

# AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES POLUENTES POR MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DE CICLO DIESEL EM OPERAÇÃO EXPERIMENTAL COM ETANOL

Matheus Simões Cardoso<sup>1</sup>; Renato Romio<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2</sup> Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

**Resumo.** *O trabalho realizado teve como objetivo estudar o impacto nas emissões de poluentes na mudança do combustível original de um motor de combustão interna a Diesel para etanol, visando uma possível aplicação comercial. Para tanto, foi aplicada a técnica de velas incandescentes para a ignição do etanol. A análise foi feita por um analisador de gases com medição instantânea e avaliou-se os níveis de CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e HC em 4 situações: Em marcha lenta com etanol e Diesel e em condição de torque máximo com etanol e Diesel. Os resultados demonstraram uma redução significativa de NO<sub>x</sub> com o emprego de etanol, porém com um aumento também significativo de HC devido a características químicas do etanol. Os níveis de CO se mantiveram estáveis na operação com etanol, enquanto que, com Diesel, os valores aumentaram de acordo com a carga aplicada e visualização de material particulado.*

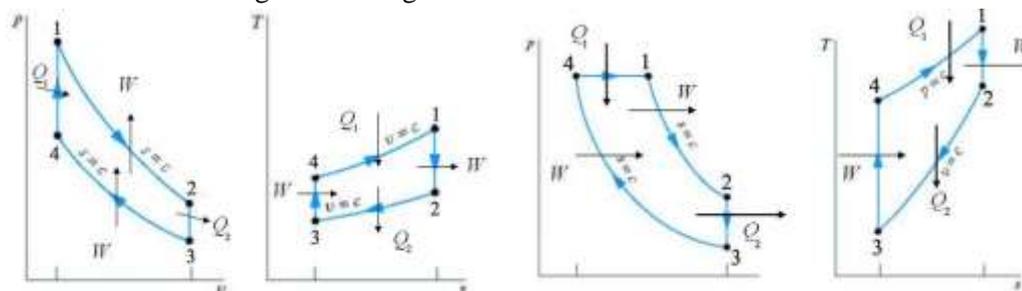
## Introdução

Durante o século XIX a humanidade estava presenciando a 2ª revolução industrial, período no qual foram desenvolvidos muitos estudos e projetos em diversas áreas, como a eletricidade, comunicações e transportes. A área de transportes viu nesse período um crescimento exponencial graças à invenção do motor de combustão interna de ignição por faísca, proposto por Nikolaus Otto (1832-1891), que utilizava pela primeira vez um combustível derivado do petróleo, a gasolina, que foram empregados nos primeiros automóveis que viriam a substituir as carruagens tracionadas por força animal como principal meio de transporte dentro das cidades. Porém a invenção que revolucionou o mundo dos transportes foi o motor de combustão interna de ignição por compressão, idealizado por Rudolf Diesel (1858-1913), o qual utilizava a compressão e a subsequente elevação da temperatura para queimar óleo vegetal. A máquina criada por Diesel foi substituindo gradativamente as máquinas a vapor que moviam as locomotivas e embarcações pois sua construção era muito mais compacta e leve além de consumir menos combustível.

Os motores que operam em ciclo Diesel dispõem de algumas particularidades que os tornam interessantes para o uso em grandes veículos de carga. O primeiro ponto a ser discutido é a taxa de compressão, a qual podem atingir por volta de 18:1 a 20:1, cerca de 55% maior que a taxa de compressão de um motor operado em ciclo Otto (HEYWOOD, 1987). Isso só é possível porque motores Diesel admitem somente ar na câmara de combustão, evitando problemas de pré-ignição que poderiam ocorrer com taxas de compressão elevadas em motores ciclo Otto. A partir da alta taxa de compressão, atinge-se pressões e temperaturas de compressão de 4 MPa e 800K, respectivamente (HEYWOOD, 1987) que propiciam o óleo combustível a entrar em combustão quase que instantaneamente quando injetado à câmara de combustão.

Tomando-se os diagramas temperatura-entropia dos ciclos Otto (a esquerda) e Diesel (a direita) na figura 1 e, sendo o trabalho gerado a área do diagrama, verifica-se um maior trabalho gerado no Diesel (BORGNAKKE et al, 2013) causado pela maior pressão de compressão. Portanto, para um mesmo deslocamento de cilindro, o rendimento global do motor Diesel é maior que que um motor Otto, justificando os usos para transportes de cargas rodoviárias, ferroviárias e marítimas.

Figura 1 – Diagramas P-v e T-s dos ciclos Otto e Diesel



Fonte: <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/04/09/ciclos-otto-y-diesel-analisis-termodinamico/>

Entretanto, o crescimento do uso de motores a Diesel em escala global em veículos pesados e geração de eletricidade, juntamente com motores a gasolina em veículos leves levaram a um aumento significativo das emissões de gases poluentes na atmosfera. 98% das emissões dos motores de combustão interna é de CO<sub>2</sub> (Dióxido de Carbono) e de CO (Monóxido de Carbono) (BRUNETTI, 2012), além dos NO<sub>x</sub> (Óxidos de Nitrogênio), HC (Hidrocarbonetos não queimados), SO<sub>x</sub> (Óxidos de Enxofre) e o material particulado.

Segundo o *CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion report of 2016* as emissões globais de CO<sub>2</sub> em 2016 foram de 32,31 Gt, valores dobrados em comparação com a década de 70 e 40% maior do que no início do século XXI (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2016).

Em razão dos problemas crescentes nas emissões de poluentes e pelas restrições impostas por legislações ambientais, muitas pesquisas em energias alternativas foram iniciadas na utilização de energia eólica, solar e combustíveis de origem vegetal. Os combustíveis de origem vegetal como o metanol e o etanol foram inicialmente aplicados em motores Otto, com sucesso, no Brasil graças ao programa Proálcool, iniciado na década de 1970, para substituir a gasolina no contexto da crise do petróleo e também foram iniciadas pesquisas para a aplicação de etanol em motores Diesel.

NANNI et al. (1980) realizaram investigações da possível aplicação de metanol com a utilização velas incandescentes e sem nenhuma modificação do motor original a não ser pela inclusão da vela incandescente. BRUETSCH et al. (1990), GOETZ et al. (1994), MUELLER e MUSCULUS (2001) também realizaram investigações na aplicação de metanol e etanol em motores Diesel com o uso da técnica da vela incandescente com o objetivo de atender os novos limites impostos de emissões de poluentes.

A utilização dos combustíveis alternativos oxigenados em motores Diesel encontrou alguns problemas para a ignição dos mesmos devido ao baixo número de cetano do etanol/metanol em relação ao óleo Diesel (NANNI et al, 1980) justificando o uso da vela incandescente, além da quantidade de combustível injetada ser ajustada devido ao menor poder

calorífico do etanol em comparação ao óleo Diesel em cerca de 63% em volume (BRAMBILA, 2006).

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento das emissões de poluentes de um motor Diesel operando com o combustível original e com o combustível alternativo em condições de marcha lenta e máximo torque, comparar com a literatura e descrever possíveis aplicações.

## Materiais e Métodos

O motor utilizado para os testes é um Fiat-GM 1.3 litro Multijet™ originalmente movido a óleo Diesel, possui configuração de 4 cilindros em linha, duplo comando no cabeçote, 4 válvulas por cilindro e aspiração por turbocompressor. Possui um diâmetro de cilindro de 82 mm e curso de 69,6 mm resultando em uma taxa de compressão de 18:1, atingindo a potência máxima de 70 CV @ 4000 rpm e 180 Nm @ 1750 rpm. A injeção de combustível, tanto originalmente para Diesel como para o etanol é feita utilizando o sistema Common-Rail e ignição a frio com auxílio de velas incandescentes metálicas NGK. Para que seja possível a conversão para etanol, as velas incandescentes originais foram substituídas por velas com revestimento cerâmico Bosch

Para a realização dos ensaios do motor, utilizou-se a estrutura da divisão de motores e veículos do Instituto Mauá de Tecnologia, o qual cedeu um banco de provas para a instalação do motor e a utilização de sua automação para o controle dos testes. O dinamômetro utilizado no banco de provas é um RAM NBR447250TS2 de tensão máxima de 460 V e rotação máxima de 3575 RPM, funcionando ativamente tanto motor elétrico como freio dinamométrico, facilitando as partidas do motor a frio.

O motor foi instalado no banco de provas pela equipe da divisão de motores e veículos e devidamente instrumentado para acompanhamento de temperaturas e pressões na automação da divisão (figura 1). AUDICKAS et al (2017) adaptaram suportes para a fixação do motor, realizaram o mapeamento do chicote elétrico para adaptação à uma *open ECU (Engine Control Unit)* Pi Snoop™ e desenvolveram uma nova estratégia de controle implementada a Pi Snoop para o funcionamento do motor tanto a Diesel quanto a etanol.

Figura 1 – Motor 1.3 Multijet instalado e instrumentado



A importância da utilização de uma *open ECU* se dá na possibilidade e facilidade na alteração dos parâmetros de injeção para o funcionamento em ambos os combustíveis. Para

permitir o funcionamento a etanol, o mapa de injeção teve alterados os valores de quantidade de combustível na injeção principal, nas injeções piloto, avanço de injeção e pressão no common-rail.

O motor 1.3 Multijet foi submetido a quatro ensaios para a verificação da influência da alteração do combustível sobre as emissões de poluentes: Teste de emissões a Diesel em condição de marcha lenta e em condição de torque máximo e teste de emissões a etanol em marcha lenta e em condição de torque máximo, todos de acordo com a norma ABNT NBR ISO 8178 – 2012.

O teste em marcha lenta foi conduzido após o completo aquecimento e estabilização do motor e quando o dinamômetro está a mesma velocidade angular do motor, por consequência sem transmissão de torque. Por outro lado, o teste em condição de torque foi conduzido quando o dinamômetro está na função de freio dinamométrico, até a condição de máximo torque produzido pelo motor.

Ambos os testes colheram amostras de gases durante um período de 30 min. É importante ressaltar que, após o término da aquisição de dados de emissões a etanol, o motor retorna a operar com Diesel para eliminar resíduos de etanol na linha de combustível e câmara de combustão. Isso foi feito devido à baixa lubrificidade apresentada pelo etanol, podendo danificar peças não preparadas para receberem contato com o combustível alternativo.

O processo de análise de gases de escapamento foi feito com o dispositivo PC-MULTIGÁS, da fabricante nacional Napro, o qual realiza medições da concentração de CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> em porcentagem absoluta e HC em ppm e sua escala de medição é demonstrada na figura 2:

*Tabela 1 – Escala de medição PC-MULTIGÁS*

CO (Monóxido de Carbono)	0 – 15 % Volume
CO <sub>2</sub> (Dióxido de Carbono)	0 – 20 % Volume
HC (Hidrocarbonetos)	0 – 20000 ppm
NO <sub>x</sub> (Óxidos de Nitrogênio)	0 – 5000 ppm

*Fonte: Manual de operação – Napro*

O dispositivo conta com alimentação 12V, compatível com tensão da bateria veicular, filtro de retenção de material particulado a esquerda e dreno de água condensada no equipamento a direita (Figura 3)

*Figura 2 – Vista frontal e traseira do PC-MULTIGÁS*



*Fonte: Manual de operação - Napro*

A aquisição de dados é realizada pela medição instantânea dos gases de escapamento, possibilitando acompanhar a evolução dos valores de CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e HC na interface do software (figura 4). Ao final do teste é gerado valores médios de emissões durante o período de teste.

Figura 3 – Interface medição instantânea



Fonte: Napro

## Resultados e Discussões

Os resultados das medições de gases de escapamento para Diesel (marcha lenta e condição de torque) e etanol (marcha lenta e condição de torque) são apresentados na tabela 1:

Tabela 2 – Emissões de gases de escapamento

Condição do teste/combustível	CO(%vol)	CO <sub>2</sub> (%vol)	NO <sub>x</sub> (ppm vol)	HC (ppm vol)
Diesel – Marcha lenta	0,14	1,8	58	79
Diesel - Torque	4,02	3,2	306	75
Etanol – Marcha lenta	0,46	2,1	0	2400
Etanol - Torque	0,29	7,1	43	1006

Os valores em marcha lenta apresentados foram colhidos a 1080 rpm devido à inércia do eixo cardã acoplado ao motor, apesar do dinamômetro estar inoperante, e os valores com etanol foram obtidos após a partida do motor com Diesel e posterior mudança da linha de combustível para etanol.

Para avaliar-se melhor os resultados foram construídos 4 gráficos baseados na tabela 2 que comparam os resultados de acordo com a condição de teste e o combustível utilizado. A construção dos gráficos possibilitará uma comparação das emissões do motor de acordo com o

combustível utilizado, porém, já é claramente perceptível os altos valores de HC verificados com motor a etanol em marcha lenta, a qual suas causas serão discutidas abaixo.

Gráfico 1 – CO e CO<sub>2</sub> em marcha lenta



O gráfico 1 mostra uma porcentagem maior em volume do gás de amostragem de presença de CO<sub>2</sub> do que de CO. O resultado indica que, em ambos os combustíveis, parte do combustível que entra em ignição tem uma combustão completa produzindo CO<sub>2</sub>, porém a queima residual de combustível, já com menos ar disponível na câmara favorece o aparecimento de subprodutos da combustão (combustão incompleta) como o CO e o material particulado. Os níveis de dióxido de carbono, tanto para marcha lenta como para condição de torque, neste estudo serão apenas referência para o consumo de combustível, sendo controlado pelo débito de injeção e não como um poluente a ser controlado.

As emissões com etanol mostram valores de CO e CO<sub>2</sub> maiores do que visto com Diesel. Isso ocorre pelo fato do débito de injeção controlado pela Pi Snoop foi de 5,5 mm<sup>3</sup> com Diesel, enquanto com etanol o débito foi 11 mm<sup>3</sup>, exatamente 100% a mais de combustível injetado para manter as condições impostas, valor este acima do valor calculado de 55% a partir dos poderes caloríficos de cada combustível, estando de acordo com BRAMBILA (2006). Porém observa-se que as emissões de CO com o combustível alternativo foram 3,3 vezes maiores. Uma possível causa é a quantidade de etanol injetado ser 100% superior do que com Diesel, para um mesmo volume de ar admitido, além do menor número de cetano do etanol, cerca de 1/9 do número de cetano do Diesel (MUELLER e MUSCULUS, 2001). Problemas com valores de emissões de CO foram demonstrados também por GOETZ et al. (1994), no entanto não se verificou a formação de material particulado, vide a baixa quantidade de carbono na molécula de etanol, em comparação com a molécula de óleo Diesel.

A formação de monóxido de carbono é extremamente perigosa por ser um gás tóxico, levando indivíduos a morte por asfixia por sua afinidade ser maior em 240 vezes com a hemoglobina do que o O<sub>2</sub> (ECYCLE, 2018), fazendo que seu controle seja imprescindível nos dias atuais.

Gráfico 2 – NO<sub>x</sub> e HC em marcha lenta



O gráfico 2 mostra os resultados mais interessantes da pesquisa: O comportamento anormal dos valores de HC com etanol e a eliminação de NO<sub>x</sub> com o mesmo em condição de marcha lenta.

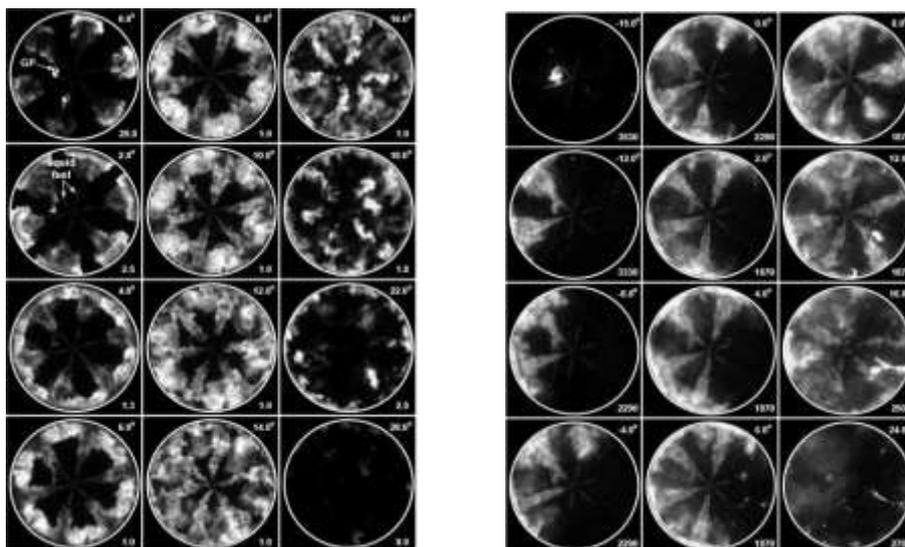
Segundo BRUNETTI (2012) a formação do NO<sub>x</sub> praticamente depende somente da temperatura da câmara de combustão, onde o mesmo forma-se acima de 2000 K, sendo assim um poluente presente em motores Diesel pela alta pressão de compressão e elevada temperatura de combustão, favorecendo o aparecimento do NO<sub>x</sub>. Com Diesel foi encontrado 58 ppm na amostra de gases, estando dentro do esperado e de acordo com GOETZ et al. (1994).

Com etanol, o equipamento não identificou valores de NO<sub>x</sub>. Este resultado é de grande importância, pois o principal problema de emissões com motores Diesel são as emissões de óxidos de nitrogênio e de difícil controle sem pós-tratamento dos gases de escape, e o resultado foi possível porque o etanol apresenta um calor de vaporização cerca de 4 vezes maior que o Diesel (MUELLER e MUSCULUS, 2001) diminuindo a temperatura da câmara de combustão, desfavorecendo o aparecimento de óxidos de nitrogênio.

Entretanto, a maior vantagem do etanol na erradicação do NO<sub>x</sub> se torna um grande problema quando é analisado as emissões de HC. Os valores medidos foram de 2400 ppm, muito altos em comparação com 79 ppm com Diesel. GOETZ et al. (1994) reportaram também problemas de altos níveis de HC com o motor em baixa carga.

Os valores extremamente altos de HC são devidos ao baixo número de cetano do etanol, valor este entre 3 e 5. Com Diesel o valor é de 45, 9 vezes maior do que o etanol (MUELLER e MUSCULUS, 2001), além do maior calor de vaporização. Com isso, o etanol injetado que não entra em contato com a vela incandescente não entra em combustão, “lavando” a camisa do cilindro e sendo expulso junto com os gases resultantes do etanol que entrou em combustão. MUELLER e MUSCULUS (2001) realizaram imagens da câmara de combustão com uma câmera infravermelha e captaram o comportamento da combustão com Diesel e etanol. Na figura 5.a verifica-se a combustão homogênea do Diesel desde do momento que é injetado até cessar a chama de expansão, porém com etanol (figura 5.b) apenas os jatos que encontram a vela incandescente entram em combustão, justificando as altas emissões de HC.

Figura 4 – Comportamento de combustão. Diesel a esquerda, figura 5.a; etanol a direita, Figura 5.b.



Fonte: MUELLER, Charles J. ; MUSCULUS, Mark P. Glow Plug assisted ignition and combustion of metanol in an optical DI Diesel engine (2001)

Gráfico 3 - CO e CO<sub>2</sub> em torque máximo

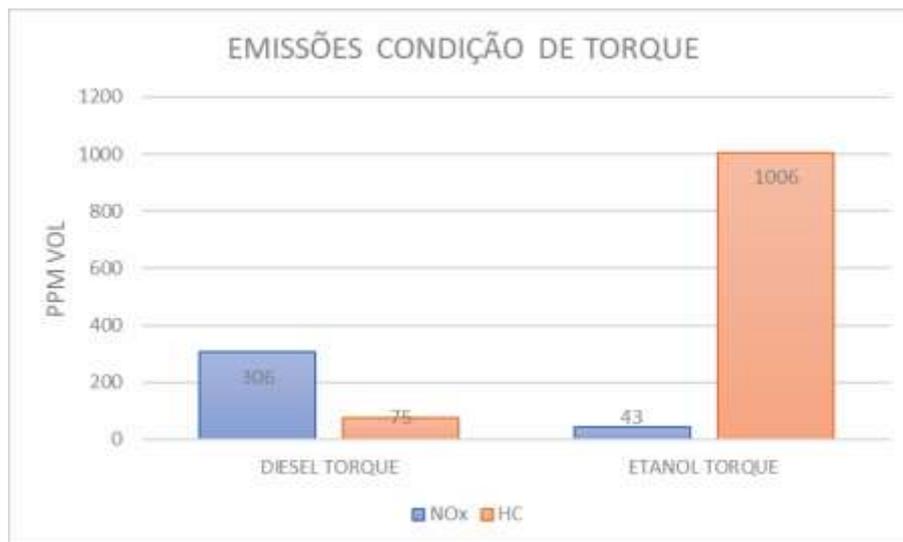


O gráfico 3 traz o comportamento das emissões de CO e CO<sub>2</sub> do motor 1.3 na condição de máximo torque (180 N.m). As emissões de CO obtiveram um aumento significativo em relação a marcha lenta com Diesel causadas por um aumento abrupto do débito de injeção para 26 mm<sup>3</sup>, próximo de 5 vezes mais do que a marcha lenta consome, assim favorecendo a combustão incompleta e formação de CO.

Vale ressaltar que o PC-MULTIGÁS não analisa quantidade de material particulado. Porém, durante os testes com Diesel, foi detectado visualmente o aparecimento de fumaça preta, característica da presença de altas concentrações de material particulado.

Com etanol, os valores de CO se mantiveram baixos, devido aos problemas com HC, mas os valores de CO<sub>2</sub> experimentaram um aumento esperado pois o débito registrou valor de 36 mm<sup>3</sup>.

Gráfico 4 -  $NO_x$  e HC em torque máximo



O gráfico 4 mostra os níveis de emissões de  $NO_x$  e HC para condição de torque. Atenção especial para os níveis de óxidos de nitrogênio com Diesel, atingindo 306 ppm, cerca de 6 vezes o valor em marcha lenta. O motor, em todos os testes, trabalhou com a válvula EGR (*Exhaust Gas Recirculation*) aberta, mas não impediu valores de altos de  $NO_x$ . Portanto seria necessário o uso de pós- tratamento de escape em motores comerciais. Com etanol validou-se a grande capacidade de produzir pouco  $NO_x$  até em condições onde a câmara de combustão está em sua maior temperatura pela condição de carga e sendo menor até que na marcha lenta com Diesel, porém os problemas de HC verificados na marcha lenta permanecem, apesar da maior temperatura de câmara de combustão.

## Conclusões

Após a análise dos resultados verificou-se que a operação com etanol foi satisfatória para a redução de  $NO_x$  tanto em marcha lenta quanto em carga, porém os níveis de HC subiram substancialmente em níveis muito altos em ambos os testes, criando problemas para a validação em uma possível operação comercial.

Os níveis de CO foram acima do esperado com a operação em marcha lenta a etanol, já verificado problemas com a queima do combustível mesmo com o emprego da vela incandescente e funcionamento com excesso de ar, característica do motores ciclo Diesel. E, inesperadamente, também com Diesel, indicando alguma calibração mal ajustada da injeção.

Uma possível aplicação, com melhorias no processo de combustão, como o emprego de mais velas incandescentes, é em motores estacionários, geradores e afins, que poderiam funcionar em regime, e diminuir a quantidade de poluentes lançados a atmosfera.

## Referências Bibliográficas

AUDICKAS, Erick Henrique; GABRIEL, Fabio Henrique Peixoto; CARVALHO, Rafael Ferreira de; MOREAL, Vinicius Fernandes Santos. **Aplicação da Técnica de Superfície Aquecida em Motores de Combustão Espontânea com Utilização de Etanol**. 2017. 74 f.

TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2017.

BORGNAKKE, Claus; SONNTAG, Richard E. Sistemas de Potência e Refrigeração - Fluidos de Trabalhos Gasosos: O Ciclo Diesel. In: BORGNAKKE, Claus; SONNTAG, Richard E.. **Fundamentos da Termodinâmica**. 8. ed. São Paulo: Blucher, 2013. p. 440-442.

BRAMBILA, Jean Amadeo. **Estudo experimental e análise termodinâmica de desempenho em um motor de combustão interna operando com óleo Diesel e etanol**. 2006. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

BRUETSCH et al. **Development of a Direct Injected Neat Methanol Engine for Passengers Car Applications**. In: FUTURE TRANSPORTATION TECHNOLOGY CONFERENCE AND EXPOSITION, 1., 1990, San Diego. **Paper**. Warrendale: SAE International, 1990. p. 1 - 13.

BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna**. São Paulo: Blucher, 2012. 485 p.

ECYCLE. **Monóxido de carbono: o que é, fontes emissoras e como evitar intoxicação**. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/2350-monoxido-de-carbono>>.

Acesso em: 30 nov. 2018.

ELETRÔNICA INDUSTRIAL, Napro. **Manual de Instruções PC MULTIGÁS** . 6. ed. [S.l.: s.n.], 2013. 63 p. v. 1.

GOETZ, Wendel A.; BARRINGER, Chris G.; BOZZELLI, Marco A.. **Utilizing Neat Methanol and Glow Plug Ignition in DI Diesels: Laboratory Testing of a Single and Multi- Cylinder Engine**. In: INTERNATIONAL CONGRESS AND EXPOSITION, 1., 1994, Detroit. **Paper**. Warrendale: SAE International, 1994. p. 1 - 18.

HEYWOOD, John B.. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. New York: McGraw- Hill, 1988. 930 p.

INGELIBRE (Espanha). **Ciclos Otto y Diesel. Análisis termodinámico**. Disponível em:

<<https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/04/09/ciclos-otto-y-diesel-analisis-termodinamico/>>. Acesso em: 19 nov. 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **CO2 Emissions from Fuel Combustion Report**. Paris: IEA, 2016.

MUELLER, Charles J.; MUSCULUS, Mark P.. Glow Plug Assisted Ignition and Combustion of Methanol in an Optical DI Diesel Engine. In: INTERNATIONAL SPRING FUELS & LUBRICANTS MEETING & EXHIBITION, 1., 2001, Orlando. **Paper**. Warrendale: SAE International, 2001. p. 1 - 20.

NANNI, N. et al. **Use of glow-plugs in order to obtain multifuel capability of Diesel engines**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ALCOHOL FUELS TECHNOLOGY, 4., 1980, Guarujá. **Agreement**. São Caetano do Sul: Anais, 1980. p. 1 - 20.