

6

Conclusões e Recomendações

6.1

Conclusões

No presente trabalho, ensaios experimentais utilizando óleo diesel e misturas de etanol com aditivos, foram realizados em uma máquina de compressão rápida. O objetivo principal foi verificar a possibilidade de utilizar o n-butanol, como aditivo melhorador da auto-ignição do etanol, com a finalidade de que possa ser utilizado como combustível (substituto do óleo diesel) em um motor de ignição por compressão.

Com base nos dados de pressão-tempo e deslocamento do pistão, foi possível analisar determinados parâmetros característicos da combustão, tais como início da combustão, máxima taxa de elevação da pressão, valor máximo da pressão, atraso da ignição e o calor aparente liberado produto da combustão. Dos resultados obtidos durante os testes realizados, podem-se estabelecer as conclusões seguintes:

6.1.1

Influências na utilização do combustível alternativo

- Durante a realização dos testes, foi possível observar que os combustíveis a base da mistura de etanol e aditivos melhoradores da autoignição (ED95 como combustível e PEG400, PEG600 e n-butanol como aditivos), não podem ser utilizados diretamente em um processo de ignição por compressão, sem se modificar a razão de compressão quando comparado ao óleo diesel. Esta conclusão se baseia no menor número de cetano das misturas e no alto calor latente de vaporização do etanol, quando comparado ao óleo diesel. Portanto, com a finalidade de se obter a queima do etanol aditivado, a primeira alteração mecânica a ser realizada é a elevação da razão de compressão. Dependendo do tipo de aditivo que se use, com a finalidade de aumentar o poder de autoignição do etanol, este aumento da razão de compressão pode variar. De acordo ao observado durante os testes finais, precisou-se elevar a razão de compressão de 16:1 para 20:1, de tal forma que as misturas de etanol

e PEG queimassem. Já no caso das misturas de etanol e n-butanol, precisou-se de um aumento maior (24:1). Isto mostra que as misturas de etanol e n-butanol apresentam um maior calor latente de vaporização que as misturas de etanol e PEG, além de ter um menor número de cetano.

- Considerando que o etanol, possui uma menor quantidade de energia por unidade de massa (menor PCI que o óleo Diesel), é importante ressaltar tal fato, já que em média, 80% de massa adicional de combustível (etanol aditivado) é injetado no processo de ignição por compressão com a finalidade de se manter constante a quantidade de energia injetada no processo de combustão. Portanto, durante os testes preliminares, precisou-se aumentar a pressão de injeção com a finalidade de poder injetar a mesma quantidade de energia química, no mesmo intervalo de tempo. Já nos testes finais, optou-se por injetar na mesma pressão, a fim de ter as mesmas condições iniciais para determinar o atraso da ignição. Desta forma, o tempo de injeção mudou de acordo com o combustível (óleo diesel ou mistura de etanol mais aditivo), que fora utilizado.
- Observando os resultados, pode-se mencionar também que, para todos os testes com razões de compressão similares, a pressão máxima, bem como a taxa máxima de variação da pressão, produto da queima do combustível, foi sempre maior quando utilizadas as misturas de etanol em comparação aos testes utilizando óleo diesel. Esta é uma das características do processo de queima do etanol. Portanto, nos processos de calibração dos motores é de grande importância o monitoramento dos picos de pressão, a fim de evitar a deteriorização dos elementos do motor, assim como também a geração de níveis elevados de ruído.
- Nos testes preliminares, foi testada a mistura (combustível já pronto) chamada ED95, a qual é uma mistura de etanol e melhoradores da autoignição, inibidores da corrosão e melhoradores da lubricidade. Este combustível, testado nos últimos anos em diversas partes do mundo, serviu como ponto de partida e inspiração para o desenvolvimento de outro produto similar. Mas cabe mencionar que, na atualidade, este combustível só trabalha em motores de ignição por compressão com razão de compressão da ordem de 28:1. Durante os testes realizados, as relações compressão utilizadas, onde o ED95 entrou em combustão variaram entre 20:1 e 25:1. Isto mostrou que não era necessário se fazer um incremento tão alto na razão de compressão para poder conseguir a queima do etanol aditivado. Menciona-se isto, porque o aumento da razão de compressão, implica em aumentar a resistência dos elementos do motor, o que encarece

o seu custo. Portanto, outras modificações além da razão de compressão devem ser tomadas em conta.

- Como foi observado durante a realização dos testes, e complementando a premissa anterior, pode-se dizer que, quando o aditivo utilizado foi a base de polietilenoglicol, a razão de compressão necessária para obter a queima da mistura de etanol mais o aditivo, para todos os testes teve que ser maior ou igual a 20:1. Já quando o aditivo utilizado foi o n-butanol, a razão de compressão teve que ser maior ou igual a 24:1.
- De acordo com a revisão bibliográfica, uma das premissas mencionadas a respeito das características dos aditivos a base de polietilenoglicol, foi a respeito do peso molecular do aditivo. Quanto maior o peso molecular do aditivo (PEG), menor é a quantidade necessária na mistura com o etanol. No presente estudo verificou-se que misturas de Etanol e PEG400, com percentuais entre 7% e 10%, não entraram em combustão sob condições similares de teste. Já para as misturas de Etanol e PEG600, com apenas 7% de aditivo, conseguiu-se a queima do etanol aditivado.
- Tendo em conta uma das premissas que também encontram-se na literatura, pode-se dizer que, efetivamente, o peso molecular do aditivo tem influência no percentual necessário na mistura com o etanol. Também é importante lembrar que, quanto maior é o percentual do aditivo (PEG) na mistura, menor será o atraso da ignição. Esta premissa não foi comprovada, pois quando foram realizados os testes preliminares e determinado o atraso da ignição, por meio das imagens obtidas através da câmera de alta frequência, este praticamente permaneceu constante.
- Através das imagens dos testes preliminares, captadas pela câmera de alta frequência, pode-se dizer que a queima do óleo diesel, apresentou-se de forma diferente, quando comparada à queima do etanol aditivado. No óleo diesel, normalmente a queima se origina próximo às paredes, como é mostrado na Figura 5.2. Já para as misturas de etanol e aditivo, pode-se observar que a combustão é originada em pontos numa região interior da câmara de combustão. É importante mencionar que esta região não é sempre a mesma. A queima do etanol aditivado é muito semelhante à queima nos processos de ignição por centelha, onde a combustão começa na região onde a centelha acontece. Portanto, tendo em vista que no processo de ignição por compressão não existe centelha, tudo parece indicar que o início da combustão do etanol aditivado, acontece na região onde as condições de pressão e temperatura são as mais favoráveis.
- Ainda sobre as imagens captadas pela câmera de alta frequência, observou-se que, para altas razões de compressão e avanços maiores, exis-

tia mais de uma região onde as condições eram propícias para a ignição. Isto mostra que, quanto maior é a razão de compressão e maior é o avanço da injeção, o processo de vaporização é melhor, e por conseguinte a queima do etanol aditivado pode ser melhor.

- Um dos desafios, nos tempos de hoje, é dispor-se de fontes renováveis de recursos energéticos. Por isso, com a visão de produzir um combustível que seja totalmente renovável, o n-butanol aparece como forte candidato a aditivo, como mencionado durante a revisão bibliográfica. O n-butanol normalmente é um derivado do petróleo, mas pode ser produzido de forma orgânica, mediante a fermentação de açúcares, o que dá origem ao biobutanol. Desta forma a mistura será um combustível 100% renovável.

6.1.2

Efeitos do avanço da injeção

- Além da mudança da razão de compressão, como parte das modificações no sistema, com a finalidade de que o etanol aditivado entre em combustão, faz-se necessário mudar o avanço da injeção. Em todos os casos, o aumento no avanço da injeção originou um incremento na pressão máxima de combustão.
- Em todos os testes com óleo Diesel, para uma mesma razão de compressão, quanto maior foi o avanço da injeção, o atraso da ignição foi menor. De igual forma, para um mesmo avanço, quando a razão de compressão foi maior, o atraso da ignição também foi menor.
- Nos testes com misturas de etanol e aditivos, o comportamento do atraso da ignição com relação ao avanço da injeção não foi similar como mostrado nos testes com óleo diesel. Mas, pode-se dizer que o processo de combustão, para uma razão de compressão determinada, apresenta uma faixa de avanço na qual a ignição da mistura acontece e, além disso, dentro desta faixa, pode-se encontrar um avanço determinado que origina um atraso da ignição mínimo.
- O avanço da injeção cumpriu um papel importante no desenvolvimento do processo de combustão das diferentes misturas testadas. Como é observado ao longo do trabalho, os picos de pressão, o início da combustão, as taxas de variação de pressão e queima do etanol aditivado, estiveram sempre ligados ao avanço da injeção. É importante mencionar que, de acordo com as características (numero de cetano e calor latente de vaporização) da mistura, a faixa de avanço no qual a combustão acontece varia. Normalmente, para combustíveis com alto numero de cetano, esta

faixa é bem próxima do PMS. Já para aqueles combustíveis com baixo número de cetano, a faixa se desloca para um intervalo ($33^\circ - 13^\circ$ CA) antes do PMS.

- Independente da razão de compressão em que o etanol aditivado entra em combustão, avanços maiores geram melhores condições para a ignição do etanol aditivado. Isto se mostra nas imagens dos testes com razão de compressão acima de 24:1, onde mais de uma região foi propícia para a ignição do etanol aditivado.
- Assim, como é favorável para o processo de queima, a utilização de avanços da injeção maiores é prejudicial muitas vezes devido ao surgimento de elevadas taxas de aumento da pressão e, em muitos casos, picos de pressão elevados e próximos do PMS. Isto pode gerar desgaste dos elementos do motor, níveis de ruído elevados e até detonação.

6.2

Recomendações e Sugestões para Trabalhos Futuros

Os testes realizados na máquina de compressão rápida serviram para dar uma noção das modificações necessárias que há de se ter em conta, quando as misturas forem testadas em motores de ignição por compressão. O próximo passo será testar estas misturas em um motor adaptado, segundo as recomendações deste trabalho, e fazer um estudo mais detalhado do processo de combustão (taxa de liberação de calor, calor aparente acumulado, fração de massa queimada, etc). Estes parâmetros não foram determinados na MCR pois os processos de compressão e expansão só são comparáveis aos dos motores nas vizinhanças do PMS. Com base nisso, são apresentadas as seguintes sugestões e recomendações para trabalhos futuros:

- Sabe-se que o etanol é um elemento altamente corrosivo e que tem pouca lubricidade quando comparado ao óleo diesel. Durante os testes foi preciso trocar duas vezes a bomba de injeção e uma vez o injetor de combustível. Portanto, é de vital importância o uso de aditivos que permitam diminuir a corrosividade e aumentar a lubricidade.
- A utilização de aditivos ao etanol para melhorar suas propriedades, e efeitos sobre o sistema de injeção, podem, de forma significativa, mudar as propriedades e o comportamento da nova mistura no processo de ignição por compressão. Este fato pode ser analisado na máquina de compressão, com a finalidade de verificar as mudanças (razão de compressão e avanço da injeção) a serem consideradas para que o etanol aditivado entre em combustão.

- Uma das propriedades importantes nos combustíveis que são utilizados no processo de ignição por compressão é o número de cetano. Acredita-se que, como parte de trabalhos futuros, esta propriedade deva ser determinada. Uma vez conhecidos estes valores, misturas mais específicas podem ser realizadas, em termos de percentual de aditivo e tipo de aditivo melhorador da autoignição do etanol.
- Atualmente os motores de ignição por compressão têm um sistema que resfria o ar de admissão que sai do compressor. Normalmente este sistema consiste de um trocador de calor (ar - ar). Conforme se aumenta a velocidade do ar externo, aumenta a transferência de calor e, por conseguinte, a temperatura do ar diminui. Uma das sugestões nos testes iniciais das misturas no motor, é diminuir a troca de calor, com a finalidade de que o ar de admissão não seja tão resfriado, e ingresse, ainda quente, no cilindro. Tal procedimento reduzirá a massa de ar injetado e, conseqüentemente, a potência máxima do motor, mas pode facilitar a queima do etanol aditivado.
- Devido aos altos valores de pressão máxima na combustão do etanol aditivado, deve-se sempre monitorar a pressão no interior da câmara de combustão, pois pressões acima do limite estabelecido podem danificar o motor.
- Devido à quantidade de energia contida no etanol, o processo de ignição por compressão requer injetar 80% a mais em massa de etanol aditivado, com relação ao óleo diesel. A maior massa de etanol aditivado é disponibilizada, via aumento do tempo injeção, pressão do sistema de injeção ou área de escoamento do combustível através dos orifícios do injetor. Como todos estes parâmetros têm forte relação com a pulverização do combustível, devem ser objetos de estudos individuais. Todos terão influência direta na combustão e formação de poluentes.
- Outra alternativa, para superar o problema da quantidade de etanol aditivado que deve ser injetado ao sistema, é aumentar o diâmetro dos orifícios, reduzindo desta forma a pressão de injeção do combustível (menor custo do sistema de injeção).
- O aumento da pressão de injeção e o tempo da injeção favorecem na injeção de maior quantidade de massa de etanol aditivado (mesma quantidade de energia) ao processo de combustão. Comentou-se no Capítulo 5, que seria interessante poder realizar múltiplas injeções, de tal forma que não se precise modificar o sistema de injeção. A experiência em outros trabalhos realizando injeções de etanol após a injeção principal

não foram muito favoráveis. A sugestão é injetar pequenas quantidades e utilizar avanços de injeção bem próximos do avanço principal. A finalidade é aproveitar o aumento da temperatura produto da combustão para vaporizar o restante de combustível injetado e que este queime totalmente.