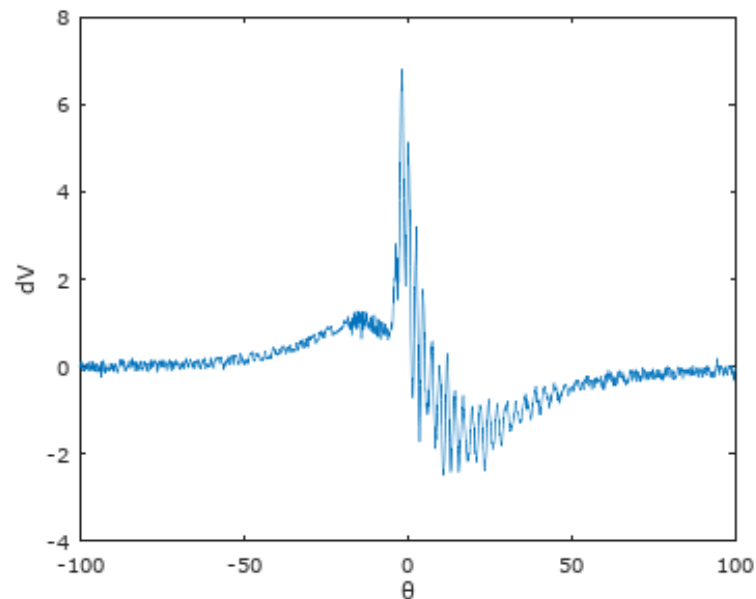


Figure 7 - Gráfico do sinal de saída em relação à variação do ângulo do virabrequim.

Esses dados são convertidos em diferenciais de pressão e integrados numericamente, para se obter a variação de pressão em função do ângulo de manivela, como mostrado na Fig. 8. Nota-se que a pressão máxima medida é de aproximadamente 62,0 bar, isso porque esses valores foram coletados em um regime de funcionamento do motor em média carga.

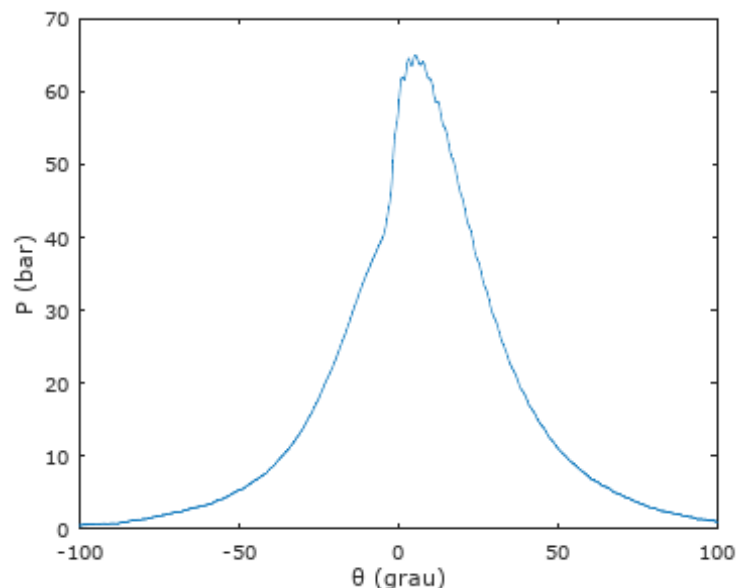


Figure 8 - Expressão dos resultados de pressão em função do ângulo de manivela.

Na Fig. 9 é apresentada a planilha utilizada para avaliação das principais fontes de incerteza presentes no processo de medição da pressão interna do cilindro de combustão, conforme foram identificadas na Fig. 5, considerando uma incerteza típica, segundo (Brut, 1997) de 0,2 bar para a pressão de referência. As demais fontes de incerteza foram estimadas com base nas informações fornecidas pelo fabricante, com os valores percentuais sendo calculados em relação ao valor máximo medido.

PLANILHA DE AVALIAÇÃO DAS FONTES DE INCERTEZA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO								
Atividade: Medição da pressão do cilindro de combustão								
FONTES DE INCERTEZA		Estimativa da fonte de incerteza		Tipo de avaliação	Tipo de distribuição	Coeficiente de sensibilidade	Fator de distribuição	Incerteza padrão
		Valor	Unidade					
1	Transdutor de pressão	0,5	%	B	Retangular	0,62	0,58	0,18
2	Temperatura	0,5	%	B	Retangular	0,62	0,58	0,18
3	Pressão de referência	0,2	bar	B	Retangular	1	0,58	0,12
4	Variações intra-ciclo	0,1	bar	B	Retangular	1	0,58	0,06
5	Variações entre ciclos	0,5	%	B	Retangular	0,62	0,58	0,18
Incerteza combinada				$U_C =$	0,34 bar			
INCERTEZA EXPANDIDA		$k = 2$		$U_{95\%} =$	0,67 bar			

Figure 9–Avaliação da incerteza dos resultados de medição.

5. CONCLUSÃO

A pressão no interior do cilindro de combustão durante a queima do combustível é um parâmetro utilizado em estudos como o de liberação de energia e outros. Com esse trabalho, apresentou-se uma metodologia para medição da pressão no interior do cilindro de combustão abordando desde aquisição, passando pelo processamento de dados até a apresentação dos resultados. A metodologia mostrou-se confiável e capaz de realizar medições de pressão com uma exatidão de $\pm 0,67 \text{ bar}$.

6. REFERÊNCIAS

- Albertazzi, A., Sousa, A. R., 2008, “Fundamentos de metrologia científica e industrial”, Barueri-SP, Manole.
- Asad, U., Kumar, R., Han, X., Zheng, M., 2011, “Precise instrumentation of a diesel single-cylinder research engine”, Measurement, v. 44 (2011), p. 1261-1278.
- Brut, M. F. J., Pond, C. R., 1997, “Evaluation of techniques for absolute cylinder pressure correction”, SAE Technical Paper 970036 (1997).
- Brut, M. F. J., Emtage, A. L., 1996, “Evaluation of IMEP routines and analysis errors”, SAE Technical Paper 960609 (1996).
- Bueno, A. V., Velásquez, J. A., Milanez, L. F., 2009, “A new engine indicating measurement procedure for combustion heat release analysis.”, Applied Thermal Engineering, v. 29 (2009), p. 1657-1675.
- Couto, P. R. G., Oliveira, L. H. P., Oliveira, J. S., Ferreira, P. L. S., 2010, “Calibração de transdutor/transmissor de pressão”, Guia de Calibração, Inmetro - DIMEC/gc-09/v.00.
- Eriksson, L., Thomasson, A., 2017, “Cylinder state estimation from measured cylinder pressure traces - a survey”, IFAC Paper OnLine, v. 50, p. 11029–11039.
- Heywood, J. B., 1988, “Internal Combustion Engine Fundamentals.”, McGraw-Hill series in mechanical engineering. McGraw-Hill.
- Júnior, A. P., 1988, “Amplificadores operacionais e filtros ativos: teoria, projetos, aplicações e laboratório”, São Paulo, McGraw-Hill.
- Lee, K., Yoon, M., Sunwoo, M., 2008, “A study on pegging methods for noisy cylinder pressure signal”, Control Engineering Practice, v. 16 (2008), p. 922-929.
- Randolph, A. L., 1990, “Methods of processing cylinder-pressure transducer signals to maximize data accuracy”, SAE Technical Paper 900170 (1990).
- Roberts, M. J., 2009, “Fundamentos em Sinais e Sistemas”, São Paulo, Mc Graw Hill.
- Webster, J. G., 1999, “the Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook”, CRC Press LLC.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

A METHODOLOGY FOR MEASURING PRESSURE ON THE COMBUSTION CYLINDER OF A DIESEL ENGINE

J.H.B. Silva, jackson.h.b.silva@gmail.com¹

F. A. F. Gomes, f.augustofgomes@gmail.com²

F.P.F. Dias, felipe.dias@fanor.edu.br³

D. C. Silva, daniel.carlos@alu.ufc.br¹

A.V. Bueno, bueno@ufc.br¹

¹ Universidade Federal do Ceará - UFC, CE, Brasil, Campus Universitário do PICI, Bloco 714, CEP 60455-760,

² Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, SP, Brasil, Rua Dr. Olímpio da Silva Miranda, nº 646, Cidade Universitária.

³ Faculdade do Nordeste – Devry, CE, Brasil, Rua Jornalista Nertan Macedo, nº 165, Cocó, CEP 60192-450,

Abstract. *Many parameters used for analysis and development in the area of internal combustion engines are based on measured pressure values in the cylinder during the burning of the fuel. Therefore, the quality of these analyzes is directly related to the precision of the values obtained for the pressure during the process under study. This work proposes a methodology for the acquisition, processing and expression of pressure measurement results in the combustion cylinder using a piezoelectric pressure transducer. The proposed methodology was experimentally applied to measure the pressure in the combustion cylinder of a diesel engine during the burning of biofuels. In this application, methods were used to minimize errors in determining a reference pressure for the treatment of data obtained with the piezoelectric transducer, thus achieving a better quality and a greater reliability in the results with an accuracy of $\pm 0,67$ bar.*

Keywords: *pressure measurement, piezoelectric sensor, internal combustion.*