9
Conclusões

Neste trabalho foi utilizado o motor estacionário, ICO, monocilíndrico (Yanmar NSB50), adaptado para funcionar com dois combustíveis (diesel e etanol), injetados diretamente na câmara, por meio de injetores individuais. O motor foi montado numa bancada experimental, acoplado a um banco dinamométrico e instrumentado para captar as vazões dos combustíveis, a rotação, a pressão no interior do cilindro, o torque e as temperaturas do óleo lubrificante e da água do sistema e arrefecimento.

A base de dados captada nos experimentos forneceu o subsídio necessário para analisar o comportamento do motor em relação ao calor aparente liberado, à pressão máxima, ao início da combustão e à eficiência.

Nos testes realizados neste trabalho foram empregadas três estratégias de injeção nas operações com o motor modificado:

Teste DE - Foram efetuadas duas injeções: a primeira de etanol a -170º PMS e a segunda de diesel a -8º PMS;

Teste ED - Foram efetuadas duas injeções: a primeira de diesel a -8º PMS e a segunda de etanol a +4º PMS;

Teste EDE - Foram efetuadas três injeções: a primeira de etanol a -170º PMS, a segunda de diesel a -8º PMS e a terceira de etanol a +4º PMS;

A partir da análise dos resultados dos testes foi possível obter conclusões e propor recomendações e sugestões que estão descritas a seguir.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312938/CA

1.1.9.1
Comparação dos resultados dos Testes DE, ED e EDE

A Figura 9.1 mostra as curvas de calor aparente do Teste DE (D-8 / E+4), do Teste ED (E-170 / D-8) e do Teste EDE (E-170 / D-8 / E+4) em que a vazão de diesel é de 0,15 kg/h e a vazão total de etanol é de 0,43 kg/h.

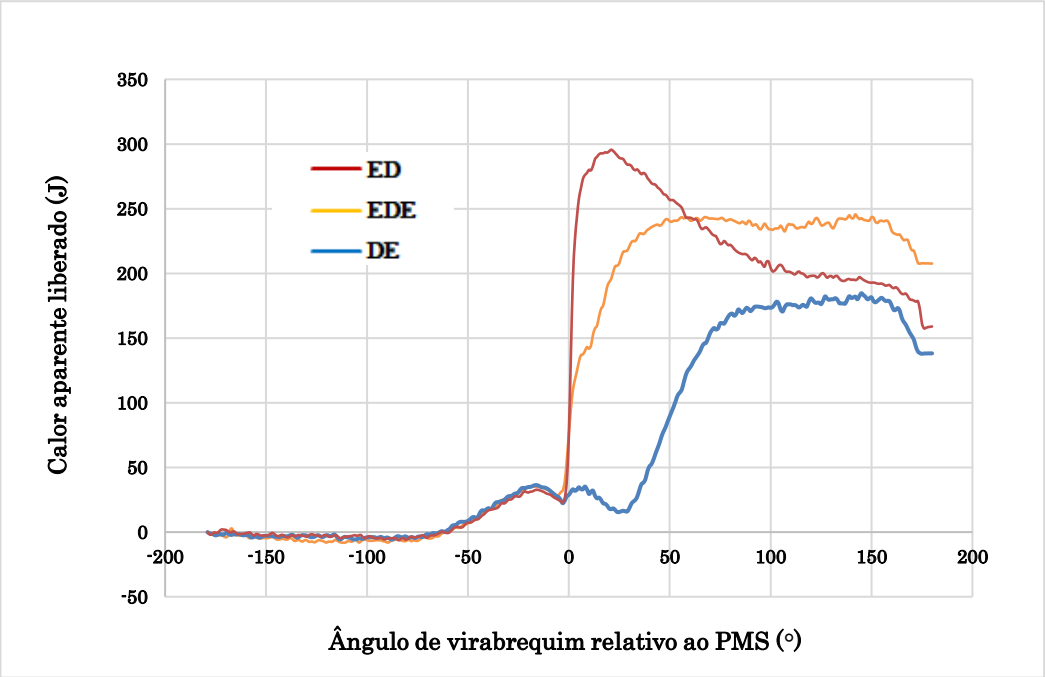

Figura 9.1: Calor aparente do Teste DE, ED e EDE com vazão de diesel de 0,15 kg/h e a vazão total de etanol de 0,43 kg/h.

Comparando as curvas da Figura 9.1, nota-se que o maior valor de calor aparente liberado ocorreu com a estratégia de injeção empregada no Teste ED, que é a combinação de duas injeções de combustível: etanol a -170º PMS e diesel a -8PMS. O Teste DE, que combina duas injeções de combustível: diesel a -8PMS e etanol a +4º PMS apresentou o menor valor de calor aparente liberado.

Apesar do experimento do Teste ED apresentar o maior valor de calor aparente liberado, a estratégia de injeção empregada no Teste EDE mostrou ser a mais adequada, pois a combustão ocorreu de forma suave e sem a ocorrência da detonação.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312938/CA

A Figura 9.2 mostra as curvas de pressão do Teste DE (D-8 / E+4), do Teste ED (E-170 / D-8) e do Teste EDE (E-170 / D-8 / E+4) em que a vazão de diesel é de 0,15 kg/h e a vazão total de etanol é de 0,43 kg/h.

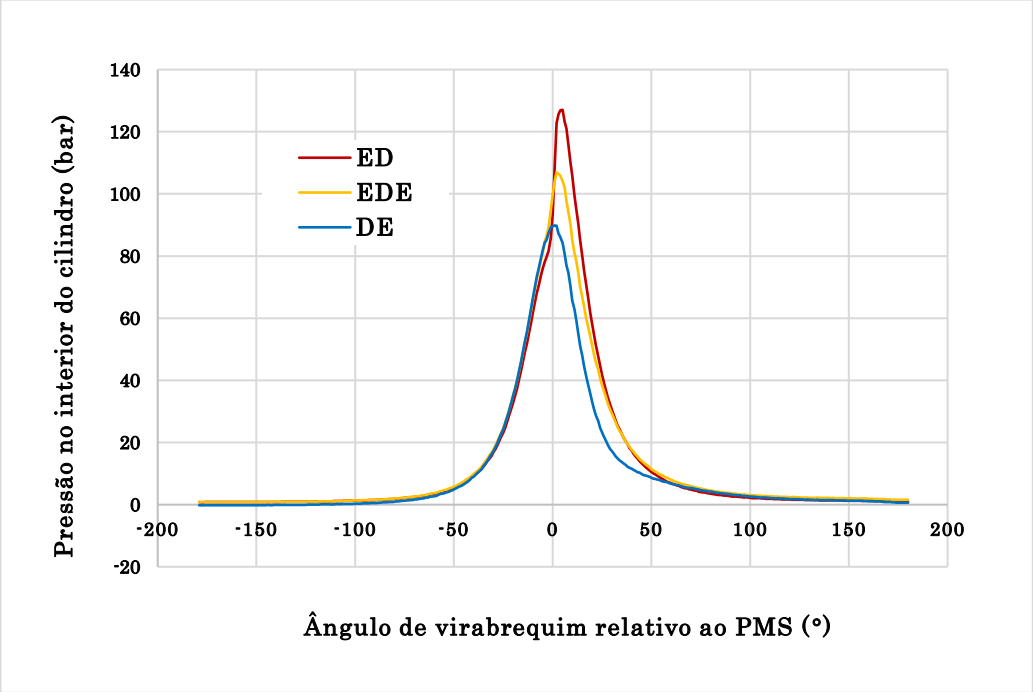

Figura 9.2: Pressão no interior do cilindro do Teste DE, ED e EDE com vazão de diesel de 0,15 kg/h e a vazão total de etanol de 0,43 kg/h.

Comparado as curvas de pressão exposta na figura 8.7 observa-se que a estratégia da tripla injeção empregada no Teste EDE possibilitou injetar a mesma quantidade de etanol (0,43kg/h) sem atingir picos de pressão elevadas como aconteceu no Teste ED.

1.2.9.1.1 Estratégia de Injeção

A estratégia de injeção empregada no Teste ED apresentou os melhores resultados de potência e eficiência. Entretanto, as pressões no interior do cilindro cresceram significativamente à medida que a vazão de etanol aumentou, impondo um limite de quantidade de etanol injetada antes do PMS. Para alcançar potência mais elevadas, sem danificar o motor, outra estratégia de injeção de combustível deve ser empregada.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312938/CA

Apesar de apresentar eficiência menor, se comparada ao Teste ED, a estratégia de injeção empregada no Teste EDE, mostrou-se mais adequada para obter potência mais elevadas sem criar condições para haver detonações durante o funcionamento do motor modificado. Isto porque as pressões se mantiveram na mesma ordem de grandeza das pressões alcançadas nos testes com o motor original.

A estratégia de injeção utilizada no Teste DE não proporcionou os mesmos resultados promissores que os outros testes. No experimento 1 do Teste DE, por exemplo, injetando etanol a vazão de 0,25 kg/h, não houve sequer produção de potência. Entretanto os resultados obtidos nos experimentos serviram de base para compor a estratégia de injeção do Teste EDE.

1.3.9.1.2
Taxa de substituição de diesel por etanol

Nos ensaios com o motor modificado a menor vazão de diesel estava limitada em 0,15 kg/h. Portanto, para se alcançar uma taxa de substituição maior foi necessário aumentar a vazão de etanol. Entretanto, na estratégia de injeção empregada no Teste ED, a vazão de etanol também estava limitada para evitar danificar o motor por conta do aumento da pressão no interior.

A estratégia de injeção do Teste EDE se mostrou mais adequada para aumentar a taxa de substituição, uma vez que o aumento da vazão do etanol injetado a +4º PMS não acarretou em aumento significativo da pressão no interior do cilindro não provocou detonações durante o funcionamento. Comparando com os resultados expostos na bibliografia,

A estratégia de tripla injeção direta no motor modificado proporcionou resultados satisfatórios. Egúsquiza (2011), por exemplo, utilizou um motor Diesel MWM 4.10 TCA para operar consumindo etanol hidratado, injetado no coletor de admissão, em substituição parcial ao óleo diesel. A taxa de substituição de diesel pelo etanol registrado nos experimentos realizados no trabalho de Egúsquiza foi cerca de 40%.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312938/CA

1.4.9.1.3
Eficiência

Nos ensaios com motor modificado a maior eficiência obtida foi de 34,8 %, no experimento 5 do Teste ED. Aumento expressivo se comparado ao motor original que, operando nas mesmas condições, obteve rendimento de 27,6%. Resultados de eficiência também foram satisfatórios se comparados aos da revisão bibliográfica:

- Pohlkamp, K. e Reitz, R. (2012) utilizaram um conjunto motor - gerador IC Yanmar L70AE, monocilíndrico funcionando com tecnologia RCCI. Os resultados mostram que o motor apresentou baixa eficiência operando em regime de cargas leve. Entretanto, operando com 75% de carga máxima, apresentou eficiência quase 3% maior.
- Hanson et al. (2012) investigaram o funcionamento de um motor ICO com tecnologia RCCI. Os combustíveis utilizados no experimento foram: a gasolina injetada na entrada do coletor de admissão (PFI) e o diesel injetado diretamente na câmara de combustão (DI). Os resultados mostram que o motor utilizando a tecnologia RCCI apresentou aumento na eficiência térmica de 37% para 40%.
- Splitter et al. (2011) utilizaram um modelo CFD multidimensional para investigar o efeito do tempo de injeção em um motor ICO, com tecnologia RCCI de simples e dupla injeção, operando com iso-octano e com n-heptano. Os resultados mostraram que as injeções duplas proporcionam um aumento de 1% na eficiência.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312938/CA

1.5.9.2
Recomendações

Os conhecimentos adquiridos na montagem da bancada experimental, na adaptação do motor para funcionar com dois injetores, na instalação dos sistemas de injeção de combustível e nos testes com o motor modificado, serviram de subsídio para compor as recomendações transcritas a seguir. Entretanto, podem ser aplicadas na montagem de outros experimentos semelhantes.

- As máximas pressões e temperaturas ocorreram nos experimentos em que o etanol foi injetado antes do PMS. Por conta disso, atentar para não danificar

o sensor de pressão e para não ocorrer o superaquecimento no sistema de arrefecimento.

- A utilização do etanol como combustível acelera o processo de corrosão das internas do motor. O óleo lubrificante dever ser monitorado diariamente e a substituição deve ser feita com frequência maior que a prevista em manual.

- Escolher um motor que seja possível instalar um *encoder* sem a necessidade de adaptações que comprometam o funcionamento. Este equipamento é de fácil instalação se comparado a roda fônica que tem a mesma função, mas necessita de outros dispositivos eletrônicos instalados separadamente, tornado a aferição da rotação trabalhosa e complexa.

1.6.9.3 Sugestões

As sugestões aqui expostas são dirigidas a trabalhos que pretendam utilizar a bancada experimental que foi utilizada neste trabalho, mas podem ser utilizadas em estudos relacionados a dupla injeção direta de combustível.

- Montar um sistema de arrefecimento capaz de controlar a temperatura de funcionamento do motor para avaliar qual seria a temperatura ótima de funcionamento.

- Avaliar a influência da injeção de etanol em diferentes antes e depois do PMS.

- Analisar as emissões dos gases de exaustão.

- Empregar um sistema EGR (*Exhaust Gas Recirculation*) para aumentar a temperatura no cilindro. Comparar as emissões de gases com e sem a utilização do EGR.

- Utilizar biodiesel (B100) e etanol ao invés de diesel e etanol nos testes com dupla injeção direta. Variar a carga e os pontos de injeção de ambos os combustíveis para verificar a influência destes parâmetros na eficiência.

- Seguindo o mesmo raciocínio, substituir o etanol pela gasolina nos testes com dupla injeção direta.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312938/CA

- Levantar as propriedades físico-químicas dos combustíveis utilizados e analisar a influência do número de cetano no processo de combustão.

- Analisar a degradação do sistema de lubrificação (óleo lubrificante e componentes internos) devido à utilização de combustíveis renováveis (etanol e biodiesel). E, a partir dos resultados, mapear a frequência de substituição do óleo lubrificante, analisar os componentes físico-químicos deste após a degradação. Este estudo é multidisciplinar e faz-se necessário um pesquisador da área de química.

- Mapear a vazão individual dos injetores com o motor funcionando com as diversas estratégia de injeção.

- Injetar etanol utilizando o sistema de injeção de diesel com a finalidade de pesquisar a influência da pressão no desempenho do motor. Neste caso lembrar de ter um conjunto de injetores e sobressalentes, uma vez que o etanol vai acelerar o desgaste do sistema de injeção.

- Injetar etanol utilizando o sistema de injeção de etanol com a finalidade de verificar a influência das estratégias de injeção.

Apesar de não ser o escopo desse trabalho, foram feitos alguns testes utilizando apenas etanol. Para assegurar a integridade da bancada experimentou os experimentos foram realizados com temperatura da água de arrefecimento abaixo de 70ºC.

Os experimentos foram feitos com motor modificado funcionando a 1600 rpm e divididos em duas etapas: a primeira injetando etanol a -170ºPMS; e a segunda particionando a injeção de etanol em -170º e +2º PMS. A Tabela 9.1 mostra os valores dos parâmetros de desempenho do motor modificado resultantes da injeção direta de etanol a -170 º PMS.

Tabela 9.1 Resultado da injeção de etanol a -170 º PMS

TEMPERATURA DA ÁGUA DE ARREFECIMENTO (°C)	TORQUE (Nm)	POTÊNCIA (W)	VAZÃO (kg/h)	RENDIMENTO (%)
65,4	4,7	775,4	0,50	21,0

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312938/CA

A Figura 9.3 mostra as curvas de pressão no interior do cilindro do motor modificado funcionando com etanol injetado em -170º PMS (E-170) e operando sem a injeção de combustível (sem combustão).

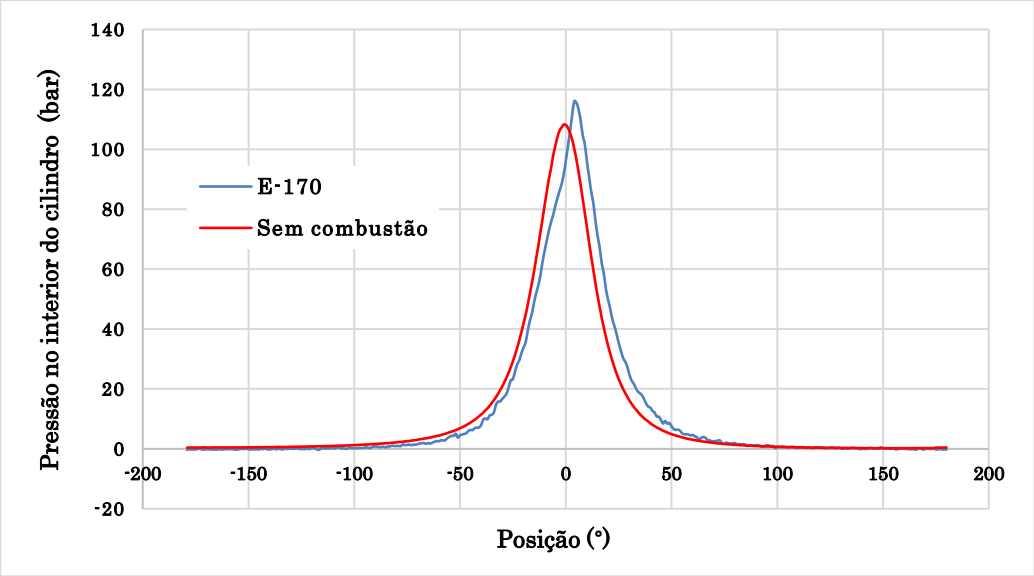

Figura 9.3 Pressão no interior do cilindro do motor modificado funcionando com etanol (E-170) e sem a injeção de combustível (sem combustão).

A pressão máxima alcançada foi de 116,0 bar e ocorreu em +4º PMS. O máximo valor do calor aparente liberado foi de 344,5 J em +12º PMS.

A Tabela 9.2 mostra os valores dos parâmetros de desempenho do motor modificado resultantes da injeção direta de etanol a -170 º e +2 º PMS.

Tabela 9.2 Resultado da injeção de etanol a -170 º e +2 º PMS

TEMPERATURA DA ÁGUA DE ARREFECIMENTO (ºC)	TORQUE (Nm)	POTÊNCIA (W)	VAZÃO (kg/h)	RENDIMENTO (%)
67,1	6,0	985,5	0,65	20,0

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312938/CA

A Figura 9.4 mostra as curvas de pressão no interior do cilindro do motor modificado operando sem a injeção de combustível (sem combustão) e funcionando com a injeção de etanol particionada em dois pontos: -170º PMS (E-170) e +2º PMS (E+2).

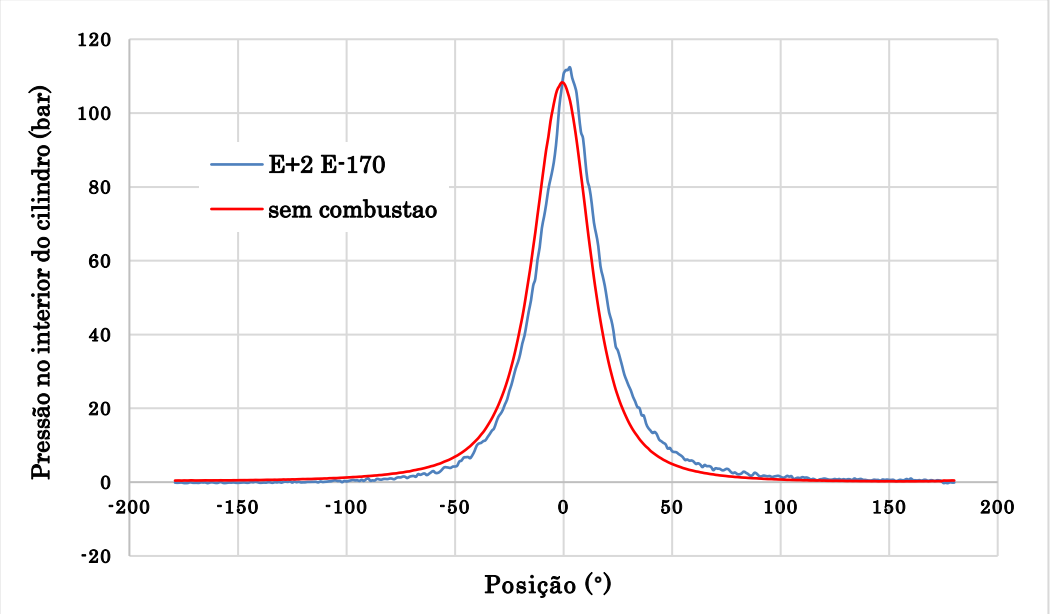

Figura 9.4 Pressão no interior do cilindro do motor modificado funcionando com etanol (E+2 /E-170) e sem a injeção de combustível (sem combustão).

A pressão máxima alcançada foi de 112,0 bar e ocorreu em +3º PMS. O máximo valor do calor aparente liberado foi de 277,0 J em +19º PMS.

Comprando os resultados é possível observar que a injeção de etanol antes do PMS em apenas uma etapa gera aumento de pressão no interior do cilindro por conta da queima abrupta do combustível e, consequentemente, possibilita a ocorrência de detonação. Os resultados do experimento E-170 indicam que injetar etanol em uma etapa não é a melhor estratégia de injeção. Pois apesar de alcançar maior rendimento do que experimento E-170/E+2, apresentou vários episódios de detonação.

A divisão da injeção em duas etapas (E-170/E+2) mostrou-se ser mais adequada. Porque, mesmo com maior quantidade de energia empregada (17.420 kJ/h), a pressão máxima foi menor se comparada a do experimento E-170.

O motor original funcionando a 1600 rpm e empregando 17.425,0 kJ/h de energia produziu 1,56 kW de potência, e alcançou 27,0% deficiência.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312938/CA

A investigação de outros pontos de injeção de etanol pode conduzir a descoberta de novas estratégias para melhorar a combustão e a eficiência do motor modificado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312938/CA