



JOSÉ LIMA JÚNIOR

**ANÁLISE COMPARATIVA DE VIBRAÇÃO EM MOTORES
CICLO DIESEL COM COMBUSTÍVEL COMERCIAL E
BIODIESEL**

**LAVRAS-MG
2018**

JOSÉ LIMA JÚNIOR

**ANÁLISE COMPARATIVA DE VIBRAÇÃO EM MOTORES CICLO DIESEL COM
COMBUSTÍVEL COMERCIAL E BIODIESEL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, área de concentração em Engenharia de Sistemas e Automação, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães
Orientador

Prof. Dr. Danton Diego Ferreira
Coorientador

**LAVRAS-MG
2018**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA,
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Lima Júnior, José.

Análise comparativa de vibração em motores ciclo diesel com
combustível comercial e biodiesel / José Lima Júnior. - 2018.

78 p. : il.

Orientador: Ricardo Rodrigues Magalhães.

Coorientador: Danton Diego Ferreira.

Dissertação (Mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Combustão interna. 2. Vibração. 3. Biodiesel. I. Magalhães,
Ricardo Rodrigues. II. Ferreira, Danton Diego. III. Título.

JOSÉ LIMA JÚNIOR

**ANÁLISE COMPARATIVA DE VIBRAÇÃO EM MOTORES CICLO DIESEL COM
COMBUSTÍVEL COMERCIAL E BIODIESEL**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF VIBRATION IN DIESEL CYCLE MOTORS WITH
COMMERCIAL FUEL AND BIODIESEL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, área de concentração em Engenharia de Sistemas e Automação, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 30 de maio de 2018.

Prof. Dr. Adriano Viana Ensinas UFLA
Prof. Dr. Paulo Henrique Cruz Pereira CEFET/MG

Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães
Orientador

Prof. Dr. Danton Diego Ferreira
Coorientador

**LAVRAS-MG
2018**

À minha esposa Renata e aos meus filhos Júnia e Renan, pelo carinho e compreensão dispensados durante a execução deste trabalho.

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao departamento de Engenharia e à coordenação da Engenharia de Sistemas e Automação, pela oportunidade.

Ao Sr. Edersom Reis dos Santos, representante da empresa Vibramec, por ter cedido os equipamentos para a execução dos experimentos e por ter auxiliado na referida execução.

A Lima Jr. Manutenções Automotivas, por ter cedido espaço e materiais diversos que tornaram possível a execução dos experimentos.

Aos Professores Ricardo Rodrigues Magalhães e Danton Diego Ferreira, pela orientação, paciência e disposição em ajudar quando preciso.

A todos os colegas de curso que, durante esta jornada, ajudaram de alguma forma na conclusão deste trabalho e das outras atividades durante o curso.

À minha esposa Renata e aos meus filhos Júnia e Renan, pela minha ausência em alguns momentos, pela ajuda e compreensão.

“Desconfie do destino e acredite em você. Gaste mais horas realizando que sonhando, fazendo que planejando, vivendo que esperando porque, embora quem quase morre esteja vivo, quem quase vive já morreu.” (Sarah Westphal)

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho foi analisar as vibrações decorrentes de um motor de combustão interna ciclo diesel, utilizando dois combustíveis diferentes, o diesel comercial (B8) e o Biodiesel (B100). Além disso, foram analisados, como dados complementares, o consumo de combustível por ciclo de funcionamento, o nível de particulados emitidos na atmosfera e a temperatura do motor. Para isso, experimentos foram realizados com o motor instalado no veículo de forma não invasiva. A partir dos resultados experimentais, foi possível verificar a perda energética do motor em relação à vibração, levando-se em consideração os dois tipos de combustíveis testados (B8 e B100), a partir de sinais de vibração coletados no bloco do motor. Os testes foram realizados, levando-se em consideração três rotações distintas: 800 rpm, que corresponde a marcha lenta, 1800 rpm que corresponde a rotação relativa ao torque máximo do motor e 3600 rpm, que corresponde a rotação de maior potência do motor. Os dados levantados permitiram uma avaliação quantitativa de como cada combustível influencia no nível de vibração do motor. Nas três rotações analisadas, o diesel B8, apresentou um índice de vibração superior quando comparado ao B100 e a temperatura se manteve constante. Apesar do consumo utilizando o biodiesel B100 ter apresentado valores ligeiramente superiores, o nível de particulado emitido na atmosfera foi inferior. Notou-se ainda que a vibração aumentou nos dois casos analisados, a medida em que se aumentou a rotação do motor. O diesel B8 apresentou uma velocidade total de vibração, variando de acordo com a com a rotação, entre 4,5 a 21%, superiores ao B100. Como consequência, a energia dissipada por meio da vibração foi maior utilizando o diesel B8 em relação ao B100. Com isso, pôde-se concluir que o tipo de combustível está diretamente relacionado ao nível de vibração em motores a combustão interna.

Palavras-chave: Combustão interna. Vibração. Biodiesel.

ABSTRACT

The main objective of this study is to analyze the vibrations arising from an internal combustion cycle diesel engine using two different fuels, commercial diesel (B8) and Biodiesel (B100). In addition, the consumption, the level of particulate emitted in the atmosphere and the temperature of the engine were analyzed as complementary data. Experiments were performed with the motor non-invasively installed in the vehicle. From the experimental results, it was possible to verify the energetic loss of the engine, taking into account the two types of tested fuels (B8 and B100) from the collected vibration signals. The tests were carried out taking into account three distinct rotations: 800 rpm, which corresponds to idle, 1800 rpm that corresponds to the rotation relative to the maximum torque of the engine and 3600 rpm, which corresponds to the rotation of higher engine power. The data collected allowed a quantitative assessment of how each fuel influences the vibration level of the engine. In the three analyzed rotations, diesel B8 showed to be more energetic in relation to the vibration level when compared to B100 and the temperature remained constant. Although the consumption using biodiesel B100 presented values slightly higher, the level of particulate emitted to the atmosphere was inferior. It was also noted that the vibration increased in both cases, as the engine speed increased, being the diesel B8 presented a total vibration index with rotations ranging from 4.5 to 21%, presenting values higher than B100. Therefore, the dissipated vibration energy was higher using the B8 diesel, which was 10 to 45% higher than the B100, taking into account engine rotation. With this, it is concluded that combustion generates higher level of vibration in internal combustion engines, depending on the kind of used fuel.

Keywords: Internal combustion. Vibration. Biodiesel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Primeira Máquina Térmica de Héron.	18
Figura 2 - Bloco de um motor a combustão interna.	21
Figura 3 - Cabeçote do motor.	22
Figura 4 - Sistema biela-manivela.	23
Figura 5 - Pistão do motor com anéis.	24
Figura 6 - Virabrequim do motor.	25
Figura 7 - Representação do PMS/PMI.	25
Figura 8 - Representação de um sinal em função do tempo.	33
Figura 9 - Representação de um sinal em função da frequência.	33
Figura 10 - Princípio geral do funcionamento de um acelerômetro.	37
Figura 11 - Efeito piezoelétrico em um cristal de quartzo.	38
Figura 12 - Construção de um sensor piezoelétrico.	39
Figura 13 - Estruturas de cristais piezoelétricos.	39
Figura 14 - Modos de vibração de sensores piezoelétricos.	40
Figura 15 - Esquema básico de um acelerômetro piezoelétrico.	41
Figura 16 - Reação de transesterificação para produção do Biodiesel.	44
Figura 17 - Motor 2.3 IVECO.	45
Figura 18 - Analisador de vibrações.	46
Figura 19 - Câmera termográfica.	46
Figura 20 - Sensor de detonação.	47
Figura 21 - Dispositivo conversor de sinal.	48
Figura 22 - Interface do Software <i>Soundcard Scope</i>	48
Figura 23 - Rasther Box TM 536.	49
Figura 24 - Interface Software Rasther PC.	49
Figura 25 - Multímetro digital e termopar utilizado nos experimentos.	50
Figura 26 - Confecção do suporte de fixação do acelerador.	51
Figura 27 - Suporte do acelerador pronto.	51
Figura 28 - Detalhe da posição onde foi fixado o suporte.	52
Figura 29 - Dispositivo de ajuste de rotação instalado.	52
Figura 30 - Motobomba de combustível.	53
Figura 31 - Reservatório instalado no veículo.	53
Figura 32 - Acelerômetro instalado posição vertical.	54

Figura 33 - Acelerômetro instalado posição Horizontal.....	54
Figura 34 - Câmera termográfica posicionada.	55
Figura 35 - <i>Scanner</i> instalado no veículo.	55
Figura 36 - Leitura da câmera termográfica.	56
Figura 37 - Tela mostrando comando para regeneração.....	57
Figura 38 - Sonda lambda.....	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Leitura vibração tendência horizontal B100 a 800 rpm.....	65
Gráfico 2 - Leitura vibração tendência horizontal B8 a 800 rpm.....	65
Gráfico 3 - Leitura vibração tendência horizontal B100 a 1800 rpm.....	66
Gráfico 4 - Leitura vibração tendência horizontal B8 a 1800 rpm.....	66
Gráfico 5 - Leitura vibração tendência horizontal B100 a 3600 rpm.....	67
Gráfico 6 - Leitura vibração tendência horizontal B8 a 3600 rpm.....	67
Gráfico 7 - Leitura vibração tendência vertical B8 a 800 rpm.....	68
Gráfico 8 - Leitura vibração tendência vertical B100 a 800 rpm.....	68
Gráfico 9 - Leitura vibração tendência vertical B100 a 1800 rpm.....	69
Gráfico 10 - Leitura vibração tendência vertical B8 a 1800 rpm.....	69
Gráfico 11 - Leitura vibração tendência vertical B100 a 3600 rpm.....	70
Gráfico 12 - Leitura vibração tendência vertical B8 a 3600 rpm.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Percentual de adição de biodiesel ao diesel fóssil.	43
Tabela 2 - Combustíveis utilizados nos ensaios.	45
Tabela 3 - Especificação dos limites de vibração, segundo a norma ISO 20816-1 (ABNT, 2016).....	60
Tabela 4 - Consumo de combustível.....	61
Tabela 5 - Comparativo pressão atmosférica x pressão turbina.	62
Tabela 6 - Pressão do sistema de injeção de combustível.	62
Tabela 7 - Leituras a 800 rpm.	63
Tabela 8 - Leituras a 1800 rpm.	64
Tabela 9 - Leituras a 3600 rpm.	64
Tabela 10 - Tabela do índice energético da vibração (IEV).....	71
Tabela 11 - Velocidade total de vibração e suas frequências.	71
Tabela 12 - Comparação dos resultados obtidos entre B8 e B100.	73

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.
B5	Óleo Diesel Fóssil contendo 5% de Biodiesel.
B8	Óleo Diesel Fóssil contendo 8% de Biodiesel.
B20	Óleo Diesel Fóssil contendo 20% de Biodiesel.
B100	100% Biodiesel.
COP 21	Conferência das Partes.
CV	Cavalo Vapor.
DFT	Transformada Discreta de Fourier.
EGR	<i>Exhaust gas recirculation</i> (Válvula de recirculação dos gases do escapamento).
FFT	Transformada Rápida de Fourier.
HZ	Hertz.
KS	Knock Sensor (Sensor de Detonação).
KW	Kilowatt.
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora.
NR	Norma Regulamentadora.
PMI	Ponto Morto Inferior.
PMS	Ponto Morto Superior.
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel.
PPM	Partes Por Milhão.
PZT	Zirconita Titanato de Chumbo.
RMS	Raiz do valor quadrático médio (<i>Root mean square</i>)
RPM	Rotações Por Minuto.
UCE	Unidade de controle eletrônico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Máquinas térmicas	18
2.2	Motores a combustão interna	19
2.2.1	Principais componentes dos motores a combustão interna	20
2.2.2	Partes fixas	20
2.2.2.1	Bloco do motor	20
2.2.2.2	Cabeçote do motor	21
2.2.2.3	Cárter do motor	22
2.2.3	Partes móveis	22
2.2.3.1	Sistema Biela-manivela	23
2.2.3.2	Pistão ou êmbolo	23
2.2.3.3	Biela	24
2.2.3.4	Eixo Virabrequim	24
2.3	Princípio de funcionamento dos motores a combustão interna	25
2.4	Classificação dos motores a combustão interna	26
2.4.1	Cilindrada	26
2.4.2	Tempos do motor	26
2.5	Motores ciclo diesel	27
2.5.1	Sistemas de alimentação	27
2.5.1.1	Sistema de injeção indireta	27
2.5.1.2	Sistema de injeção indireta	28
2.5.1.3	Gerenciamento eletrônico	28
2.5.1.4	Sistema de injeção eletrônica	29
2.6	Vibrações mecânicas	29
2.6.1	Vibração em motores de combustão interna	30
2.6.2	Parâmetros para a análise do espectro de vibrações	32
2.6.3	Sensores para análise de vibração	36
2.6.3.1	Sensores relativos	38
2.6.3.2	Sensores absolutos	38
2.6.3.3	O Sensor de detonação (KS)	38
3	COMBUSTÍVEIS	42
3.1	Óleo diesel	42
3.2	Biodiesel	43
3.3	Benefícios do uso do biodiesel	44
4	METODOLOGIA	45
4.1	Combustíveis utilizados	45
4.2	Motor utilizado	45
4.3	Analizador de vibrações	46
4.4	Câmera termográfica	46
4.5	Sensor de vibração	47
4.6	Conversor de sinal para entrada de áudio do computador	47
4.7	Scanner automotivo	49
4.8	Multímetro automotivo	50
4.9	Preparação Experimental	50
4.10	A realização dos experimentos	56
4.11	A coleta dos sinais de vibração	59
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61

5.1	Dados adicionais	61
5.2	Análise das vibrações do bloco	64
6	CONCLUSÕES	74
	REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

Segundo Martins (2006), por volta de 1885, o primeiro motor de combustão interna foi construído pelo engenheiro alemão Daimler, capaz de desenvolver potência suficiente para mover um veículo em condições de segurança e economia suficientes para a época. A partir de então, a necessidade de aprimoramentos nessas máquinas não parou, permanecendo até os dias atuais. Em 1893, Rudolf Diesel, outro engenheiro alemão, criou um motor de combustão interna capaz de funcionar com óleo de amendoim, o motor desenvolvido por Rudolf não precisava de componentes elétricos, a combustão acontecia com o aumento da temperatura da câmara, em decorrência da alta taxa de compressão, dessa forma o combustível entrava em combustão espontânea quando pulverizado.

A partir daí, os motores ciclo diesel começaram a ser utilizados em indústrias e em veículos pesados, como locomotivas, caminhões e navios. Em decorrência de seu rendimento, vida útil e a segurança de funcionamento serem maiores que nos motores ciclo OTTO, os motores ciclo diesel são usados para estas e outras aplicações até os dias atuais.

O PNPB (Programa Nacional de Produção e uso de Biodiesel) em conjunto com a aprovação da Lei 11.097/05, estabeleceram a adição obrigatória de 5% de biodiesel ao diesel fóssil. Atualmente, este percentual chega a 8% e deverá atingir 10% até março de 2019. Ficou a cargo do PNPB, a execução de testes e ensaios em motores, com o intuito de validar o uso da mistura B5, assegurando ao consumidor final a perfeita manutenção e garantia de veículos e equipamentos que utilizam motores ciclo diesel (BRASIL, 2005, 2018).

Segundo dados da Agência Nacional de Petróleo (BRASIL, 2017), para que o Brasil consiga atingir a meta estabelecida no Tratado de Paris (UNITED NATIONS, 2015), que é uma redução de 37% na emissão dos gases estufa até 2025, e 43% até 2030, será necessário um aumento do percentual de Biodiesel adicionado ao diesel fóssil que poderá chegar a 15% até 2025. Ainda segundo a Agência Nacional de Petróleo (BRASIL, 2017), existe uma previsão de crescimento da demanda por derivados de petróleo de 19% de 2016 a 2026. Portanto, o aumento no uso de biocombustíveis deverá superar esse valor para que se possa atingir as metas estabelecidas no Tratado de Paris (UNITED NATIONS, 2015).

Com base nesses dados, este trabalho tem como objetivo principal quantificar as vibrações no bloco de um determinado motor a combustão interna ciclo diesel, com a utilização de Diesel comercial (B8), que tem como composição básica 92% de diesel fóssil e 8% de biodiesel, e compará-las com as vibrações do mesmo motor utilizando biodiesel (B100), que é composto por 100% Biodiesel, permitindo, assim, uma análise das diferentes

reações ocasionadas por cada tipo de combustível e compará-las no intuito de mensurar sua variabilidade. Para isso, neste trabalho, abordam-se os tipos de sistemas de alimentação para motores ciclo diesel, o princípio de funcionamento do motor e os principais componentes do motor. Experimentos foram realizados com o motor instalado no veículo de forma não invasiva. A partir da interpretação dos resultados experimentais, foi possível a verificação do nível da perda energética, por meio da vibração do motor utilizando cada combustível (B8 e B100). Além disso, sinais de vibração foram coletados. Os testes foram realizados levando-se em consideração três rotações distintas: 800 rpm, que corresponde a marcha lenta, 1800 rpm que é corresponde a rotação relativa ao torque máximo do motor e 3600 rpm, que corresponde à rotação onde o motor entrega a maior potência, permitindo assim uma análise das diferentes reações ocasionadas com cada tipo de combustível e compará-las com o intuito de mensurar sua variabilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Máquinas térmicas

Maquinas térmicas são equipamentos capazes de converter energia térmica em energia mecânica. Grande parte dessas máquinas, trabalha retirando calor de uma fonte quente, uma parcela do calor é convertida em trabalho e o restante é transferido a uma fonte fria, concretizando, assim, o princípio de eficiência da máquina. Assim, quanto menor for a parcela perdida para a fonte fria, maior será a eficiência da máquina. No século XIX, os cientistas estabeleceram definitivamente que o calor é uma forma de energia, considerando então que o dispositivo criado por Héron no século 1 dC (FIGURA 1) pode ser considerado uma máquina térmica (POLAK et al., 2007).

Figura 1 - Primeira Máquina Térmica de Héron.



Fonte: Manera (2013).

Até o século XVII, as máquinas térmicas realizavam pequenos trabalhos em relação à grande quantidade de combustível que utilizavam, portanto possuíam um rendimento muito baixo. Foi então que o inventor escocês James Watt desenvolveu um novo tipo de máquina que substituiria posteriormente as existentes até então. O equipamento desenvolvido por Watt foi altamente utilizado em moinhos e bombas d'água, posteriormente iniciou-se a sua utilização em locomotivas, barcos a vapor e máquinas industriais, dando o pontapé inicial para a revolução industrial (MORAES et al., 2006).

2.2 Motores a combustão interna

Os motores de combustão interna são máquinas térmicas em que, no cilindro de trabalho, ocorre a transformação da energia química de um combustível em energia térmica e, posteriormente, em energia mecânica (MARTINS, 2006).

Segundo Gonçalves (2016), em 1860 surgiu a ideia de criar uma máquina que funcione com benzeno. Em 1866, a ideia foi concretizada por Nikolas August Otto. A ideia principal era de se criar um determinado equipamento no qual a mistura de um combustível mais um comburente, no caso o ar atmosférico, entrasse em combustão e que a energia liberada pudesse ser transformada em trabalho mecânico, este equipamento ficou conhecido como motor a combustão interna. Posteriormente, para homenagear seu inventor ganhou o nome de motores ciclo Otto.

Como acontece com toda invenção, os aperfeiçoamentos são contínuos, foi então que, em 1894, Rudolf Diesel apresentou uma alternativa para que os motores a combustão interna funcionassem sem o auxílio de circuitos elétricos, que eram relativamente complexos para a época. Assim surgiu o motor ciclo diesel, este equipamento era capaz de fazer com que um óleo vegetal entrasse em combustão somente com o aumento da temperatura, ocasionado pelo aumento da pressão do ar admitido para dentro da câmara de combustão. O primeiro motor de combustão interna que desenvolveu potência suficiente para mover um veículo com segurança e relativa economia foi desenvolvido por Gottlieb Daimler, um engenheiro alemão em 1886.

O motor diesel pode ser alimentado por óleos vegetais, e ajudará no desenvolvimento agrário dos países que vierem a utilizá-lo. O uso de óleos vegetais como combustível pode parecer insignificante hoje em dia. Mas com o tempo ir-se-a tornar tão importante quanto o petróleo e o carvão são atualmente (DIESEL, 1912 apud SILVA, 2014, p. 7).

Posteriormente à morte de Diesel, em 1913, a indústria do petróleo desenvolveu um tipo de óleo derivado do petróleo com características semelhantes a dos óleos vegetais, esse composto ganhou o nome de óleo diesel em homenagem a Rudolf. Naquela época, a grande vantagem do óleo diesel em relação aos outros combustíveis era o baixo custo, esse novo óleo ‘criado pela indústria petrolífera, pôs abaixo a ideia de Rudolf, que era a criação de um motor que funcionasse com óleo vegetal, no intuito de ajudar o desenvolvimento da agricultura em vários países onde o equipamento fosse utilizado (GONÇALVES, 2016).

2.2.1 Principais componentes dos motores a combustão interna

Os motores a combustão interna, independente do ciclo, Diesel ou Otto, são compostos por partes distintas, sendo elas estáticas ou dinâmicas. As partes estáticas são chamadas de fixas, cujas principais são: bloco do motor, cabeçote e cárter. As partes dinâmicas são chamadas de móveis, cujas principais são: Eixo virabrequim, eixo comando de válvulas, válvulas, bielas e pistões (MARTINS, 2006).

2.2.2 Partes fixas

As partes fixas de um motor à combustão interna são os principais componentes estáticos do motor e podem ser divididas em bloco do motor, cabeçote e cárter.

2.2.2.1 Bloco do motor

O bloco do motor (FIGURA 2), conhecido também como carcaça, é a maior peça do conjunto motor, pode ser considerada a estrutura de sustentação do motor a combustão interna, praticamente todas as peças que compõem esse equipamento ficam fixadas nesse componente, nele também estão os cilindros onde trabalham os pistões, que são responsáveis pela compressão da mistura ar/combustível no ciclo Otto ou somente ar no caso do ciclo diesel (LIMA JÚNIOR, 2011).

Os blocos mais comuns eram fabricados em ferro fundido, pelo fato de ser um material de baixo custo e fácil de ser trabalhado, porém, em razão do seu peso, hoje já são utilizadas ligas leves, que além de reduzir o peso proporcionam uma melhor condutividade térmica. Existem modelos onde os pistões não trabalham diretamente sobre o bloco, nos cilindros são adicionadas camisas fabricadas em materiais mais resistentes e com um coeficiente de atrito menor.

O controle de temperatura é feito, através de um fluido, normalmente algum tipo de anticongelante misturado com água. No bloco existem ainda dutos para a passagem de óleo lubrificante que flui, por meio de bombeamento forçado. Os modelos refrigerados a líquido apresentam a parte exterior lisa, já os modelos refrigerados a ar apresentam a superfície externa com aletas, aumentando-se a área de contato com o ar, facilitando assim a transferência de calor.

Figura 2 - Bloco de um motor a combustão interna.



Fonte: Retifica Vila Maria (2016).

O bloco do motor também define a posição dos cilindros, que podem ser:

- a) Em linha: os cilindros ficam dispostos linearmente um atrás do outro;
- b) Em V: os cilindros ficam dispostos em duas fileiras formando o formato de um V;
- c) Cilindros opostos ou boxer: os cilindros ficam dispostos uns contra os outros.

2.2.2.2 Cabeçote do motor

O cabeçote do motor é a parte superior do motor, nele ficam alojadas as válvulas de entrada e saída de gases para o cilindro (FIGURA 3), ele é responsável pelo fechamento da câmara de combustão, também comporta os dutos por onde escoam os gases de entrada e saída dos cilindros. O material mais comum utilizado para a fabricação do cabeçote são ligas de alumínio, pois, são relativamente fáceis de se trabalhar, são leves e têm uma boa condutividade térmica. Pelo fato do alumínio ter baixa resistência mecânica superficial, nele são alocados vários componentes de materiais mais resistentes com o intuito de se obter maior durabilidade e funcionalidade da peça.

O cabeçote fica fixado na parte superior do bloco, como há um fluxo de gases e fluídos entre as peças, a estanqueidade deve ser mantida entre os dois componentes, para isso usa-se uma junta confeccionada em materiais especiais que suportem as pressões elevadas e as variações de temperatura.

Figura 3 - Cabeçote do motor.



Fonte: Do autor (2017).

2.2.2.3 Cárter do motor

Segundo Lima Júnior (2011), o cárter do motor a combustão interna é a tampa inferior do motor e serve de depósito para o óleo lubrificante, pode ser fabricado em chapa estampada ou alumínio fundido. O cárter também acumula a função de resfriar o óleo lubrificante, portanto os produzidos em alumínio são dotados de aletas para facilitar a troca térmica com o ambiente exterior, em seu interior existem divisões que servem para conter a movimentação do óleo lubrificante, quando o veículo está em movimento, na parte inferior do cárter fica localizado o bujão para a drenagem do óleo do motor.

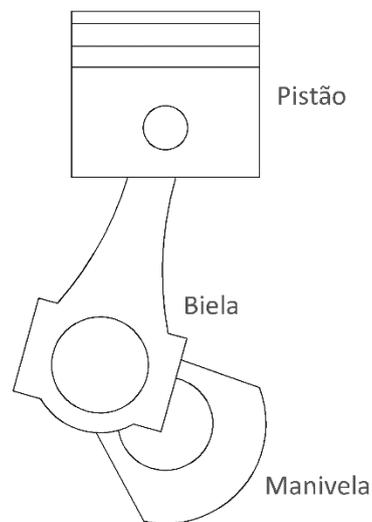
2.2.3 Partes móveis

As partes móveis de um motor a combustão interna são os principais componentes dinâmicos e podem ser divididas em pistão ou êmbolo, biela e o eixo virabrequim, os quais formam o sistema biela-manivela, responsável pela movimentação dentro do motor.

2.2.3.1 Sistema Biela-manivela

O conjunto é composto pelo pistão, a biela e o virabrequim, sua função é transformar a energia resultante da combustão em uma forma de energia mecânica. A grande expansão dos gases no momento da combustão desloca o pistão para baixo descrevendo um movimento linear (FIGURA 4).

Figura 4 - Sistema biela-manivela.



Fonte: Do autor (2017).

2.2.3.2 Pistão ou êmbolo

O pistão ou êmbolo é a parte móvel da câmara de combustão, serve de guia para a biela, é o componente responsável por receber a energia liberada pela combustão e direcioná-la para a biela, assim começa a transformação da energia térmica em energia mecânica (trabalho). A grande expansão dos gases no momento da combustão desloca o pistão para baixo, descrevendo um movimento linear, esse movimento é transformado em movimento circular com o auxílio de biela e do eixo virabrequim. O pistão é um dos componentes mais solicitados do motor, pois descreve grandes velocidades e deve resistir a altas pressões e temperaturas provenientes da combustão.

Inicialmente, os pistões eram produzidos em ferro fundido, atualmente são fabricados em ligas de alumínio ou magnésio que têm baixa densidade e boa condutividade térmica. O pistão é composto por duas partes principais, cabeça e saia, a parte inferior (saia) é

responsável por manter seu alinhamento dentro do cilindro e de dissipar calor para as paredes do cilindro de trabalho, na cabeça existem canais onde ficam alojados os anéis de segmento, conforme Figura 5, estes são responsáveis pela estanqueidade entre pistão e cilindro. O Pistão é ligado à biela, por meio de um pino de aço que forma com a biela uma articulação permitindo o seu movimento.

Figura 5 - Pistão do motor com anéis.



Fonte: Do autor (2017).

2.2.3.3 Biela

A biela tem como finalidade principal transmitir o movimento retilíneo e alternativo do pistão ao virabrequim, transformando-o em movimento circular, por meio das manivelas do virabrequim. O corpo da biela é construído em perfil I para aumentar a resistência à flambagem, é fabricada pelo processo de forjamento em aço de alta resistência, ligas de alumínio e titânio.

2.2.3.4 Eixo Virabrequim

O eixo virabrequim recebe o movimento da biela e completa a transformação do movimento linear em circular, por meio de seu formato manivela (FIGURA 6), também é responsável por entregar o trabalho útil a ser utilizado. Seu processo de fabricação pode ser fundição ou forjamento. O virabrequim também é responsável pela movimentação de outros componentes como o comando de válvulas, bomba de óleo, bomba d'água e outros.

Figura 6 - Virabrequim do motor.



Fonte: Do autor (2017).

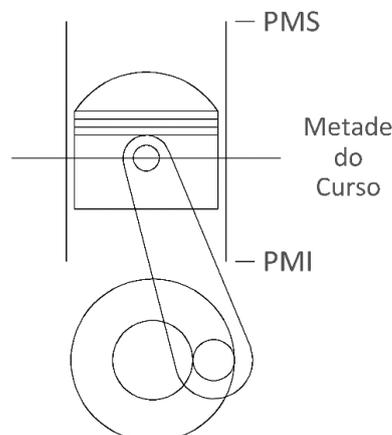
2.3 Princípio de funcionamento dos motores a combustão interna

Os motores a combustão interna aproveitam a elevação de temperatura e pressão proveniente da combustão, para desenvolver um movimento de rotação ao eixo principal do motor. O motor é composto por cilindros, onde deslizam pistões ligados a um eixo que tem o formato de manivela, por meio de peças designadas como bielas, se incidirmos alguma forma de movimento giratório, nesse eixo, inicia-se o processo de funcionamento (MARTINS, 2006).

Em uma das extremidades, esse eixo fica acoplado ao volante de inércia, uma peça com uma determinada massa, que é responsável por absorver os impactos resultantes das combustões sucessivas e acumular energia cinética, proporcionando, assim, um funcionamento suave ao motor.

Quando o pistão atinge sua maior altitude dentro do cilindro, ele assume a posição PMS (ponto morto superior), em contrapartida, quando ele atinge a posição mais baixa, está no PMI (ponto morto inferior) (FIGURA 7).

Figura 7 - Representação do PMS/PMI.



Fonte: Do autor (2018).

2.4 Classificação dos motores a combustão interna

Segundo Lima Júnior (2011), os motores podem ser classificados segundo o seu ciclo de funcionamento e segundo aos tempos de funcionamento, sua potência é restrita a um parâmetro denominado cilindrada.

2.4.1 Cilindrada

A cilindrada nada mais é que o volume deslocado pelo pistão dentro da camisa, multiplicado pelo número de cilindros do motor, e é expressa pela Equação 1.

$$C = \left(\pi \cdot \frac{D^2}{4} \right) \cdot c \cdot N \quad (1)$$

onde:

C = cilindrada do motor

D = diâmetro do embolo ou do cilindro

c = curso (distância entre o PMS e PMI)

N = número de cilindros do motor

2.4.2 Tempos do motor

Segundo Lima Júnior (2011), existem os motores de dois e quatro tempos. Os motores de dois tempos perfazem todo o ciclo de funcionamento com apenas uma volta do eixo principal. Quando o pistão está em movimento descendente, ele admite para dentro da câmara de combustão a mistura, já em movimento ascendente ele comprime a mistura a ser queimada. Os motores de dois tempos, não tem válvulas para a entrada e saída de gases na câmara de combustão, os gases transitam através de janelas existentes no pistão e no cilindro, ao se coincidirem as janelas permitem a entrada e saída dos gases no momento correto.

Os motores de quatro tempos são dotados de válvulas que ficam alojadas no cabeçote do motor, mais precisamente no topo da câmara de combustão, estas válvulas são responsáveis pela entrada e saída dos gases, para alimentação e descarga do motor.

Quando o pistão descreve um movimento descendente com a válvula de admissão aberta, o cilindro se preenche com a mistura ar mais combustível, esse movimento caracteriza o primeiro tempo do motor, a admissão, a válvula de admissão se fecha, permitindo a estanqueidade da câmara de combustão, então o pistão em movimento ascendente comprime a

mistura a ser queimada, quando está próximo de atingir o PMS (Ponto morto superior), é deflagrada uma centelha que inicia o processo de combustão. A combustão proporciona a expansão dos gases, essa expansão obriga o pistão a se deslocar em sentido descendente novamente, assim fica caracterizado o terceiro tempo do motor (combustão), é nesse momento que acontece a geração de potência no motor, após, por inércia, o embolo se desloca em movimento ascendente, e com a válvula de descarga aberta expulsa da câmara de combustão os gases resultantes da combustão. Portanto, os quatro tempos do motor à combustão interna são: Admissão, compressão, combustão e exaustão (LIMA JÚNIOR, 2011).

2.5 Motores ciclo diesel

Segundo Lima Júnior (2011), nos motores ciclo diesel, o movimento descendente do pistão aspira para dentro do cilindro, somente o ar atmosférico e não a mistura ar/combustível como nos motores ciclo Otto. A alta taxa de compressão desses motores, faz com que a temperatura do ar se eleve a tal ponto que, o combustível pulverizado no interior da câmara de combustão entre em combustão espontânea. A temperatura no interior da câmara de combustão pode atingir picos de 700°C, por esse motivo, não é necessário o uso das velas de ignição. Nos motores ciclo diesel, o volume de ar aspirado para o interior da câmara de combustão é sempre o mesmo, portanto, a velocidade de trabalho é controlada pela quantidade de combustível que é liberada para o cilindro. As máquinas a diesel, podem ser adaptadas para funcionar com qualquer tipo de combustível, porém o mais adequado é o óleo diesel destilado do óleo mineral cru.

2.5.1 Sistemas de alimentação

Sistema de alimentação é o conjunto de acessórios responsáveis pelo transporte e injeção de combustível, do reservatório até o interior da câmara de combustão, dentro dos parâmetros corretos e no momento certo.

2.5.1.1 Sistema de injeção indireta

O sistema basicamente é constituído de uma bomba sequencial inteiramente mecânica sincronizada com o motor, por meio de correias sincronizadoras ou engrenagens. Um bico

injetor para cada cilindro, esses bicos ficam alojados no cabeçote do motor, sendo ligados aos elementos de injeção da bomba injetora, por meio de tubos metálicos, embora contrarie o princípio de Pascal, é comprovado na prática que esses tubos devem ser iguais em espessura e comprimento, para que não se tenha diferença de pressão e vazão nos bicos injetores entre os cilindros. A bomba injeta o óleo combustível sequencialmente, através dos bicos injetores na ordem e no momento correto em que ocorrerá a explosão nos cilindros. Nesses tipos de motores, a combustão tem início em uma câmara secundária, denominada anticâmara, propagando-se para a câmara principal. A maior parte da energia da queima quase instantânea do combustível acumulado durante o período de retardo, é utilizada na anticâmara. É possível construir motores mais leves, pois os êmbolos, bielas e árvores de manivelas, não são submetidos completamente à explosão, que se dá em parte na anticâmara. Assim, tem-se motores mais silenciosos, leves e com um sistema de injeção simples, já que podemos trabalhar com pressões da ordem de 80 a 150 g/cm² em injetores de pinos (LIMA JÚNIOR, 2011).

2.5.1.2 Sistema de injeção indireta

Esse sistema é muito parecido com o sistema abordado anteriormente, a diferença básica é que o bico injetor, alojado também no cabeçote, injeta o óleo diretamente na câmara de combustão dispensando a anticâmara. Em consequência disso o bico injetor deve ser mais resistente e bem elaborado, pelo fato do seu elemento de injeção estar em contato direto com a câmara no momento em que se dá a combustão da mistura, em contrapartida em razão da combustão se iniciar na própria câmara, consegue-se uma eficiência maior do sistema.

Com a melhor combustão, também teremos mais ruídos provenientes do motor, precisamos de componentes internos, como pistão biela e virabrequim mais robustos e, conseqüentemente, teremos um motor maior e mais pesado, por outro lado teremos substanciais melhoras de emissões de poluentes e as partidas com o motor frio, são muito mais fáceis (LIMA JÚNIOR, 2011).

2.5.1.3 Gerenciamento eletrônico

Este sistema é constituído de uma bomba injetora mecânica semelhante a convencional, porém a taxa de injeção de combustível da bomba e a marcha lenta são controladas eletronicamente por uma central que recebe informações dos vários sensores

instalados no motor e na bomba injetora, esse tipo de sistema não é muito usual, pelo alto custo e baixa eficiência. Esse sistema foi desenvolvido por algumas montadoras para conseguir adequar as emissões de poluentes aos níveis exigidos pela legislação brasileira, na época do seu desenvolvimento (LIMA JÚNIOR, 2011).

2.5.1.4 Sistema de injeção eletrônica

Ainda segundo Lima Júnior (2011), o sistema de injeção eletrônica à diesel, é uma das maiores evoluções dos motores ciclo diesel até hoje, com esse sistema conseguiu-se uma melhor eficiência dos motores, atingindo níveis melhores de consumo de combustível, consequentemente menores índices de emissão de poluentes na atmosfera, e maior rendimento do motor. Como nos motores ciclo Otto, o ciclo diesel também possui um sistema inteligente que controla, eletronicamente, a injeção. Assim, o sistema de injeção eletrônica, denominado tubo comum ou do inglês, common rail, utiliza componentes que sentem as reações decorrentes do funcionamento do motor, captando sensações de temperatura, pressão, volume e posicionamento dos eixos. Essa função é executada por sensores que estão posicionados estrategicamente e reagem aos acontecimentos emitindo sinais elétricos, através de uma linha serial de comunicação de dados para a unidade central de comando.

2.6 Vibrações mecânicas

Segundo Monteiro (2013), vibração é um movimento de oscilação de um determinado corpo ao redor de uma referência, podemos defini-la como periódica ou aleatória. Nos motores à combustão interna, podemos dizer que a vibração é resultado das sucessivas combustões e da realização de torque no eixo virabrequim.

A vibração é um processo que envolve transferência de energia potencial para cinética e vice-versa, de maneira alternada. Quando trabalhamos com sistemas amortecidos, uma parcela dessa energia é dissipada pelo amortecimento, devendo, portanto, ser substituída por uma fonte externa, quando for preciso manter a vibração permanente (SILVA, 2000).

As vibrações podem ser livres ou forçadas. A vibração é dita livre, quando um sistema, depois de sofrer uma perturbação inicial, mantém sua vibração por conta própria, essa vibração que resulta, pode ser considerada como sendo uma vibração livre, pois, nenhuma força está atuando sobre o sistema. Um determinado sistema vibratório, terá quantas frequências naturais, quantos forem os graus de liberdade do sistema.

A vibração é dita forçada, quando existe uma força externa atuando sobre o sistema. O movimento vibratório que surge, por exemplo, em máquinas como os motores ciclo diesel, é um exemplo claro de vibração forçada (RAO, 2009).

De acordo com Rao (2009), os efeitos vibratórios podem ser de origem natural em sistemas mecânicos na engenharia, em decorrência do comportamento dinâmico natural, portanto, as forças que causam as vibrações podem ser geradas internamente dentro de um sistema dinâmico ou por meio de formas de excitação, lembrando que, se a frequência de excitação se igualar com o movimento natural, o sistema responderá de forma mais rigorosa aumentando sua amplitude. Esse fato é conhecido como ressonância, e podemos tratá-la de frequência de ressonância.

O estudo de um sistema vibratório pode ser feito no domínio do tempo ou da frequência. Quando analisamos no domínio do tempo, a variável independente de um sinal de vibração é o tempo. Assim, o próprio sistema pode ser desenvolvido como um conjunto de equações diferenciais em função do tempo. Em relação à frequência, a variável independente de um sinal de vibração é a própria frequência. Dessa forma, o sistema pode ser modelado por funções de transferência entrada-saída que tem formas algébricas, em vez de diferencial. A conversão do sinal, se dá por meio da transformada de Fourier, que é um caso específico da transformada de Laplace (RAO, 2009).

2.6.1 Vibração em motores de combustão interna

Segundo Monteiro (2013), os veículos podem ser classificados conforme a fonte geradora de vibração e conforme seu peso, capacidade ou potência, podendo ser: comerciais leves, comerciais pesados, serviço público, pequenos, grandes e de grande desempenho. A geração de vibração, portanto, está condicionada ao comportamento do veículo e seu respectivo tipo. Para determinar a relação entre vibração, supõe-se que a vibração pertinente ao funcionamento do motor tenha, como principal fonte, a realização de trabalho em forma de torque no eixo principal do motor. A efêmera expansão dos gases provenientes da combustão força o pistão para baixo, aplicando um impulso na forma de torque ao eixo virabrequim, que é responsável por transmitir o movimento do motor. O motor é a principal fonte de energia vibratória em veículos, provenientes do motor, as vibrações são transmitidas para a cabine e, conseqüentemente, a seus ocupantes. Essas vibrações são provenientes basicamente da combustão e das forças mecânicas atuantes no sistema (SILVA, 2000).

A vibração de um sistema abarca a transferência alternada de sua energia potencial para energia cinética e de energia cinética para potencial. Se o sistema for amortecido, uma parcela da energia é dissipada em cada ciclo de vibração e deve ser substituída por uma fonte externa, se for preciso manter um regime permanente de vibração (SILVA, 2000).

De acordo com Heywood (1988), a vibração resultante da combustão varia de acordo com o tipo de combustível utilizado pelo motor. Geralmente, o índice vibracional é maior nos motores ciclo diesel, pois, sua taxa de compressão varia de 17:1 a 23:1, enquanto a dos motores ciclo Otto variam de 9:1 a 14:1. Já as vibrações de origem mecânica, tem uma menor influência que as geradas pela combustão, os maiores índices são provenientes dos pistões e válvulas. As vibrações oriundas dos pistões, têm como causa o impacto deste com as paredes do cilindro e as das válvulas podem ser ocasionadas pelo contato metálico repentino entre a válvula e a sede (MONTEIRO, 2013). O motor, portanto, é a principal fonte de vibração dos veículos. A partir dele, as vibrações são transmitidas para a carroceria e, conseqüentemente, sentidas pelos ocupantes do automóvel. As vibrações oriundas do motor dividem-se, basicamente em vibração proveniente do processo de combustão e vibração proveniente das forças mecânicas. Segundo Campos (2015), as vibrações em motores à combustão internas seguem a seguinte ordem: as vibrações horizontais são provenientes do bloco do motor; as vibrações axiais são provenientes, do eixo do motor; e vibrações verticais são oriundas da câmara de combustão, dessa forma um estudo da vibração na posição vertical é o mais adequado para a análise de vibração proveniente do combustível utilizado.

A vibração relativa ao processo de combustão é ocasionada pela reação de explosão da mistura ar combustível sob alta pressão e temperatura no interior da câmara de combustão. O tipo de combustível utilizado tem influência direta pois estabelece características particulares para esse tipo de vibração. Nos motores ciclo Diesel, em razão de sua elevada taxa de compressão, as vibrações têm um nível mais elevado em relação aos motores do ciclo OTTO. A taxa de compressão do motor Diesel, varia entre 17:1 a 23:1 enquanto que a taxa de compressão dos motores do ciclo OTTO variam entre 9:1 e 14:1 (HEYWOOD, 1988).

Chun e Kim (1994) analisaram a vibração do bloco de um motor de quatro cilindros. Para isso, foi utilizado o método do filtro passa faixa, degrau e derivada terceira. Dessa maneira, ficou confirmado que o estudo dos sinais de vibração pode auxiliar na determinação da detecção de batidas e também para evitar frequências de ressonância que podem ser prejudiciais à máquina.

Também foram realizados estudos sobre diagnósticos de falhas em motores de combustão interna, por meio da análise de vibrações por Wu e Chuang (2005). Nesses estudos, foram utilizados sinais de vibração e sinais acústicos, os referidos sinais foram utilizados a fim de monitorar diferentes faixas de rotação de uma máquina, por meio da comparação digital de imagens, tais comparações resultavam em falha e não falha.

A alteração de parâmetros do sistema de injeção de combustível também pode afetar as vibrações em diferentes pontos do bloco do motor. Isso foi observado por Carlucci, Chiara e Laforgia (2006), utilizando acelerômetros em pontos diferentes do bloco do motor e variando parâmetros como tempo, quantidade e pressão de injeção de combustível foi observado, após as análises por Fourier e Tempo-frequência, que se estabelecermos uma relação entre a variação de parâmetros e os sinais de vibração, podemos construir um indicador de diagnóstico muito útil e barato.

Michel (2005), realizou testes em caminhões da Tetra Park, utilizando uma mistura B20 (20% de biodiesel e 80% de diesel fóssil). O estudo verificou desgaste e nível de emissões do motor. Os resultados mostraram que o índice de poluição foi reduzido e o desgaste foi praticamente o mesmo, indicando que o biodiesel é uma alternativa para a substituição de combustíveis de origem fóssil.

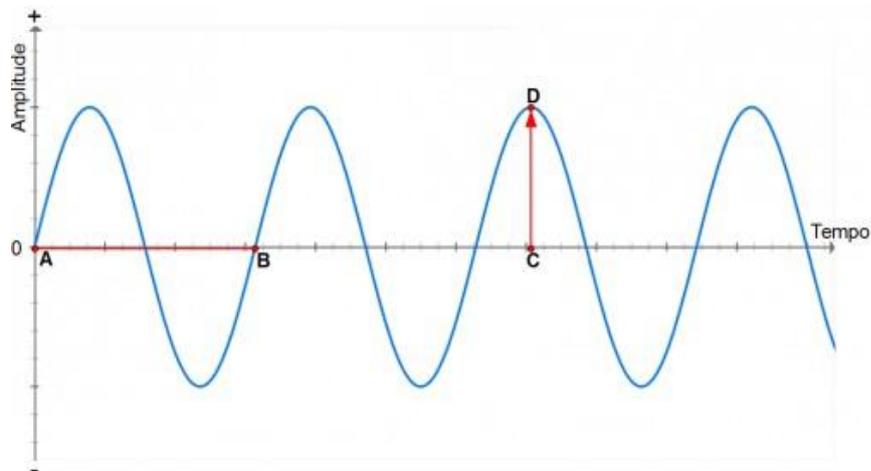
Em testes realizados por Souza (2005), utilizando um motor estacionário, foram levantadas as curvas de torque, emissões e potência versus a rotação do motor. As diferenças detectadas não foram consideradas significativas, evidenciando que a utilização do biodiesel pode ser realizada em motores de pequeno porte sem maiores problemas.

Volpato et al. (2012) realizaram medições de desempenho em um motor multicilíndrico, alimentado com Biodiesel B100. Como resultado, ficou comprovado que o motor obteve um ganho de torque e teve um consumo específico menor quando comparado com o uso do Diesel fóssil. O estudo citado também mostrou que um motor ciclo diesel pode perfeitamente funcionar com o Biodiesel B100 sem maiores problemas em se tratando de torque e consumo.

2.6.2 Parâmetros para a análise do espectro de vibrações

Conforme Souza (2016), para a análise do espectro de vibrações, primeiramente deve-se analisar o sinal no domínio do tempo (FIGURA 8).

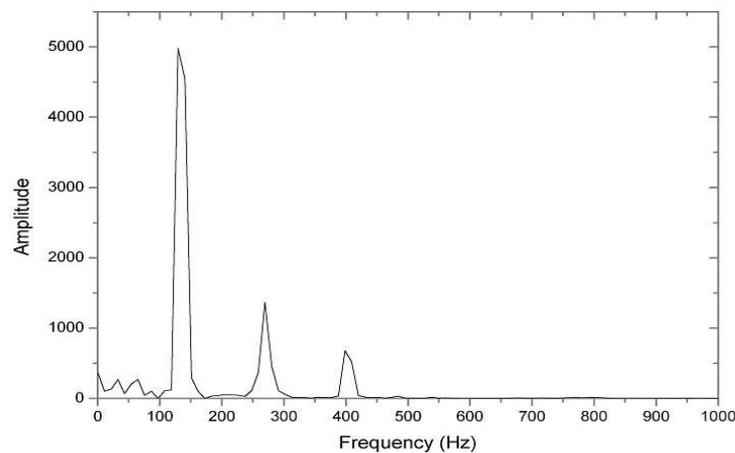
Figura 8 - Representação de um sinal em função do tempo.



Fonte: Souza (2016).

Porém, Souza (2016) afirma que é mais interessante analisar o sinal no domínio da frequência, pois dessa maneira, é possível observar a frequência principal do sinal, bem como os harmônicos que compõem o mesmo, (FIGURA 9).

Figura 9 - Representação de um sinal em função da frequência.



Fonte: Souza (2016).

Observa-se, na figura 9, que a frequência principal se encontra em torno de 100 Hz e que existem também harmônicos presentes na análise do sinal, assim ficam claros os picos de frequência. Para transformar um sinal que é representado no domínio do tempo, em um sinal representado no domínio da frequência, utiliza-se a Transformada Discreta de Fourier. Para representar um sinal analógico e reconstruí-lo com o mínimo de perdas possível, deve-se amostrá-lo com o dobro da sua frequência, esse método é conhecido como frequência de Nyquist, assim pode-se afirmar que f_s (frequência de Nyquist) deve ser o dobro de f_i (frequência de entrada), conforme equação 2.

$$f_s = 2f_i \quad (2)$$

Segundo Haykin e Veen (2005) e Oppenheim (1983), o principal objetivo da análise espectral é retratar a distribuição, no domínio da frequência, da intensidade de um sinal, conforme uma série de dados finitos. O espectro de potência exprime a existência ou ausência de padrões repetitivos e estruturais correlacionados no sinal de um processo. O método mais comum para análise espectral é baseada na Transformada Rápida de Fourier (FFT) (FERNANDEZ, 2006).

Um sinal periódico é representado pela Série de Fourier. Um sinal periódico $x(t)$ de período t_0 , pode ser representado por uma conjunção linear de exponenciais complexas harmonicamente relacionadas, denominadas por Série de Fourier de $x(t)$, equação 3, onde a_k é calculado pela equação 4 e ω_0 pela Equação 5.

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k e^{jk\omega_0 t} \quad (3)$$

$$a_k = \frac{1}{t_0} \int_{t_0}^0 x(t) e^{-j\omega_0 t} dt \quad (4)$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{t_0} \quad (5)$$

Na definição de a_k , é representada a integral sobre qualquer intervalo de comprimento t_0 . Os termos a_k são chamados de coeficientes de Fourier ou coeficientes espectrais de $x(t)$.

O coeficiente complexo a_k contempla a amplitude, que é uma medida de intensidade e a fase do conteúdo de frequência no sinal à $k\omega_0$ (Hz). Na equação 4, o coeficiente a_k pode ser interpretado como a medida da correlação do sinal $x(t)$ e a exponencial complexa $e^{-jk\omega_0 t}$.

Os resultados obtidos para sinais periódicos podem ser estendidos para se desenvolver uma representação para sinais aperiódicos como combinação linear de exponenciais complexas (SANCHEZ, 2002). Retomando a equação dos coeficientes de Fourier (3) para sinais periódicos, pode-se escrever a Equação 6.

$$\omega = k\omega_0 \quad (6)$$

Se ω for uma variável contínua, a última integral representa uma função que corresponde ao envelope de $t_0 a_k$, de forma que esses coeficientes são amostras igualmente espaçadas nesse envelope, espaçamento este igual a ω_0 . Assim, aumentando-se o valor de t_0 e diminuindo-se o valor de ω_0 , esse envelope é amostrado com menor espaçamento. Por outro lado, pode-se pensar em um sinal aperiódico como o limite de um sinal periódico, cujo período torna-se arbitrariamente grande. Então, com t_0 arbitrariamente grande, o produto dos coeficientes de Fourier por t_0 será cada vez mais próximo das amostras do envelope e, de certa forma, tende para esse envelope com $t_0 \rightarrow \infty$. Assim, pode-se tomar esse envelope como as Equações 7 e 8, onde $X(\omega)$ é definido como a Transformada de Fourier de $X(t)$ e $X(t)$ como a Transformada Inversa de Fourier de $X(\omega)$ (SANCHEZ, 2002).

$$x(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (7)$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (8)$$

$X(\omega)$ desempenha o mesmo papel para sinais aperiódicos que a Série de Fourier para sinais periódicos, ou seja, ambos correspondem à decomposição do sinal em uma combinação linear de exponenciais complexas. Para sinais periódicos, essas exponenciais complexas têm amplitudes a_k e ocorrem em um conjunto discreto de frequências harmonicamente relacionadas $k\omega_0$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Para sinais aperiódicos, essas exponenciais complexas ocorrem em um contínuo de frequências e tem amplitude $x(\omega) = \frac{d\omega}{2\pi}$. Em analogia à terminologia usada para os coeficientes da série de Fourier para sinais periódicos, a transformada $X(\omega)$, uma vez que fornece informações de como $X(t)$ é composto por sinais senoidais de diferentes frequências.

A Transformada de Fourier é a representação de uma função no domínio da frequência. Ela contém exatamente a mesma informação da função original, podendo, portanto, ser interpretada como a mesma informação (sinal) sob outra representação (SANCHEZ, 2002).

O espectro de potência de um sinal apresenta a distribuição da potência do sinal nas diversas frequências que o compõem. O espectro de potência é a transformada de Fourier da função de correlação e revela informações da estrutura de correlação de um sinal.

A vantagem da transformada de Fourier na análise de sinais e reconhecimento de padrões é a sua habilidade em revelar estruturas espectrais que podem ser usadas para caracterizar um sinal (FERNANDEZ, 2006).

Deve-se seguir os seguintes parâmetros para a medição de vibrações: deslocamento, velocidade ou aceleração. Esses parâmetros podem mostrar o quanto o equipamento está vibrando. Ao optar por qualquer um dos três parâmetros, a forma e o período da vibração permanecerão similares.

São universais as unidades de medida para esses parâmetros, sendo elas:

- a) Deslocamento: m, mm, μm ;
- b) Velocidade: m/s, mm/s;
- c) Aceleração: m/s^2 , Km/s^2 .

Para interpretar um sinal de vibração, utilizam-se sensores que transformam os sinais de vibração em sinais elétricos. Dessa forma, utilizam-se equipamentos ou softwares para realizar tais análises.

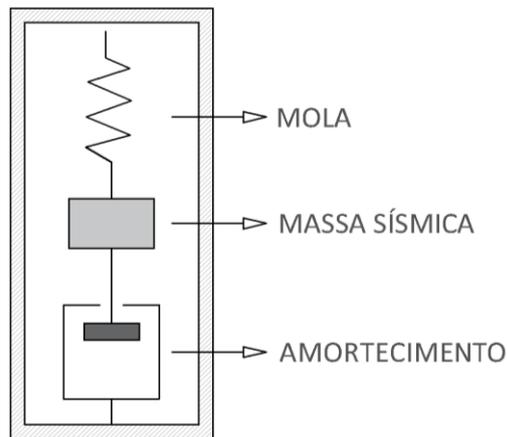
2.6.3 Sensores para análise de vibração

Segundo Capelli (2008), sensores são dispositivos capazes de receber um tipo de sinal e transformá-lo em sinal elétrico e vice-versa, os sensores podem monitorar ou detectar algo. A utilização dos sensores está condicionada basicamente ao tipo de material ou movimento a ser detectado. Os tipos de sensores mais utilizados são:

- a) Mecânicos;
- b) Magnéticos;
- c) Indutivos;
- d) Capacitivos;
- e) Ópticos;
- f) Ultrassônicos;
- g) De pressão.

Geralmente sensores de vibração são equipamentos capazes de codificar um tipo de sinal em um sinal elétrico representativo. Conforme Rêgo (2006) pode-se observar um sistema massa-mola subamortecido, Figura 10.

Figura 10 - Princípio geral do funcionamento de um acelerômetro.



Fonte: Do autor (2018).

A massa sísmica neste sistema (FIGURA 10) é o sensor mais utilizado para medição de aceleração. Assim como em todo o sistema massa-mola, quando se aplica uma aceleração ao conjunto, ocorre um deslocamento parcial da massa sísmica que retorna, por meio da ação da mola, à sua posição de equilíbrio quando a aceleração à qual ela foi submetida se encerrar.

Sob aceleração em estado estacionário, o deslocamento da massa sísmica é dado pelo produto da aceleração e pela relação entre o valor da massa e da constante da mola. Em condições dinâmicas, o amortecimento condiciona o valor da medição. Dessa forma, ao detectar-se o deslocamento da massa sísmica, obtêm-se a aceleração aplicada ao sensor. Existem várias maneiras de se detectar o deslocamento da massa sísmica, uma delas é por meio de acelerômetros (RÊGO, 2006).

Acelerômetros são sensores normalmente usados para monitorar mudanças de velocidade, aceleração em razão do choque, vibração ou impacto. Embora sejam usados em aplicações de medição de vibração, podem ser usados, por exemplo, para medir o ângulo da lança em guindastes, o ângulo da inclinação em maquinário de construção de estradas e em estudos de desvio de furos de sondagem. São empregados em navios, aviões e satélites (THOMAZINI; ALBURQUEQUE, 2009). Acelerômetros podem ser classificados em relativos e absolutos.

2.6.3.1 Sensores relativos

São sensores que trabalham sem contato físico com a máquina, são os mais utilizados para o monitoramento em máquinas rotativas. Consistem basicamente em uma bobina plástica ou cerâmica, que são materiais isolantes, alojadas em um corpo roscado (THOMAZINI; ALBURQUEQUE, 2009).

2.6.3.2 Sensores absolutos

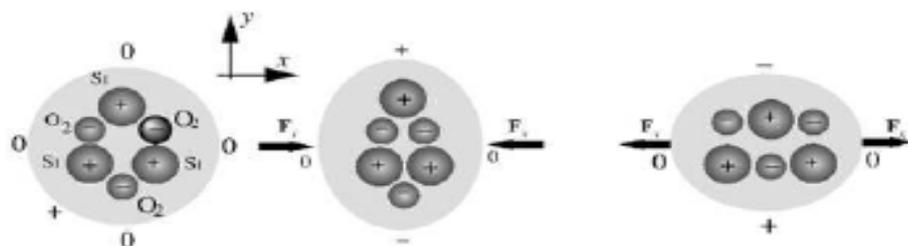
Segundo Thomazini e Albuquerque (2009), os sensores absolutos, também conhecidos como acelerômetros piezoelétricos, são os mais utilizados na coleta de dados para a análise de vibração em máquinas e equipamentos. Esses sensores possuem boa durabilidade e uma curva de resposta de qualidade. Em equipamentos onde se tem altos índices de vibração, esse sensor é uma das únicas alternativas para a medição.

2.6.3.3 O Sensor de detonação (KS)

O sensor de detonação, é um sensor do tipo piezoelétrico, amplamente utilizado pela indústria automotiva para a correção de parâmetros do sistema de injeção eletrônica de veículos, por meio de leituras de vibrações do bloco do motor. Segundo Fradem (2004), os sensores piezoelétricos são naturalmente aplicados na percepção de vibração e aceleração.

O efeito piezoelétrico se dá pela compressão ou tensionamento de um tipo de cristal, originando uma carga elétrica. Isso ocorre, porque o material tem seus dipolos invertidos, em razão de um campo magnético externo (FRADEM, 2004), Figura 11.

Figura 11 - Efeito piezoelétrico em um cristal de quartzo.

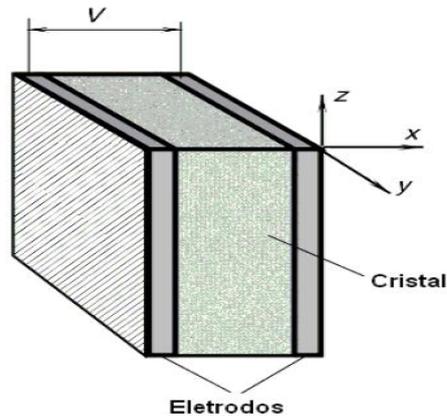


Fonte: Fradem (2004).

Ao aplicar uma tensão elétrica no piezoelétrico, gera-se uma tensão mecânica. Alguns transdutores piezoelétricos são montados com dois pinos específicos para se aplicar tensão

elétrica e outros dois onde é realizada a medição de saída. Na Figura 12, ilustra-se a montagem de um sensor piezoelétrico em forma de capacitor.

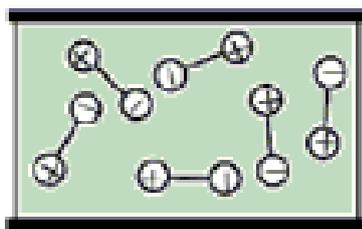
Figura 12 - Construção de um sensor piezoelétrico.



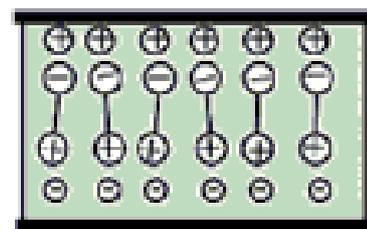
Fonte: Fradem (2004).

As células de cristal podem ser consideradas como dipolos elétricos. Em determinados materiais, como o quartzo, por exemplo, as células são naturalmente orientadas axialmente, ao longo dos eixos de aplicação do cristal, assim, o material tem sensibilidade ao tensionamento. Quando os materiais não possuem dipolos orientados é preciso que se realize o processo de polarização dos mesmos (FRADEM, 2004; MOHEIMANI; FLEMING, 2006). Tais formas de orientação cristalina são ilustradas na Figura 13.

Figura 13 - Estruturas de cristais piezoelétricos.



Cristal com dipolos não orientados



Cristal com dipolos orientados

Fonte: Fradem (2004).

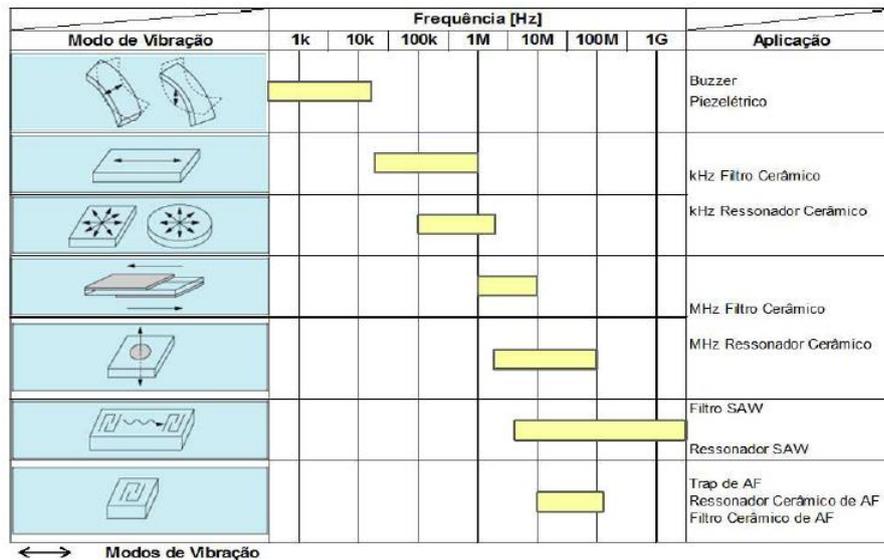
Para Janshoff e Steinem (2007), a chave para o controle de frequência na construção desses sensores é a forma do corte e a espessura do material, dessa forma temos um controle sobre sua estabilidade. A forma do corte do cristal leva em consideração a aplicação específica do sensor. Cada tipo de corte suporta diferentes modos de vibração, pois estas possuem diferentes velocidades. Fases de polarização determinam a eficiência de conversão de energia mecânica em elétrica (FRADEM, 2004).

Geralmente, são produzidos em função da velocidade de onda. Por isso, os cristais destinados à fabricação de sensores de detonação possuem um corte que proporciona um tensionamento na faixa de frequência em que o fenômeno ocorre.

Na Figura 14, observam-se os modos de vibração em função da frequência, e as aplicações de sensores piezoelétricos (MURATA, 2011).

Tais sensores trabalham em frequências baixas, que podem variar de 2 Hz até dezenas de Hertz, pois eles possuem limitação de ruído, linearidade e uma faixa de temperatura de trabalho de até 120oC sem perdas significativas. Os materiais mais usados como sensores são cerâmicas piezolétricas, como otitanato de bário, zirconita titanato de chumbo (PZT) e metaniobato de chumbo.

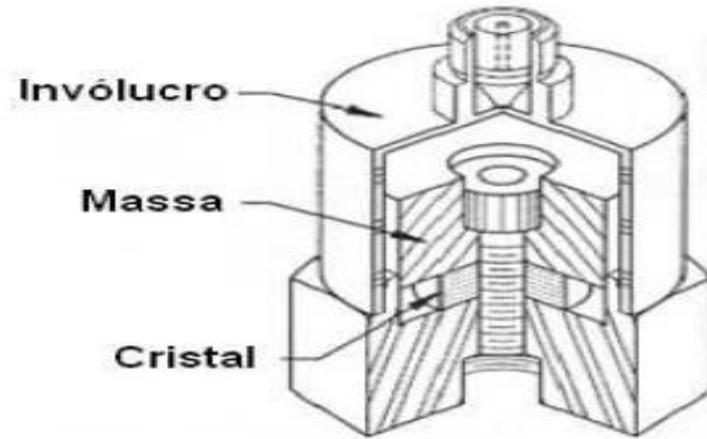
Figura 14 - Modos de vibração de sensores piezoelétricos.



Fonte: Murata (2011).

Em um acelerômetro piezoelétrico, o cristal é inserido entre a carcaça e a massa, a força é proporcionalmente transmitida ao cristal, por meio do conjunto de componentes (FIGURA 15). A aceleração da carcaça movimentada a massa relativa, esta exerce uma força sobre o cristal. O sinal de saída é diretamente proporcional a quantidade de aceleração ou vibração.

Figura 15 - Esquema básico de um acelerômetro piezoelétrico.



Fonte: Fradem (2004).

3 COMBUSTÍVEIS

São denominados combustíveis, segundo Monteiro (2013), todas as substâncias que, combinadas com o oxigênio presente no ar atmosférico reagem entre si na presença de uma fonte de calor, liberando uma grande quantidade de calor e luminosidade. Especificamente para motores diesel, é necessário que os combustíveis tenham duas características específicas:

- a) Poder calorífico, que pode ser definido como sendo a energia contida no combustível em seu estado inicial, essa energia será transformada, posteriormente, em força motriz;
- b) Ponto de fulgor, que é a mínima temperatura onde o combustível libera gases inflamáveis;
- c) Viscosidade, que é a capacidade de um fluido resistir ao escoamento;
- d) Densidade, que é a relação da massa pelo volume.

3.1 Óleo diesel

É um tipo de combustível, formado por hidrocarbonetos. Um composto formado basicamente por átomos de carbono, hidrogênio e por pequenas parcelas de enxofre, nitrogênio e oxigênio. É um composto inflamável de toxicidade mediana, límpido e volátil, é aplicado principalmente com combustível para motores de ignição por compressão.

É produzido pelo refino do petróleo e pode ser designado por leve e pesado, a este primeiro refino ainda são adicionados outros compostos com a nafta, o querosene e o gasóleo leve, isso resulta no óleo diesel encontrado nas bombas dos postos de combustível (FARAH, 1989).

A empresa Petrobrás produz e comercializa o diesel de baixo teor de enxofre (S50), que contem 50 PPM de enxofre desde 2009, em 2013 entrou no mercado o diesel intitulado (S10), que contém 10 PPM de enxofre, sendo considerado de baixíssimo teor de enxofre, a esses combustíveis ainda é adicionada uma porcentagem de Biodiesel que varia de 5% a 15% de acordo com o passar dos anos (PETROBRÁS, 2017).

3.2 Biodiesel

Segundo Ferrari et al. (2005), Biodiesel é um combustível usado em motores de ignição por compressão, produzido a partir de fontes renováveis, atendendo às normas da ANP (BRASIL, 2017). Pode ser definido também como um combustível de fonte renovável, oriundo de vegetais e animais.

De acordo com Brasil (2017), biodiesel pode ser definido como sendo um combustível de fonte renovável, obtido, por meio do processo de transesterificação, que é a reação de um óleo vegetal ou animal com um tipo de álcool primário, geralmente é utilizado o Metanol. No final do processo também é gerada a glicerina que atualmente é amplamente utilizada na produção de cosméticos e materiais de limpeza.

Ainda segundo Brasil (2017), o biodiesel vem sendo misturado ao Diesel derivado do petróleo desde 2003, seguindo em percentual de adição segundo a Tabela 1.

Tabela 1 - Percentual de adição de biodiesel ao diesel fóssil.

Percentual mistura Biodiesel ao Diesel fóssil	
2003	Facultativo
Jan/2008	2%
Jul/2008	3%
Jul/2009	4%
Jan/2010	5%
Ago/2014	6%
Nov/2014	7%
Mar/2017	8%
Mar/2018	9%
Mar/2019	10%

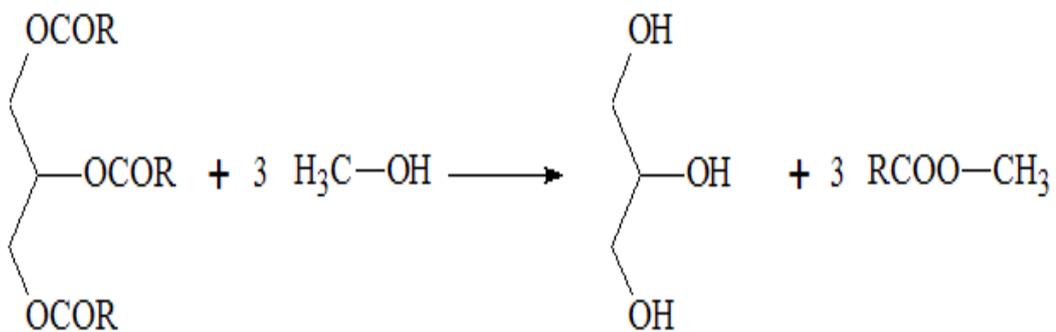
Fonte: Brasil (2017).

As características e especificações do Biodiesel vem sendo modernizadas constantemente, dessa maneira é possível manter sua adequação as normas internacionais, mantendo sua qualidade no mercado brasileiro, tornando o Brasil um país de destaque em relação ao restante do mundo. Juntamente com o etanol, fortalecem a participação nacional na matriz de fonte energética renovável e valoriza a imagem do país (BRASIL, 2017).

3.3 Benefícios do uso do biodiesel

Um dos grandes benefícios do uso do biodiesel, seja integralmente ou em frações, é a diminuição da emissão de poluentes na atmosfera. O fato de o biodiesel possuir oxigênio em suas moléculas, Figura 16, faz com que a combustão seja mais perfeita, portanto mais limpa (DEMIRBÁS, 2008).

Figura 16 - Reação de transesterificação para produção do Biodiesel.



Fonte: Catherine et al. (2016).

Outro benefício do Biodiesel é a utilização de fonte de energia oriunda de gordura animal, gorduras estas que se tornariam altamente poluentes na natureza (KRAUSE, 2008).

O Biodiesel é constituído basicamente por carbono neutro, dessa maneira não contribui para a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, quando utilizado em motores de combustão interna. Dessa forma, existe um equilíbrio entre a emissão de gases em veículos e gases absorvidos pelas plantas (CATHERINE et al., 2016).

4 METODOLOGIA

4.1 Combustíveis utilizados

Para a realização dos ensaios, foram utilizados o óleo Diesel convencional (B8) e o Biodiesel (B100), os quais são classificados conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Combustíveis utilizados nos ensaios.

Combustíveis utilizados		
	Denominação	Composição
Diesel convencional	B8	Óleo diesel S10 com 8% de Biodiesel
Biodiesel	B100	Biodiesel de Soja Etflico

Fonte: Do autor (2017).

4.2 Motor utilizado

O motor utilizado foi um IVECO de 04 cilindros, 2287 cilindradas, 16 válvulas, duplo comando de válvulas no cabeçote, bloco de ferro fundido e cabeçote de alumínio, potência máxima 127cv /3600 rpm, torque máximo (ABNT) 30,7 Kgfm/1800 rpm, taxa de compressão 19:1, turbo alimentado com injeção direta e controle eletrônico da Bosch, esse motor equipa, no Brasil, os veículos Ducato da montadora Fiat Automóveis, os veículos Jumper e Boxer do grupo PSA (Peugeot e Citroën) a partir de 2013 (FIGURA 17).

Figura 17 - Motor 2.3 IVECO.



Fonte: Do autor (2018).

4.3 Analisador de vibrações

O analisador de vibrações utilizado foi Vibexpert II fabricado pela empresa PRUFTECHNIK, conforme Figura 18.

Figura 18 - Analisador de vibrações.



Fonte: Do autor (2018).

4.4 Câmera termográfica

A câmera termográfica utilizada foi do tipo FLIR modelo E 40, os valores coletados por meio da câmera termográfica foram objetos de estudo para as análises (FIGURA 19).

Figura 19 - Câmera termográfica.



Fonte: Do autor (2018).

4.5 Sensor de vibração

Para a coleta auxiliar dos sinais de vibração, foram utilizados dois sensores de detonação da marca Bosch nº 0261231122/030905377.1. Os sensores de detonação são originalmente utilizados para que a central de comando eletrônico da injeção possa ajustar o ponto de ignição por meio do monitoramento de vibrações do bloco do motor. Optou-se por esse tipo de sensor para a coleta de dados, por ser um sensor utilizado em motores a combustão interna, acondicionado em uma capsula de proteção, que conta com um ponto determinado para fixação no local específico (NGK/NTK CERÂMICAS TÉCNICAS, 2017), Figura 20.

Figura 20 - Sensor de detonação.

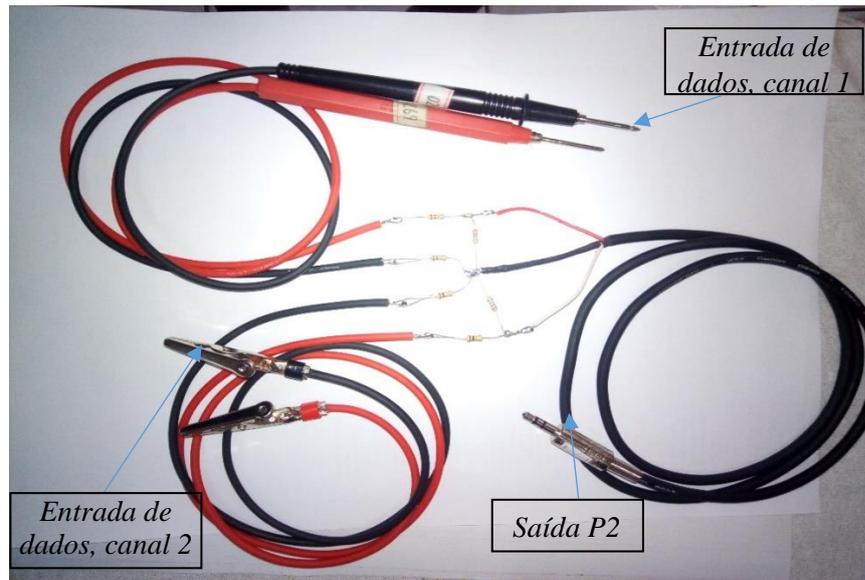


Fonte: Do autor (2018).

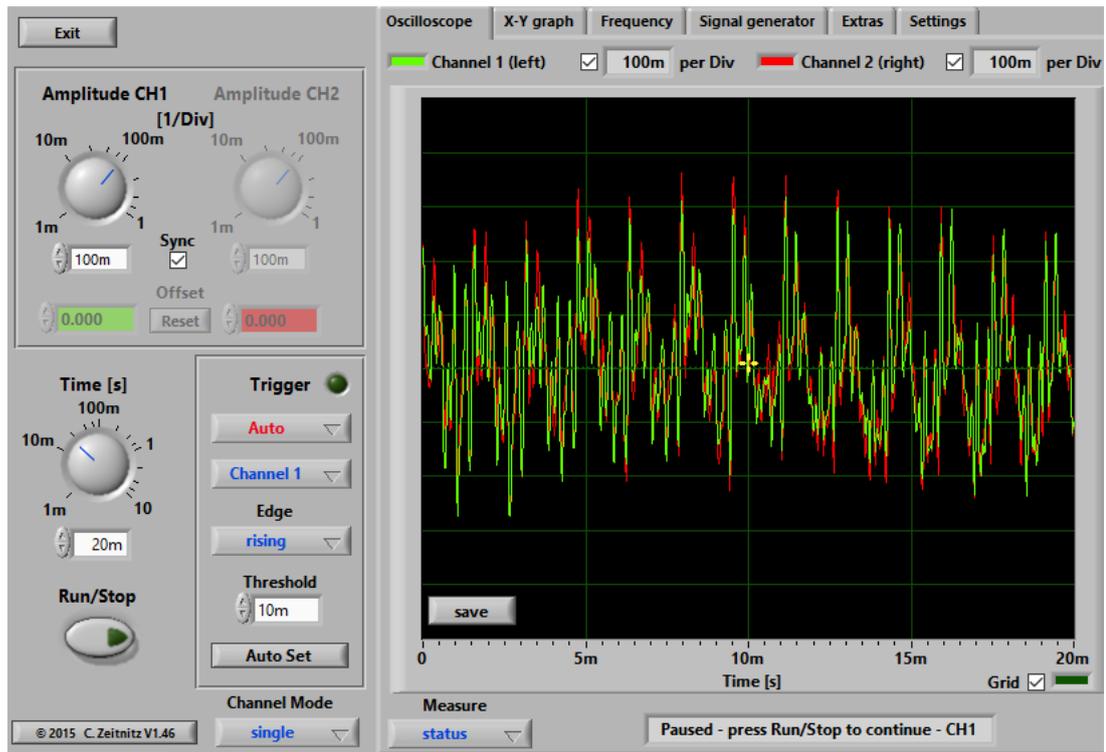
4.6 Conversor de sinal para entrada de áudio do computador

Para a coleta dos sinais elétricos, provenientes dos sensores de detonação, foi construído um dispositivo que converte os sinais elétricos gerados pelo acelerômetro em sinais compatíveis com a entrada de áudio do computador, desta maneira com o auxílio de um software de osciloscópio, denominado *Soundcard Scope* (gratuito), pode-se gerar os sinais, gráficos e dados para o complemento das análises (FIGURAS 21 e 22).

Figura 21 - Dispositivo conversor de sinal.



Fonte: Do autor (2018).

Figura 22 - Interface do Software *Soundcard Scope*.

Fonte: Do autor (2018).

4.7 Scanner automotivo

Foi utilizado um scanner TM 536 Rasther Box da Tecnomotor, que é capaz de interpretar os parâmetros de funcionamento da injeção de diesel do motor utilizado nos experimentos, por meio de conexão a cabo ou via bluetooth com um computador. Esse equipamento serviu para monitorar as funções do sistema de injeção eletrônica de combustível do veículo em tempo real e também foi capaz de gerar gráficos e relatórios dos parâmetros desejados. Os parâmetros foram utilizados como informações auxiliares durante os testes e na interpretação dos dados de vibração coletados (FIGURAS 23 e 24).

Figura 23 - Rasther Box TM 536.



Fonte: Do autor (2018)

Figura 24 - Interface Software Rasther PC.



Fonte: Do autor (2018)

4.8 Multímetro automotivo

Para a medição da temperatura ambiente foi utilizado um multímetro digital da marca Automotive Meter, que realiza leituras de temperatura até 750°C, por meio de um termopar (FIGURA 25).

Figura 25 - Multímetro digital e termopar utilizado nos experimentos.



Fonte: Do autor (2018).

4.9 Preparação Experimental

Para a realização dos experimentos, foram definidas três rotações distintas, 800 rpm, 1800 rpm e 3600 rpm. As rotações foram definidas em função de sua relevância em relação ao funcionamento do motor. Segundo informações fornecidas pelo fabricante do motor, 800 rpm é a rotação em que o motor se encontra em regime de marcha lenta, ou seja, a rotação mínima possível para que o motor permaneça funcionando e consiga responder a acelerações instantaneamente. Nesse regime, a vibração oriunda do motor pode não ser prejudicial para o equipamento, mas pode se tornar um incômodo para os ocupantes do veículo, essa rotação é adequada para que o motor se mantenha íntegro e todos os seus componentes mantenham suas funções primordiais. 1800 rpm é a rotação na qual o motor desempenha seu torque máximo e 3600 rpm é a rotação onde o motor desenvolve sua potência máxima. Segundo Arnone et al. (2009), a definição das rotações para a análise de vibração em blocos de motores diesel deve seguir critérios individuais para cada tipo motor, levando-se em consideração as fases da combustão e as características individuais de cada motor. A descrição completa de como acompanhar a evolução de combustão de um motor diesel também foi relatada por Carlucci, Chiara e Laforgia (2006).

Desenvolveu-se um dispositivo (FIGURAS 26 e 27) para controlar a rotação do motor, sendo que, quando instalado no pedal do acelerador do veículo, foi possível o ajuste de diferentes posições do acelerador. Desta maneira, foi possível o controle da rotação do motor para a realização dos testes nas rotações pré-definidas. A posição do pedal do acelerador foi definida com o auxílio de um scanner que forneceu a rotação do motor.

Figura 26 - Confecção do suporte de fixação do acelerador.



Fonte: Do autor (2018).

Figura 27 - Suporte do acelerador pronto



Fonte: Do autor (2017).

Em seguida, o suporte foi fixado na cabine do veículo em um furo roscado existente no assoalho no alojamento do batente final de curso do pedal do acelerador. Nesse caso, o batente foi removido para a fixação do suporte, Figura 28.

Figura 28 - Detalhe da posição onde foi fixado o suporte.



Fonte: Do autor (2017).

Na Figura 29, apresenta-se o batente do acelerador removido e o suporte instalado no veículo, mantendo o pedal do acelerador em sua posição de repouso. Dessa forma, o motor funcionou em regime de marcha lenta para o início dos testes.

Figura 29 - Dispositivo de ajuste de rotação instalado.



Fonte: Do autor (2018).

Nessa fase de preparação dos testes, alguns problemas foram observados. Um deles foi que a central de injeção monitorava o sensor de velocidade do veículo. Assim, a central ignorava a posição do acelerador quando acionado por um determinado tempo sem que o veículo entrasse em movimento. Nesse caso, a solução encontrada foi remover o contato das rodas motrizes do veículo com o solo e realizar os experimentos com uma marcha engatada, assim, a central do veículo pode perceber movimento mediante leitura do sensor de velocidade e liberar a aceleração.

Foi desenvolvido também um reservatório alternativo para os combustíveis, tal reservatório foi constituído por um recipiente de 20 litros e um conjunto de moto bomba igual ao do veículo, sendo possível realizar a troca de combustível com certa facilidade (FIGURA 30).

Figura 30 - Motobomba de combustível.



Fonte: Do autor (2018).

A tubulação do reservatório alternativo foi desenvolvida, considerando conexões do tipo engate rápido, sendo possível o retorno das condições iniciais, Figura 31.

Figura 31 - Reservatório instalado no veículo.

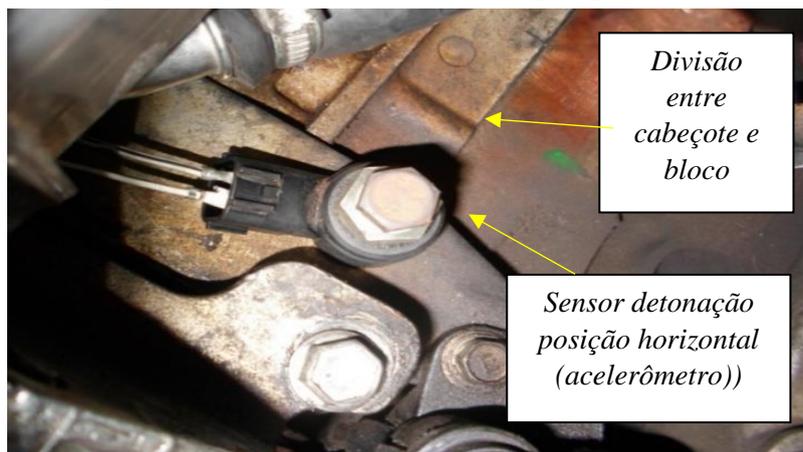


Fonte: Do autor (2018).

Além disso, foi confeccionado um chicote para a ligação elétrica da bomba externa, com o chicote original do veículo. Tal ligação se fez necessária, em decorrência de o fato da central de injeção do veículo realizar o controle de acionamento e desacionamento da referida bomba, de acordo com o regime de funcionamento do motor.

Para a aquisição dos sinais de vibração, os acelerômetros foram instalados mais próximos possível da parte superior da câmara de combustão, em posições nas quais receberam os sinais de vibrações verticais e horizontais. Assim, obtiveram-se melhores leituras de vibrações oriundas das sucessivas combustões na posição vertical. Os sensores instalados na posição horizontal receberam os sinais de vibração provenientes das peças móveis do motor, conforme sugerido por Arnone et al. (2009) e Carlucci, Chiara e Laforgia (2006), Figuras 32 e 33.

Figura 32 - Acelerômetro instalado posição vertical.



Fonte: Do autor (2018).

Figura 33 - Acelerômetro instalado posição Horizontal.



Fonte: Do autor (2018).

Após a instalação dos acelerômetros, foram realizadas todas as conexões necessárias para a realização dos testes. Os sensores foram conectados ao computador, foi posicionada a câmera termográfica, o analisador de vibração (FIGURA 34) e o scanner (FIGURA 35).

Figura 34 - Câmera termográfica posicionada.



Fonte: Do autor (2018).

Figura 35 - Scanner instalado no veículo.



Fonte: Do autor (2018).

Os sinais de vibração foram coletados pelos dois dispositivos, o analisador de vibração e o dispositivo criado para a entrada de áudio do computador. Dessa maneira, além da comparação dos sinais coletados com os diferentes combustíveis, foi possível uma comparação entre os dois métodos de coleta no sentido de validar as medições realizadas.

A temperatura foi monitorada por meio da leitura no scanner e da câmera termográfica. Na Figura 36, apresenta-se a leitura da câmara termográfica no momento de uma das análises realizadas.

Figura 36 - Leitura da câmera termográfica.

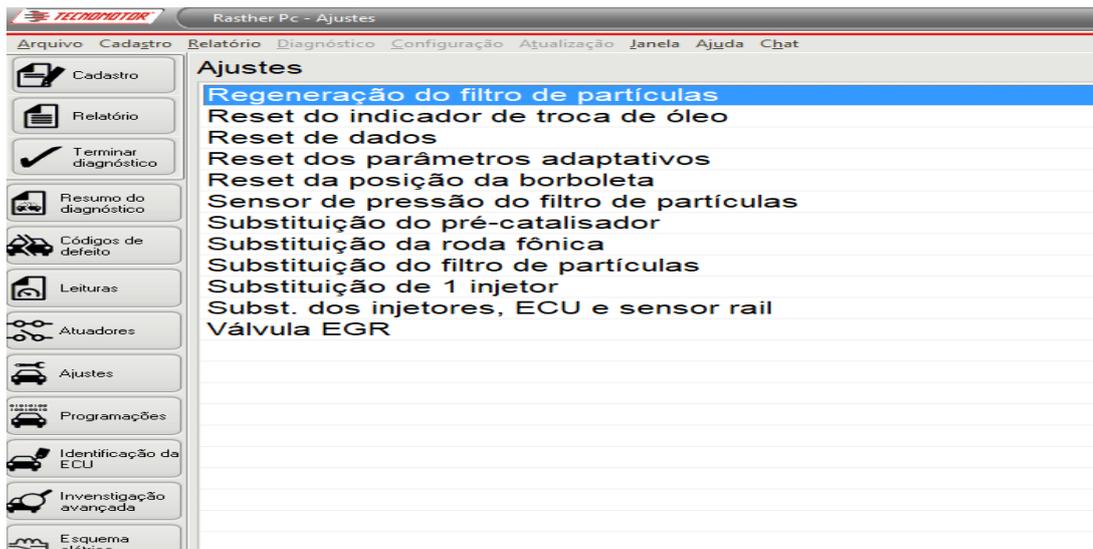


Fonte: Do autor (2018).

4.10 A realização dos experimentos

Após a preparação, foram verificados itens essenciais para o funcionamento do motor, como nível do óleo lubrificante e do líquido de arrefecimento. Estando tudo em condições satisfatórias, foi executado um procedimento denominado regeneração do sistema, por meio do scanner (FIGURA 37). Tal procedimento realizou a limpeza do filtro de partículas do motor, acoplado ao sistema de exaustão.

Figura 37 - Tela mostrando comando para regeneração.



Fonte: Do autor (2018).

O filtro de partículas é responsável por minimizar a emissão de poluentes na atmosfera. O procedimento de regeneração garante que o sistema não entre em um modo denominado autorregeneração, durante a execução dos testes. A autorregeneração é executada automaticamente pela central do veículo, em resposta a leituras sobre a saturação do filtro de partículas. Por meio de um sensor de partículas presente no veículo a central pode mensurar o nível de saturação do filtro de partículas, quando a central detecta que o filtro está próximo do ponto de saturação. Durante um certo tempo, emite pulsos extras aos bicos injetores alguns milissegundos após a injeção principal. Esse combustível extra, aumenta a temperatura do filtro de partículas eliminando o particulado presente no mesmo e, conseqüentemente, desobstruindo-o. Portanto, é importante garantir que a central não entre em modo de regeneração durante os testes, fazendo com que o sistema de injeção trabalhasse de forma equilibrada, de modo a não alterar os resultados dos testes realizados. Foi realizada a substituição do elemento filtrante do combustível e do elemento filtrante do ar, assegurando que agentes externos não interferissem nos resultados dos testes. O Processo de regeneração, em condições normais, levou cerca de 1200 segundos, ou seja, 20 minutos para ser executado. Esse tempo garantiu que o motor estivesse em sua temperatura ideal de trabalho (90°C) para o início dos testes.

Após finalizados os testes, foi realizada a substituição do elemento filtrante de combustível novamente, pois, em razão da viscosidade do Biodiesel ser ligeiramente maior que a do Diesel fóssil, pode ter havido um comprometimento da capacidade filtrante do mesmo para outro tipo de combustível, neste caso, o diesel B8.

A primeira variável medida foi a temperatura ambiente, realizada por meio do multímetro, pois a mesma pode influenciar diretamente no funcionamento do motor, principalmente em motores de ignição por compressão.

Para o motor ciclo diesel entrar em funcionamento é preciso que o interior da câmara de combustão atinja altas temperaturas, portanto, quanto menor for a temperatura ambiente na hora da partida, mais difícil para o motor entrar em funcionamento, pois o ar atmosférico é o responsável pelo abastecimento de oxigênio para a combustão. Durante o funcionamento do motor, a temperatura ambiente também pode influenciar, pois, quando a temperatura do ar atmosférico é variada, a concentração de oxigênio presente também pode variar, sendo que a quantidade de oxigênio é fundamental para que aconteça a combustão adequada. Assim, partindo de pontos de temperatura ambiente, o mais próximo possível um do outro, garantiu-se que essa variável influenciasse o mínimo possível nos resultados finais. Os ensaios seguiram metodologias de teste e segurança estabelecidas pelas normas NBR 10082, NBR 13970, NBR 7505 e NR 9 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2011). Tais normas estabelecem parâmetros para a execução dos ensaios e para segurança, durante os ensaios, nos referidos equipamentos.

Para garantir um nível mínimo de confiabilidade, os ensaios foram repetidos três vezes em cada rotação e com cada tipo de combustível, respeitando um intervalo médio de 5 minutos entre os ensaios a título de estabilização dos componentes e da temperatura do motor. Essa estabilização foi necessária, pois os testes foram feitos com o veículo parado, dificultando, assim, sua refrigeração, que só acontece de maneira satisfatória com o veículo em movimento. Os níveis de estabilização puderam ser verificados por meio de dados de leitura da rotação do motor e pressão da turbina, dentre outros, por meio do scanner. A realização dos ensaios se deu em dois dias consecutivos e em períodos semelhantes do dia, garantindo, assim, que a variação da temperatura ambiente fosse a menor possível. A temperatura ambiente no início dos testes do 1º dia foi 31,5°C e no final dos testes foi 32,5°C. No 2º dia, a temperatura medida foi 30°C no início dos testes e 32,5°C no final dos testes.

A primeira fase dos testes foi realizada com Diesel Fóssil (B8) e a segunda com o Biodiesel (B100). A troca de combustíveis se deu com o auxílio de uma bomba elétrica, garantindo-se que o óleo diesel (B8) fosse totalmente retirado do sistema antes da troca por Biodiesel. Tal procedimento foi necessário, pois o motor é do tipo injeção eletrônica de combustível e o sistema gerador de pressão de combustível para a injeção não pode funcionar

sem combustível. Dessa forma, não é aconselhável que o motor funcione até o fim do combustível, a fim de evitar danos permanentes ao sistema de injeção de combustível.

4.11 A coleta dos sinais de vibração

Respeitando-se as rotações estabelecidas (800 RPM, 1800 RPM e 3600 RPM) para ambos os combustíveis analisados e, baseando-se na norma NBR 10082 (ABNT, 2011), que trata de ensaios e análises de vibração não destrutivos em máquinas trabalhando em rotações fixas ou variáveis em uma faixa de 900 RPM a 15000 RPM, foram analisados a velocidade dos sinais com resultados em mm/s. O uso desse parâmetro se deu pelo fato de que vibrações em sinais de frequência podem variar de 10 Hz a 1500 Hz.

Para determinar a intensidade de uma vibração, usualmente utiliza-se a medida de maior amplitude em mm/s, a aceleração é utilizada para analisar frequências mais altas, na ordem de 5000 Hz a 300000 Hz (BRITO; LAMIM, 2011).

Segundo Brito e Lamim (2011), as principais grandezas utilizadas para se medir um índice vibracional são três e estão diretamente relacionadas com a definição de grandeza a qual deve-se utilizar em cada caso específico. Como o motor escolhido para os testes, trabalhou com rotações variando entre 800 rpm à 6000 rpm, seguiram-se as recomendações da norma ISO 20816-1 (ABNT, 2016), que recomenda uma faixa de 10 Hz à 1000 Hz para uso da velocidade, portanto foi definida a unidade em mm/s.

O índice geral de vibração pode ser definido como sendo a energia total de vibração dissipada e medida dentro de uma determinada faixa de frequência específica. De acordo com a norma ISO 20816-1 (ABNT, 2016), os limites de vibração são especificados, levando-se em conta valores medidos em RMS (Raiz do valor quadrático médio/ou do inglês, Root mean square) da velocidade de vibração relacionados com a potência e a fundação ou fixação da máquina (TABELA 3).

Tabela 3 - Especificação dos limites de vibração, segundo a norma ISO 20816-1 (ABNT, 2016).

Valor RMS da velocidade de vibração [mm/s]	Classificação dos Equipamentos:			
	Classe I Até 15 KW (20CV)	Classe II 15 a 75 kW (20-100CV)	Classe III Acima de 75 KW Base Rígida	Classe IV Acima de 75 KW Base Flexível
0,28	BOM	BOM	BOM	BOM
0,45	BOM	BOM	BOM	BOM
0,71	SATISFATÓRIO	BOM	BOM	BOM
1,12	SATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO	BOM	BOM
1,8	INSATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO	BOM
2,8	INSATISFATÓRIO	INSATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO
4,5	INACEITÁVEL	INSATISFATÓRIO	INSATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO
7,1	INACEITÁVEL	INACEITÁVEL	INSATISFATÓRIO	INSATISFATÓRIO
11,2	INACEITÁVEL	INACEITÁVEL	INACEITÁVEL	INSATISFATÓRIO
18	INACEITÁVEL	INACEITÁVEL	INACEITÁVEL	INACEITÁVEL
28	INACEITÁVEL	INACEITÁVEL	INACEITÁVEL	INACEITÁVEL
45	INACEITÁVEL	INACEITÁVEL	INACEITÁVEL	INACEITÁVEL

Fonte: ABNT (2016).

O motor utilizado nos experimentos desenvolve potência máxima de 127 CV, (aproximadamente 94,7 KW) e é montado sobre bases flexíveis. Segundo a norma ISO 20816-1 (ABNT, 2016), medidas de vibração com velocidades de até 4,5 mm/s são considerados como valores satisfatórios.

Para o cálculo da velocidade total de vibração, foi utilizada uma expressão vetorial (EQUAÇÃO 9), na qual pode-se estimar uma resultante média de vibração nas direções vertical, horizontal e axial. Esse método foi utilizado por Ghobadian et al. (2012), em seus estudos,

$$V_{tv} = \sqrt{A^2 + H^2 + V^2} \quad (9)$$

onde A, H, V representam, respectivamente, a vibração nas posições axial, horizontal e vertical.

Obtém-se o cálculo do índice energético de vibração, pelo produto da potência de vibração, frequência de excitação do conjunto e da rotação, conforme Equação 10.

$$IEV = (m \cdot v^2 \cdot f) / 2 \quad (10)$$

onde m é a massa do motor em Kg, f é a frequência em Hz e v é a velocidade em m/s.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Dados adicionais

Conforme testes realizados por Monteiro (2013) e Volpato et al. (2012), o consumo específico em determinadas rotações de alguns motores com o Diesel fóssil é em torno de 10% menor se comparado com o Biodiesel, a potência e o torque se mantêm semelhantes aos dois combustíveis (SOUZA et al., 2005). Esse fato foi constatado, após a realização dos testes, por meio dos dados coletados em tempo real pelo scanner, sendo que o consumo de combustível foi ligeiramente maior, em torno de 16% a mais com o Biodiesel, conforme dados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Consumo de combustível.

Rotação (rpm)	Média de Consumo B8 (mm³/ciclo)	Média de Consumo B100 (mm³/ciclo)
800	9,32	10,46
1800	6,31	7,47
3600	8,36	9,82
média	7,99	9,25

Fonte: Do autor (2018).

Nota-se, na Tabela 4, que o consumo em marcha lenta (800 rpm) é relativamente superior ao consumo em outras rotações. Isso aconteceu, em decorrência dos testes terem sido executados sem carga e ao motor ser sobrealimentado por um turbocompressor. Uma das funções do turbocompressor é adicionar uma quantidade extra de oxigênio, com essa quantidade extra, a mistura é otimizada, consumindo menos combustível.

Segundo Giudice et al. (2017), turbocompressor é um equipamento capaz de converter uma parcela da energia dos gases de escapamento em energia cinética em um rotor de palhetas. Por meio de um eixo solidário, essa energia é transmitida a outro rotor que, por sua vez, capta o ar atmosférico e o injeta com uma determinada pressão dentro dos cilindros, essa quantidade extra de ar propicia ao motor uma combustão melhor, em razão da maior quantidade de oxigênio presente na câmara de combustão, resultando em um melhor rendimento do motor e aumentando a potência. Esse fenômeno pode ser observado de maneira mais efetiva por meio dos dados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Comparativo pressão atmosférica x pressão turbina.

Rotação (rpm)	Pressão Atmosférica (mbar)		Pressão Turbina (mbar)		
	D	Diesel B8	Diesel B100	Diesel B8	Diesel B100
800		901	903	901	899
1800		901	904	914	911
3600		901	903	1041	1031

Fonte: Do autor (2018).

Quando o motor foi submetido ao regime de marcha lenta (800 rpm), em decorrência da baixa rotação, a velocidade dos gases do escapamento foi baixa, portanto a pressão da turbina foi relativamente a mesma que a atmosférica. À medida que a rotação do motor foi elevada, a pressão dos gases de exaustão se elevou gradativamente, de acordo com a rotação, elevando também a pressão da turbina. Esse dado não teve variação significativa com a troca de combustíveis, pois, depende somente da rotação de trabalho do motor.

Segundo Teixeira (2010), a viscosidade do biodiesel é maior que a do diesel fóssil, isso pode ser verificado analisando a pressão do combustível no sistema, por meio de leituras do scanner. Na Tabela 6, apresenta-se a média de pressão nas três rotações analisadas, com os dois combustíveis. A pressão ficou em torno de 2,5% maior nas três situações, utilizando o Biodiesel, mantendo-se a mesma rotação.

Tabela 6 - Pressão do sistema de injeção de combustível.

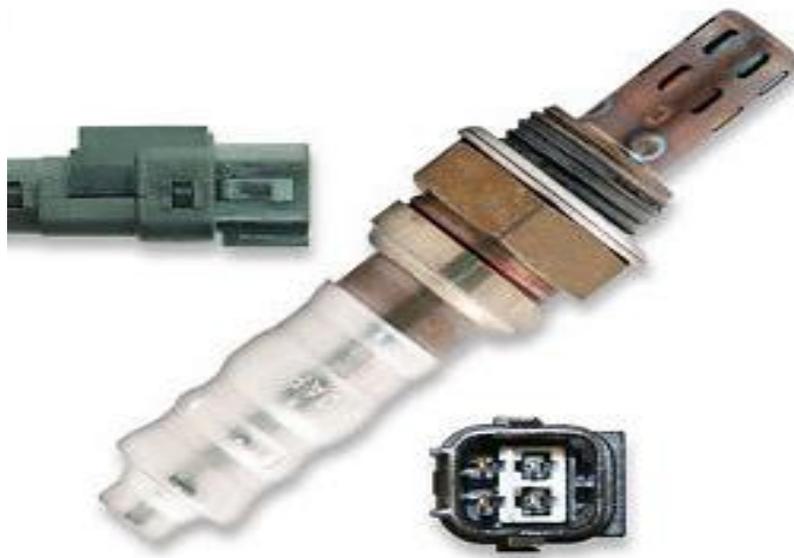
Rotação (rpm)	Média de pressão diesel	Média de pressão Diesel
	B8 (bar)	B100 (bar)
800	431	443
1800	644	656
3600	921	943

Fonte: Do autor (2018)

A UCE (Unidade de Controle Eletrônico) quantifica as moléculas de oxigênio presentes nos gases de exaustão, por meio de um sensor presente no escapamento, a sonda lambda. A sonda lambda é um sensor, constituído por um material cerâmico revestido com uma camada de platina porosa e protegido por uma cobertura de material metálico (FIGURA 38). Seu funcionamento é baseado na alteração das propriedades da cerâmica quando submetida a altas temperaturas, possibilitando a difusão do oxigênio do ar. Funciona em função da diferença da concentração de oxigênio presente nos gases de escapamento e a presente no ar externo. Essa variação gera uma tensão, que é interpretada pela UCE (Unidade de Controle Eletrônico), que responde por meio dos atuadores da forma mais adequada

(NGK/NTK CERÂMICAS TÉCNICAS, 2007). No caso do tipo de motor utilizado nos experimentos, uma das funções da sonda lambda é, mediante o uso da válvula EGR (Válvula de recirculação dos gases de escapamento/ ou do inglês, Exhaust gas recirculation), redirecionar uma parcela dos gases de escapamento, quando estão ricos em oxigênio, para serem reaproveitados pelo motor na combustão.

Figura 38 - Sonda lambda.



Fonte: NGK/NTK Cerâmicas Técnicas (2007).

Por meio de leituras obtidas com o scanner (TABELA 4), foi possível observar que o consumo de Biodiesel foi relativamente maior que o de Diesel fóssil, mas, analisando os dados, pode-se concluir que a emissão de poluentes foi relativamente menor com o uso do Biodiesel. Comparando-se os valores apresentados nas Tabelas 7, 8 e 9, observa-se que a quantidade de fuligem foi menor nas três rotações analisadas com o uso do biodiesel, mesmo tendo um consumo ligeiramente maior.

Tabela 7 - Leituras a 800 rpm.

Rotação Marcha lenta - 800 rpm		
	Diesel B8 (média)	Diesel B100 (média)
Pressão Dif. Filtro Partículas	3 mbar	0 mbar
Fuligem	72,42%	65,86%
Posição Válvula EGR	0 mm	1 mm
Sonda lambda	3 V	2,45 V
Temperatura água	92°C	90°C

Fonte: Do autor (2018).

Tabela 8 - Leituras a 1800 rpm.

Rotação 1800 rpm		
	Diesel B8 (média)	Diesel B100 (média)
Pressão Dif. Filtro Partículas	4 mbar	1 mbar
Fuligem	71,60%	68,54%
Posição Válvula EGR	0 mm	1 mm
Sonda lambda	3,2 V	2,33 V
Temperatura água	89°C	90°C

Fonte: Do autor (2018).

Tabela 9 - Leituras a 3600 rpm.

Rotação 3600 rpm		
	Diesel B8 (média)	Diesel B100 (média)
Pressão Dif. Filtro Partículas	13 mbar	8 mbar
Fuligem	72,5%	68,96%
Posição Válvula EGR	0 mm	2 mm
Sonda lambda	3,6 V	2,32 V
Temperatura água	93°C	94°C

Fonte: Do Autor (2018).

Nota-se, por meio dos dados apresentados nas Tabelas 7, 8 e 9, comparando-os com os dados apresentados na tabela 4 que, mesmo com um consumo um pouco maior, a emissão de fuligem quando foi utilizado o biodiesel foi menor. Verificou-se, ainda, que a válvula EGR (Válvula de recirculação dos gases de escapamento/ ou do inglês, Exhaust gas recirculation estava acionada em todas as ocasiões, onde foi utilizado o Biodiesel, e, comparando essa informação com a leitura da sonda lambda, que é um sensor que quantifica o oxigênio presente nos gases de escapamento, pode-se concluir que a concentração de oxigênio nos gases de escapamento foi maior nas três rotações analisadas com o uso do Biodiesel B100.

Além disso, o biodiesel B100 apresenta vantagens no quesito ambiental, como a redução na emissão de poluentes. Além de ser um combustível biodegradável, não é tóxico, facilitando inclusive seu manuseio (COSTA; ROSSI, 2000).

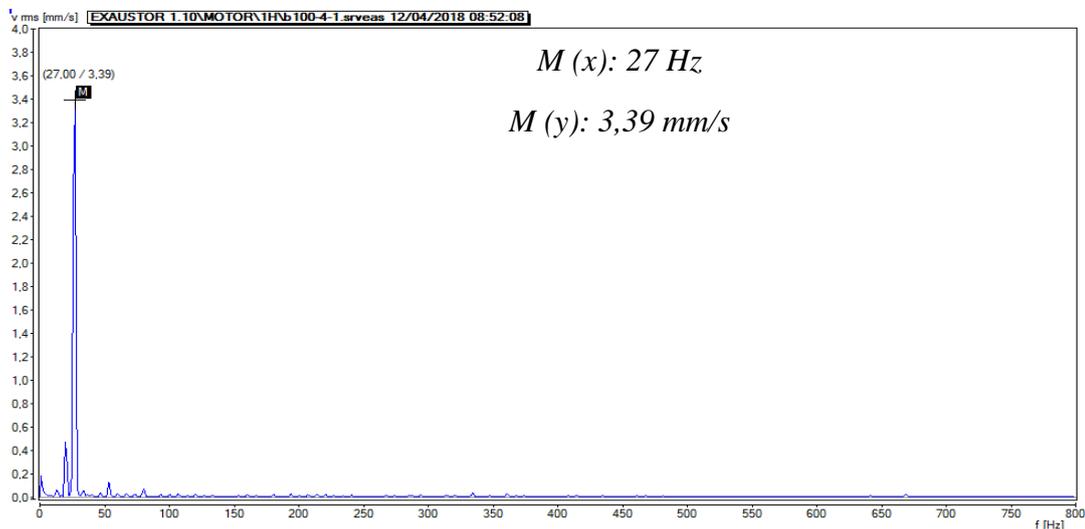
5.2 Análise das vibrações do bloco

Primeiramente, foram coletadas as vibrações com o diesel B8 e depois com o B100, em ambos dispositivos (Analisador industrial e o conversor de sinal para entrada de áudio do computador), seguindo a sequência de rotações pré-determinadas (800 rpm, 1800 rpm e 3600 rpm). Comparando-se os dois dispositivos de coleta, observou-se que os sinais de vibração entre eles foram semelhantes, portanto considerou-se as análises com os dados coletados com

o analisador Vibexpert II, pelo fato de que o equipamento já fornece as informações em valores RMS.

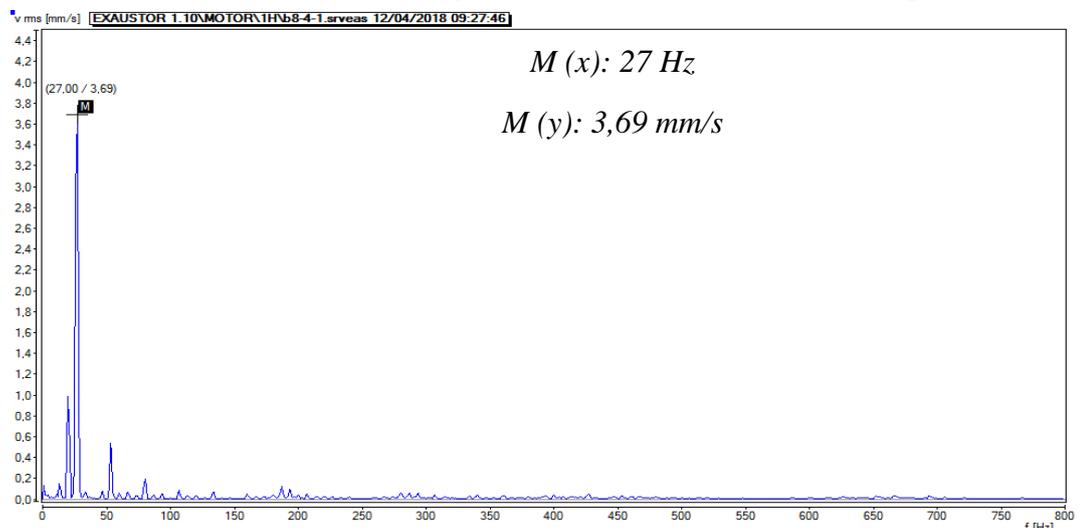
As vibrações do motor coletadas a 800 rpm na posição horizontal não apresentaram diferenças significativas com a troca de combustível, porém tiveram uma diferença significativa em relação à velocidade total de vibração. Os dois combustíveis apresentaram uma velocidade de vibração constante durante a realização dos testes. Nesse caso, valores da velocidade total de vibração do diesel B8 foram de 15,04 mm/s e para o B100 foi de 14,44 mm/s. A velocidade horizontal, considerando o diesel B8 foi de 3,69 mm/s e o B100 foi de 3,39 mm/s, Gráficos 1 e 2.

Gráfico 1 - Leitura vibração tendência horizontal B100 a 800 rpm.



Fonte: Do autor (2018).

Gráfico 2 - Leitura vibração tendência horizontal B8 a 800 rpm.

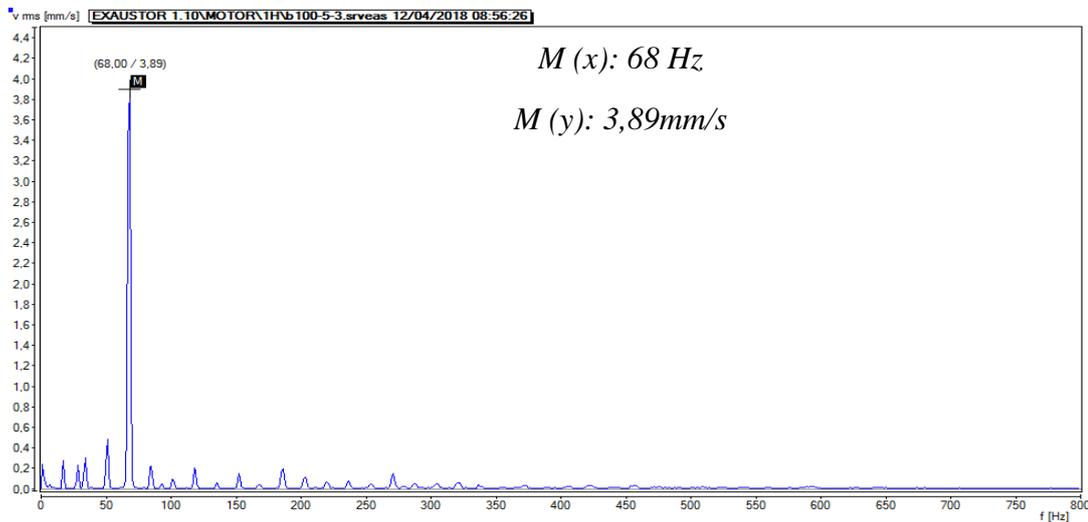


Fonte: Do autor (2018).

O fenômeno apresentado nos Gráficos 1 e 2 confirmam as afirmações de Campos (2015), que, em seus estudos, concluiu que a vibração com tendência horizontal é reflexo do movimento das peças móveis do motor e a vibração com tendência vertical reflete as vibrações da combustão.

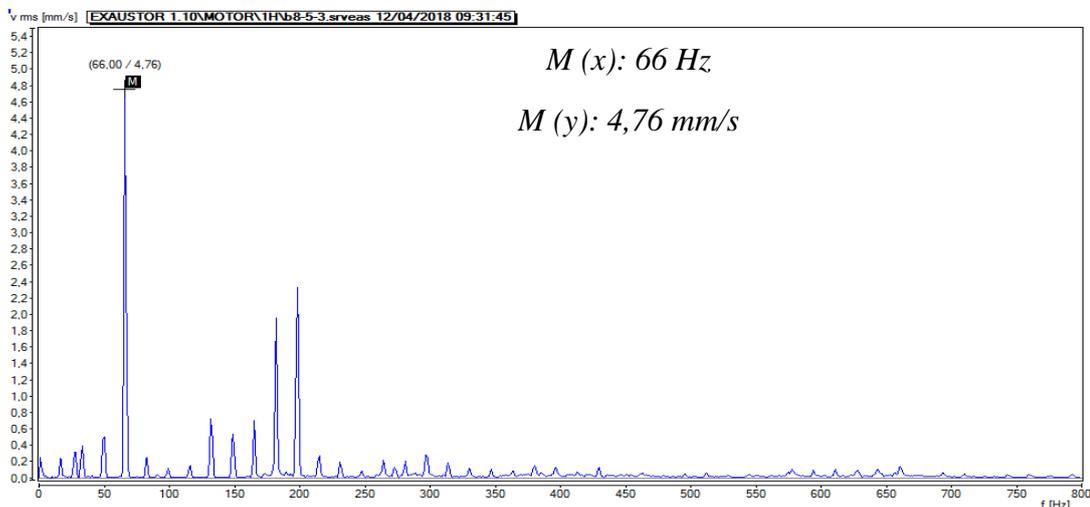
Com a rotação de 1800 rpm, na posição horizontal, as vibrações do motor utilizando o combustível B100 apresentaram variação maior da amplitude dos valores RMS. Como esperado, o aumento da rotação acarreta em um aumento da amplitude de vibração com ambos os combustíveis. Com isso, observa-se com o auxílio dos Gráficos 3 e 4 que a vibração utilizando o combustível B8 (4,76 mm/s) ficou em torno de 45% maior que a do B100 (3,89 mm/s).

Gráfico 3 - Leitura vibração tendência horizontal B100 a 1800 rpm.



Fonte: Do autor (2018).

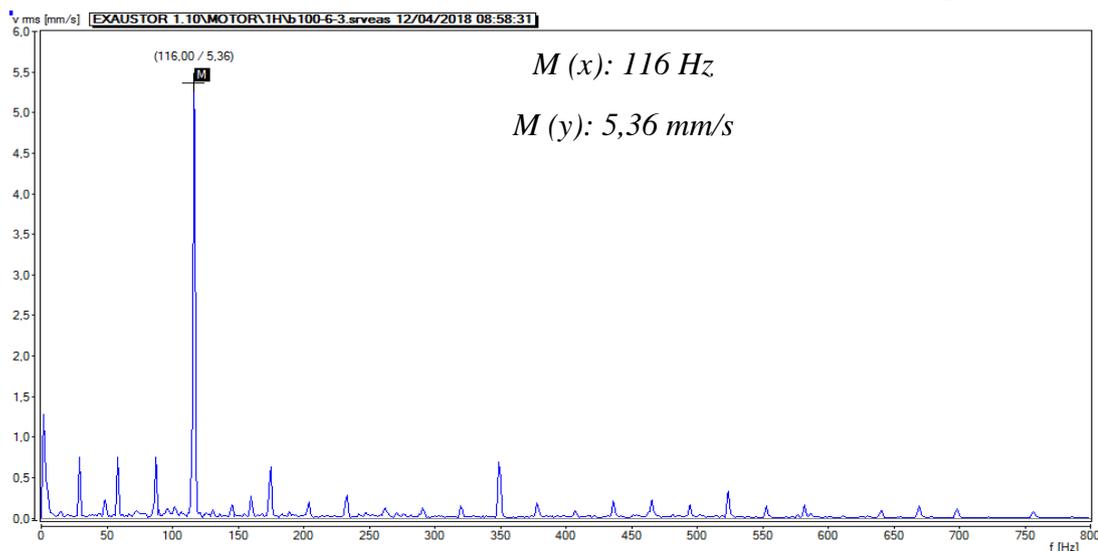
Gráfico 4 - Leitura vibração tendência horizontal B8 a 1800 rpm.



Fonte: Do autor (2018).

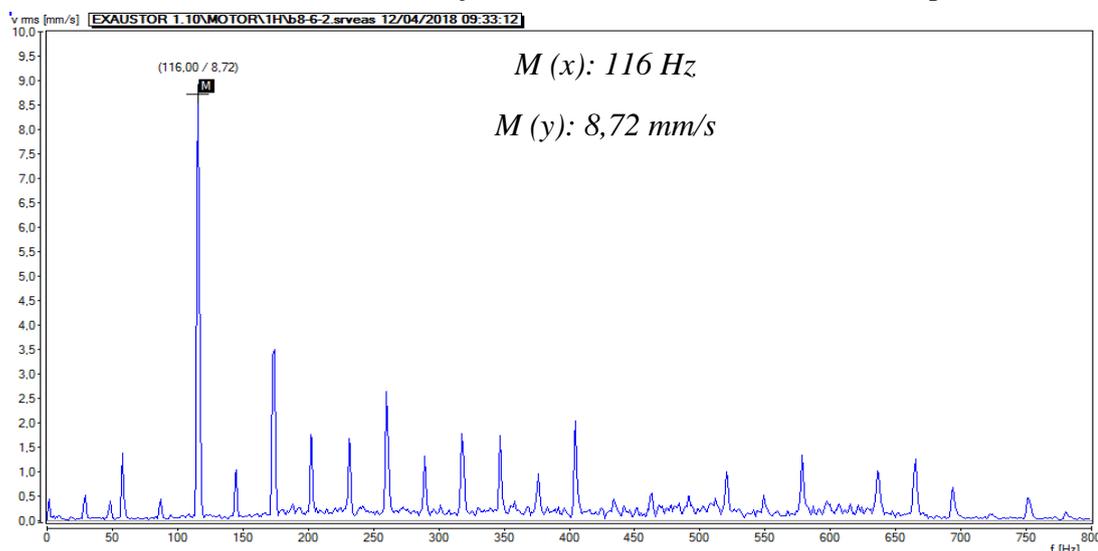
Nas análises, utilizando rotações mais elevadas, na posição horizontal a 3600 rpm (GRÁFICOS 5 e 6), ambos os combustíveis tiveram comportamentos semelhantes em relação à variação dos valores RMS. O combustível B100 ficou em torno de 5,36 mm/s e o B8 em torno de 8,72 mm/s, gerando-se uma diferença de 62%.

Gráfico 5 - Leitura vibração tendência horizontal B100 a 3600 rpm.



Fonte: Do autor (2018).

Gráfico 6 - Leitura vibração tendência horizontal B8 a 3600 rpm.

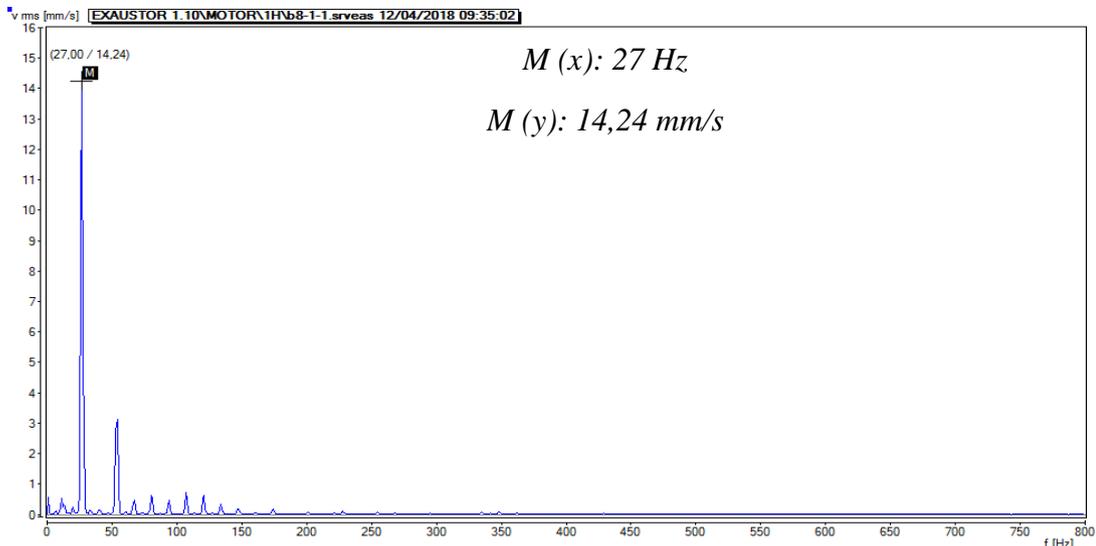


Fonte: Do autor (2018).

As vibrações do motor a 800 rpm na posição vertical também não apresentaram diferenças significativas com a troca de combustível, porém ficaram em patamares mais próximos em relação à velocidade total de vibração. A velocidade total de vibração para o B8 ficou em torno de 15,04 mm/s e para o B 100 ficou em torno de 14,44 mm/s. A velocidade

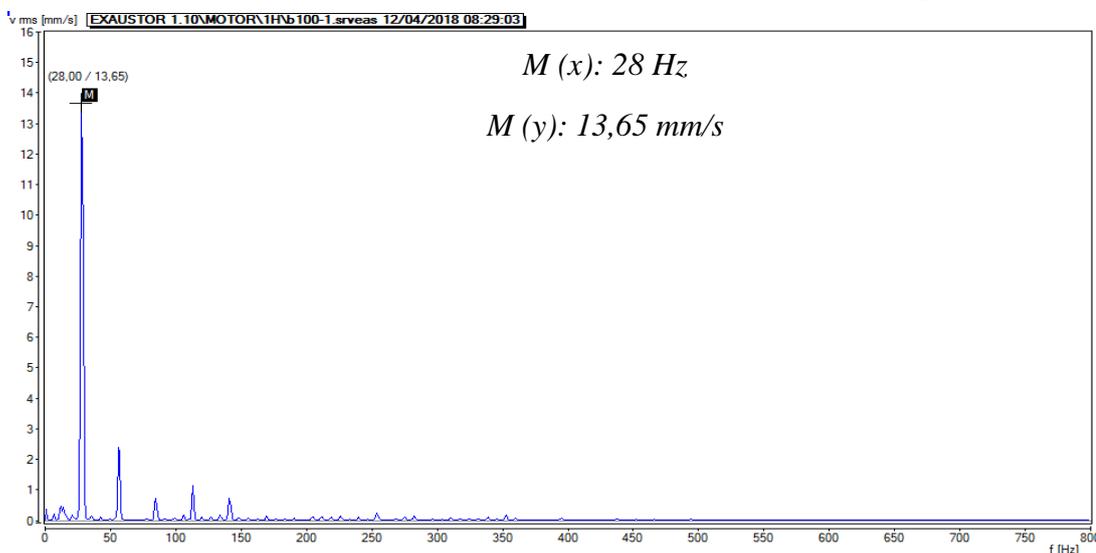
vertical com o B8 foi de 14,24 mm/s e com o B100 foi de 13,65 mm/s, conforme Gráficos 7 e 8.

Gráfico 7 - Leitura vibração tendência vertical B8 a 800 rpm.



Fonte: Do autor (2018).

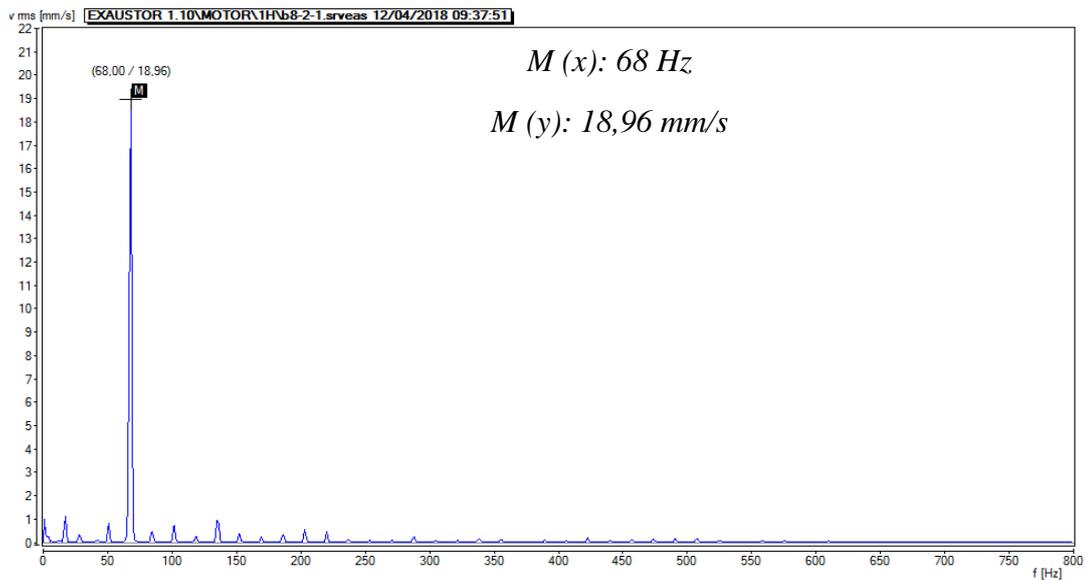
Gráfico 8 - Leitura vibração tendência vertical B100 a 800 rpm.



Fonte: Do autor (2018).

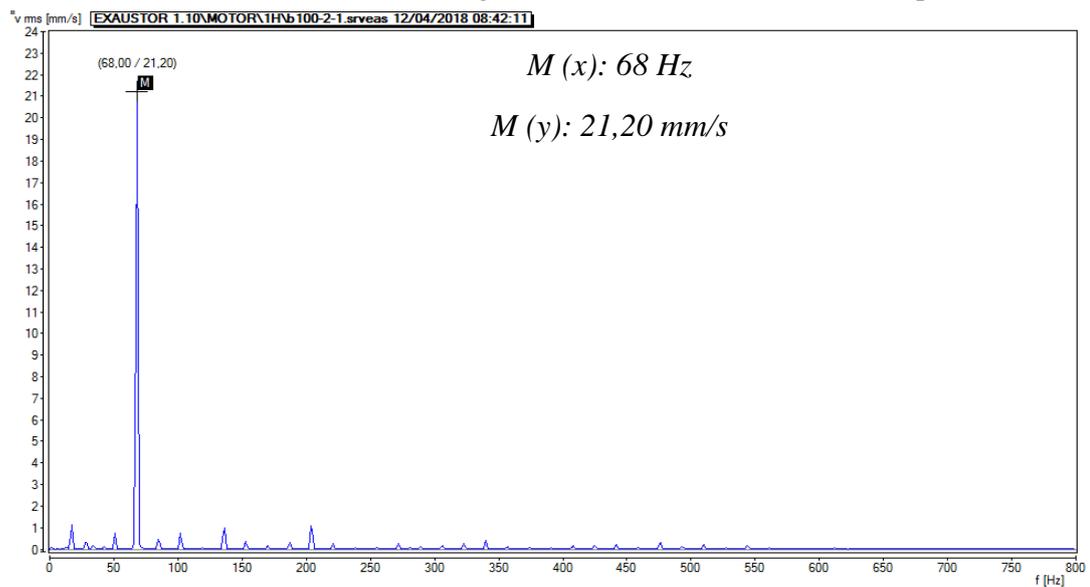
Para a rotação de 1800 rpm, na posição vertical, as vibrações do motor utilizando o combustível B100 tiveram uma variação maior da amplitude dos valores RMS. Os Gráficos 9 e 10, mostram que a vibração utilizando o combustível B8 (21,20 mm/s) ficou em torno de 11% maior que a do B100 (18,96 mm/s). Observa-se que, na posição vertical, onde se tem uma influência maior da combustão, houve menor variação entre os dois combustíveis.

Gráfico 9 - Leitura vibração tendência vertical B100 a 1800 rpm.



Fonte: Do autor (2018).

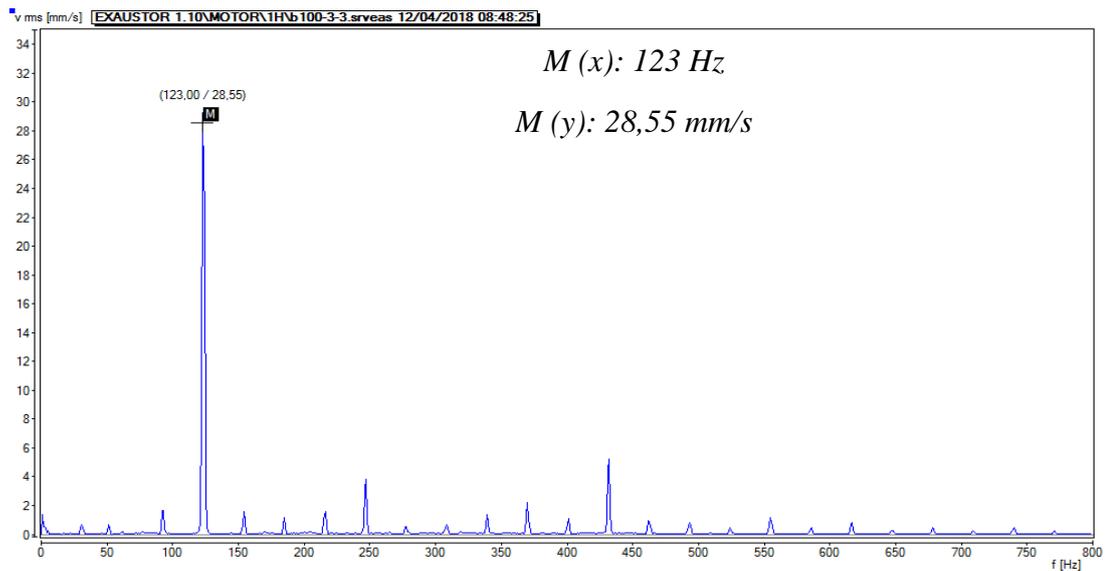
Gráfico 10 - Leitura vibração tendência vertical B8 a 1800 rpm



Fonte: Do autor (2018).

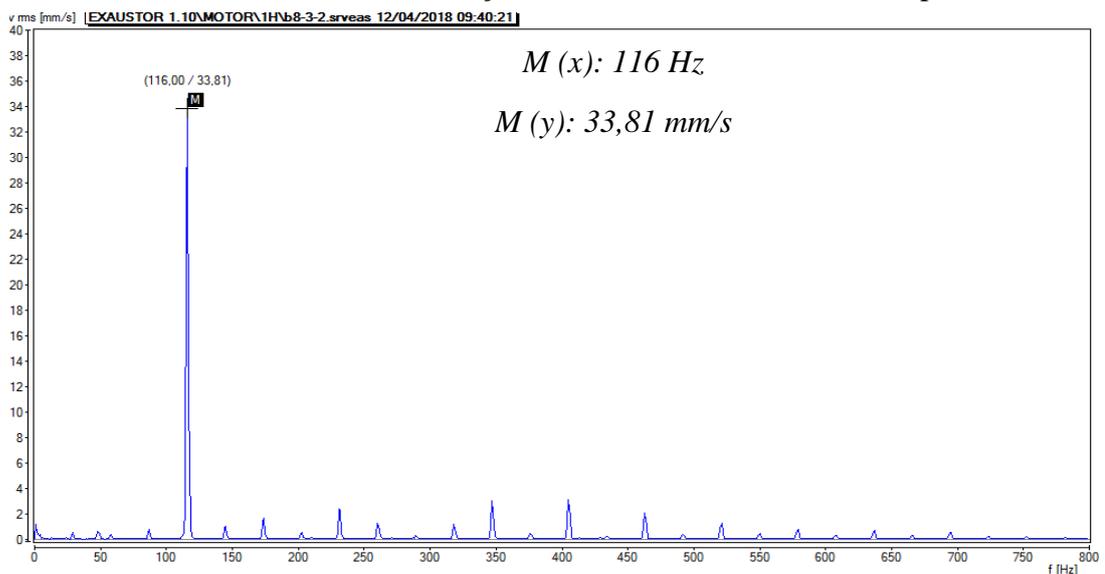
Nas análises, levando-se em consideração rotações mais elevadas na posição vertical a 3600 rpm (GRÁFICOS 11 e 12), ambos os combustíveis obtiveram comportamentos semelhantes em relação a variação dos valores RMS. O combustível B100 ficou em torno de 28,55 mm/s e o B8 com 33,81 mm/s, o que representa uma diferença de 18%.

Gráfico 11 - Leitura vibração tendência vertical B100 a 3600 rpm.



Fonte: Do autor (2018).

Gráfico 12 - Leitura vibração tendência vertical B8 a 3600 rpm.



Fonte: Do autor (2018).

Analisando o índice energético da vibração, nas rotações predeterminadas de 800 rpm, 1800 rpm e 3600 rpm, verifica-se por meio da Tabela 10, que o combustível B100 dissipou quantidade menor de energia em forma de vibração nas três rotações analisadas. Entretanto, o combustível B8 manteve-se estável nas três rotações distintas, levando-se em consideração que o motor analisado foi projetado para trabalhar com o diesel B8, o qual possui menor densidade e viscosidade (CARLUCCI; CHIARA; LAFORGIA, 2006). O combustível B100 trabalhou com dissipação de energia de vibração menor em ambos os casos, em torno de 25% a menos que o B8, variando, de acordo com a rotação analisada.

Tabela 10 - Tabela do índice energético da vibração (IEV).

	B100	B 8
IEV 800 rpm	0,53 W	0,56 W
IEV 1800 rpm	2,42 W	3,15 W
IEV 3600 rpm	9,43 W	13,72 W

Fonte: Do autor (2018).

Em baixas rotações, como exemplo, 800 rpm, o combustível B8 obteve média de vibração total de 15,04 mm/s, e o B100 obteve 14,44 mm/s, o que representa diferença de 4,5%. Na rotação de 1800 rpm, a variação foi em torno de 13%. O combustível B100 apresentou menor nível energético de vibração, chegando a uma velocidade média de 19,96 mm/s, enquanto o B8 atingiu 22,53 mm/s.

A 3600 rpm, o combustível B8 apresentou-se mais energético, com índice médio de vibração de 35,71 mm/s contra 29,57 mm/s do B100, ou seja, 21% maior. Entretanto, a diferença energética ao elevar a rotação de 1800 para 3600 rpm, foi em torno de 45%.

A variação de intensidade das vibrações provenientes do movimento do pistão e da pressão de combustão pode ser observada de forma mais efetiva, por meio da tendência global vertical. Os sensores instalados na posição vertical foram responsáveis pela captura desses sinais. Observa-se por meio dos espectros que ambos combustíveis reagiram com índices energéticos semelhantes.

Na Tabela 11, apresenta a velocidade total de vibração nas três rotações analisadas com ambos combustíveis e suas respectivas frequências.

Tabela 11 - Velocidade total de vibração e suas frequências.

Combustível	B8			B100		
	800	1800	3600	800	1800	3600
Rotação (rpm)	800	1800	3600	800	1800	3600
Vel. Total de Vibração (mm/s)	15,04	22,53	35,71	14,44	19,96	29,57
Frequência (Hz)	27	67,22	116,33	27,66	65,67	116,66
Variação aproximada à 800 rpm (%)				4,5%		
Variação aproximada à 1800 rpm (%)				13%		
Variação aproximada à 3600 rpm (%)				21%		

Fonte: Do autor (2018).

Se compararmos os valores de velocidade total de vibração encontrados para ambos os combustíveis com a norma ISO 20816-1 (ABNT, 2016), verifica-se que os valores se encontram dentro das faixas insatisfatório e inaceitável. Após análises, foi realizada uma

verificação no veículo e constatado que um dos suportes de sustentação estava danificado, sendo isso uma provável causa do aumento desses valores.

Nas três rotações analisadas, o combustível B8 obteve um índice de vibração maior que o B100. Verifica-se que a maior diferença ocorreu na rotação de 3600 rpm. O combustível B8 obteve um índice de vibração 17,5% maior que as vibrações provenientes do combustível B100 na posição vertical. Em 800 rpm, o B8 superou em 3,5% também na posição vertical e a 1800 rpm, a diferença foi de 11%. Esse fato pode comprovar o maior poder calorífico do combustível B8.

Segundo Carlucci, Chiara e Laforgia (2006), o combustível B100 tem viscosidade superior ao B8. Dessa maneira, a pressão de injeção e a pulverização do combustível acontece de forma diferente dentro da câmara de combustão, alterando a combustão final. A maior viscosidade do B100 pode também ter ocasionado atraso no ponto de combustão. Quando o combustível é injetado na câmara de combustão com um ligeiro atraso, já se passou o ponto ótimo para o melhor aproveitamento da combustão, esse fenômeno causa uma diminuição de potência do motor, resultando em um índice de vibração menor, em decorrência da atomização do combustível ser mais difícil.

Considerando a dissipação de energia em forma de vibração, observou-se uma variação pequena entre os combustíveis. As alterações e variações observadas podem ter ocorrido, em decorrência da parte mecânica do sistema de injeção de combustível não estar adequada à viscosidade mais alta do biodiesel B100. O biodiesel B100 apresentou, em todos os casos, um índice vibracional menor, e, conseqüentemente, uma perda energética menor. Levando-se em consideração os quesitos analisados e desconsiderando as variações de desempenho, que não foram analisadas, pode-se concluir que a substituição do diesel B8 pelo biodiesel B100 pode ser realizada nos motores sem a necessidade de alterações significativas no sistema, levando-se em conta também as questões ambientais.

Na Tabela 12, apresentam-se, de maneira completa, os resultados obtidos com a realização dos testes com os dois combustíveis

Tabela 12 - Comparação dos resultados obtidos entre B8 e B100.

Combustível	B8			B100		
	800	1800	3600	800	1800	3600
rpm	800	1800	3600	800	1800	3600
Média de consumo (mm ³ /ciclo)	9,32	6,31	8,36	10,46	7,47	9,82
Pressão atmosférica (mbar)	901	901	901	903	904	903
Pressão turbina (mbar)	901	914	1041	899	911	1031
Media pressão Diesel (bar)	431	644	921	443	656	943
Pressão dif. filtro part. (mbar)	0	1	8	3	4	13
Fuligem escapamento (%)	72,42	71,6	72,5	65,86	68,54	68,96
Posição EGR (mm)	0	0	0	1	1	2
Sonda lambda (V)	3	3,2	3,6	2,45	2,33	2,32
Temperatura água (°C)	92	89	93	90	90	94
Velocidade da Vibração horizontal (mm/s)	3,75	4,71	8,67	3,36	3,24	5,68
IEV (W)	0,56	3,15	13,72	0,53	2,42	9,43

Fonte: Do autor (2018).

6 CONCLUSÕES

Ao analisar os testes realizados, pode-se afirmar, de forma geral, que o motor apresentou consumo em média 16% superior com a utilização do diesel B100, em relação ao B8. Em contrapartida, o nível de emissão de particulados na atmosfera foi menor, em decorrência das características químicas do combustível B100, que propiciam uma combustão diferente. O nível de fuligem emitido pelo escapamento pode ser observado, por meio de dados coletados pelo scanner, ficando 7% superior quando foi utilizado o diesel B8. A quantidade de oxigênio livre nos gases de escapamento foi superior quando foi utilizado o B100. Foi possível perceber que o ruído característico dos bicos injetores ficou mais ameno quando o motor funcionou com o combustível B100. Também foi possível verificar, por meio dos gráficos, que o combustível B8 tem um nível de estabilidade de funcionamento um pouco maior em relação ao B100.

O motor, quando alimentado com diesel B8 desenvolveu um nível de vibração superior ao B100, sendo, 3,5 % superior a 800 RPM, 13% superior a 1800 RPM e 21% superior a 3600 RPM. Em consequência desse nível superior de vibração, as perdas energéticas por vibração analisadas pelo IEV (Índice energético de vibração), também foram superiores seguindo a mesma porcentagem. Dessa maneira, quando foi utilizado o combustível B100 o motor apresentou um maior aproveitamento energético, o que pode resultar em um maior rendimento. Dessa forma, conclui-se que o biodiesel B100 pode ser utilizado no tipo de motor analisado sem grandes problemas em relação ao nível de vibração e para otimizar o funcionamento podem ser necessárias poucas modificações, tais como, ajuste do ponto de ignição e pressão de injeção, que ficam como propostas de trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- ARNONE, L. et al. Engine blockvibration measures for time detection of diesel combustion phases. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINES AND VEHICLES, 9., 2009, Lombardini. **Proceedings...** Lombardini: SAE, 2009. Disponível em: <<https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2009-24-0035/>>. Acesso em: 10 mar. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10082**: ensaio não destrutivo: análise de vibração. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 20816-1**: medição e avaliação da vibração da máquina: diretrizes gerais. Rio de Janeiro, 2016.
- BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 20 fev. 2017.
- BRASIL. **Lei nº 11.097**, de 13 de janeiro de 2005. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira; altera as Leis nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999 e 10.636, de 30 de dezembro de 2002; e dá outras providências. Brasília, DF, 2005. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2005/lei-11097-13-janeiro-2005-535383-normaatualizada-pl.html>>. Acesso em: 10 mar. 2017.
- BRASIL. **Programa Nacional de Produção e uso de Biodiesel (PNPB)**. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Folder_biodiesel_portugues_paginado_000g6u2zeyt02wx5ok0wtedt37xybybe.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2018.
- BRITO, J. N.; LAMIM, P. C. M. **Introdução à técnica preditiva de análise de vibração**. São João del Rei: Ed. UFSJ, 2011.
- CAMPOS, R. B. Análise comparativa do desempenho do biodiesel em motores diesel através de técnicas não-invasivas de monitoramento. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2015, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2015. 1 CD-ROM.
- CAPELLI, A. **Automação industrial**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2008.
- CARLUCCI, A. P.; CHIARA, F. F.; LAFORGIA, D. Analysis of the relation between injection parameter variation and block vibration of an internal combustion diesel engine. **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 295, p. 141-164, 2006.
- CATHERINE, H. M. et al. **Química para um futuro sustentável**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.
- CHUN, K.; KIM, K. Measurement and analysis of knock in a engine using the cylinder pressure and block vibration signals. In: INTERNATIONAL CONGRESS & EXPOSITION, 1994, Chicago. **Proceedings...** Chicago: SAE, 1994. p. 1-9.

- COSTA, P. R. N.; ROSSI, L. F. S. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. **Química Nova**, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 531-537, 2000.
- DEMIRBAS, A. Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 49, p. 2106-2116, 2008.
- FARAH, M. A. **Caracterização do petróleo e seus produtos: parte 01: combustíveis**. Rio de Janeiro: Petrobrás, 1989. Apostila.
- FERNANDEZ, B, O. **Considerações sobre outros empregos do sensor de detonação para controle eletrônico de motores ciclo otto utilizando análise espectral**. 2006. 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- FERRARI, R. A. et al. Biodiesel de soja: taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-química e consumo em gerador de energia. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 1, p. 19-23, 2005.
- FRADEM, J. **Handbook of modern sensors: physics, desings, andaplications**. 3rd ed. New York: Springer-Verlag, 2004.
- GHOBIAN, B. et al. Vibration analysis of a diesel engineusing biodiesel and petrodiesel fuel blend. **Fuel**, London, v. 102, p. 414-422, Dec. 2012.
- GIUDICE, F. G. et al. Incidência das características de injeção do sistema de lubrificação na eficiência de um turbocompressor com mancal de filme fluido. **Acta Mechanica et Mobilitatem**, Belo Horizonte, v. 2, n. 4, p. 11-19, 2017.
- GONÇALVES, D. **Avaliação do funcionamento de um motor diesel com biodiesel**. 2016. 178 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade do Minho, Minho, 2016.
- HAYKIN, S. S.; VEEN, B. V. **Sinais e sistemas**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.
- HEYWOOD, J. B. **Internal combustions engine fundamentals**. New York: McGraw-Hil, 1988.
- JANSHOFF, A.; STEINEM, C. **Piezo electric transducers for vibration control and damping**. Berlin: Springer, 2007.
- KRAUSE, L. C. **Desenvolvimento do processo de produção do biodiesel de origem animal**. 2008. 130 p. Tese (Doutorado em Química)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- LIMA JÚNIOR, J. **Sistema de injeção eletrônica diesel (common rail)**. 2011. 34 p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica)-Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, 2011.
- MANERA, V. **Há dois mil anos atrás: o genial Héron de Alexandria**. 2013. Disponível em: <<https://vicentemanera.com>>. Acesso em: 29 maio 2016.

MARTINS, J. **Motores de combustão interna**. 2. ed. São Paulo: Publindústria, 2006.

MICHEL, V. **Tetra Pak Brasil**. 2005. Disponível em:

<http://www.tetrapak.com/br/sobre_a_tetra_pak/publicacoes/meio_ambiente/Documents/art_tec_biodiesel.pdf>. Acesso em: 21 set. 2016.

MOHEIMANI, S. R.; FLEMING, A. J. **Piezoelectric transducers for vibration control and damping**. Berlin: Springer, 2006.

MONTEIRO, L. F. **Análise comparativa da energia vibracional em motor diesel utilizando diesel e biodiesel**. 2013. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia)-Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Universidade Federal de São João del Rei, São João del Rei, 2013.

MORAES, C. et al. **A história das máquinas**. São Paulo: Magma, 2006.

MURATA, E. **Tabela de modos de vibração de materiais piezelétricos**. 2011. Disponível em: <<http://www.murata.com>>. Acesso em: 22 mar. 2017.

NGK/NTK CERÂMICAS TÉCNICAS. **Sensor de detonação**. Disponível em:

<<http://www.ngkntk.com.br/automotivo/produtos/sensor-de-detonacao/>>. Acesso em: 26 ago. 2017.

OPPENHEIM, A. V. **Sinais e sistemas lineares**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 1983.

PETROBRÁS. **Óleo diesel**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/produtos/automotivos/oleo-diesel/>>. Acesso em: 28 out. 2017.

POLAK, L. et al. **Física ensino médio**. 2. ed. Curitiba: Ícone Audiovisual, 2007.

RAO, S. **Vibrações mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2009.

RÊGO, T. F. U. **Desenvolvimento de um sistema multicanal de aquisição de dados em tempo real para aplicações no setor automotivo**. 2006. 200 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Pontifícia Universidade Católica, Belo Horizonte, 2006.

RETIFICA VILA MARIA. **Retificação do bloco de motor**. Disponível em:

<<http://www.retificavilamaria.com.br/servicos-de-retifica/retifica-do-bloco-do-motor/>>. Acesso em: 29 maio 2016.

SANCHEZ, A. G. **Identificação e quantificação do fenômeno de detonação em motores de combustão interna utilizando análise espectral**. 2002. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SILVA, C. W. **Vibration: fundamentals and practice**. Boca Raton: CRC, 2000.

SILVA, L. C. M. da. **Processo de produção de biodiesel e análise de parâmetros de qualidade**. 2014. 102 p. Trabalho de Projeto (Mestrado em Mestre em Energias Renováveis e Eficiência Energética)-Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2014.

SOUZA, D. V. D. et al. Comparação de desempenho de um motor monocilindro do ciclo diesel operando com diesel e biodiesel. In: CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA, 12., 2005, Ilha Solteira. **Anais...** Ilha Solteira, 2005. 1 CD-ROM.

SOUZA, V. A. **Análise de vibração**. Rio de Janeiro: Cerne Tecnologia e Treinamento, 2016.

TEIXEIRA, C. V. **Análise de emissões e desempenho de motores diesel utilizando óleo diesel comercial, biodiesel de Palma (B100) e misturas (Bx)**. 2010. 88 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica)-Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2010.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações**. 6. ed. São Paulo: Érica, 2009.

UNITED NATIONS. Adoption of the Paris agreement. In: CONFERENCE OF THE PARTIES, 21., 2015, Paris. **Proceedings...** Paris, 2015. Disponível em: <<https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

VOLPATO, C. E. S. et al. Desempenho de motor diesel quatro tempos alimentado com biodiesel de óleo de oliva. **Revista Ciência Agrotécnica**, Fortaleza, v. 36, n. 3, p. 348-353, maio/jun. 2012.

WU, J.; CHUANG, C. Fault diagnosis of internal combustion engine using visual dot patterns of acoustic and vibration signals. **NDT&E International**, London, v. 38, p. 605-614, 2005.