Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

VARREDURA DE AVANÇO DE IGNIÇÃO COM COMBUSTÍVEIS VARIADOS EM UM MOTOR MONOCILÍNDRICO SI

IGNITION SWEEP WITH DIFFERENT FUELS IN A SINGLE CYLINDER SI ENGINE

VARIACIÓN DE AVANCE DE IGNICIÓN CON COMBUSTIBLES VARIADOS EN UNO MOTOR MONOCILÍNDRICO SI

Filipe Augusto Herzer[1]
Marcelo Rohrig[2]
Diego Golke[3]
Mario Eduardo Santos Martins[4]
Nina Paula Gonçalves Salau[5]

Resumo: Impulsionado pelas novas legislações que favorecem a eficiência energética, redução de emissões e utilização de biocombustíveis, realiza-se uma comparação de instantes de centelha para diferentes combustíveis. Uma posterior análise entre eles fornece informações referentes a emissões, temperaturas e parâmetros de combustão. Os resultados, por fim, mostram uma maior competitividade dos biocombustíveis frente ao combustível fossil, já que suas características físico-químicas podem aumentar a eficiência e diminuir a emissão de CO_2 na análise *well-to-wheel*, ou seja, no ciclo desde a fonte de produção até a roda do veículo.
Palavras-chave: Biocombustíveis. Misturas. Estabilidade de combustão. Emissões. Detonação.

Abstract: Driven by new legislation that favors energy efficiency, emission reduction and use of biofuels, a comparison of spark instants for different fuels is carried out. Further analysis between them provides information on emissions, temperatures and combustion parameters. The results, finally, show a greater competitiveness of biofuels against fossil fuel, since its physico-chemical characteristics can increase the efficiency and reduce the emission of CO_2 in the well-to-wheel analysis, that is, in the cycle from the source to the wheel of the vehicle.
Keywords: Biofuels. Blends. Combustion stability. Emissions. Knock.

[1] Aluno de Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Maria. filipeherzer@gmail.com.
[2] Aluno de Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Maria. marcelo.rohrig@gmail.com.
[3] Aluno de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. diego_golke@hotmail.com.
[4] Ph.D. em Engenharia Mecânica. Brunel University West London. mario@mecanica.ufsm.br.
[5] Dra. em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. ninasalau@ufsm.br.

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Resumen: Impulsado por las nuevas legislaciones que favorecen la eficiencia energética, la reducción de las emisiones y el uso de biocombustibles, se realiza una comparación de instantes de chispa para diferentes combustibles. Un posterior análisis entre ellos proporciona informaciones referentes a emisiones, temperaturas y parámetros de combustión. Los resultados, por fin, muestran una mayor competitividad de los biocombustibles frente al combustible fósil, ya que sus características fisicoquímicas pueden aumentar la eficiencia y disminuir la emisión de CO_2 en el análisis well-to-wheel, es decir, en el ciclo desde la fuente de producción hasta la rueda del vehículo.
Palabras-clave: Biocombustibles. Mezclas. Estabilidad de la combustión. Emisiones. Detonación.

Envio: 20/04/2019 **Revisão: 22/04/2019** **Aceite: 25/07/2019**

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Introdução

O contínuo aumento da rigidez das normas que regem o futuro da mobilidade brasileira e regulamentam as emissões gasosas provenientes dos motores de combustão interna incitam a utilização de diversas tecnologias aplicadas ao contexto. Desse modo, o crescente aumento dos preços e da utilização de combustíveis fósseis apontam como uma das soluções o desenvolvimento de motores que operem com combustíveis alternativos, que favoreçam o downsizing (Stein, House, Leone, 2009). Esses ainda são favorecidos por programas de incentivos nacionais como o RenovaBio, que busca garantir a presença dos biocombustíveis na matriz energética brasileira em pelo menos 18% e garantir oferta constante para produção e venda dos biocombustíveis. O Rota 2030 é outro projeto, que por sua vez é focado na indústria automotiva, e busca incentivar o desenvolvimento de tecnologias, aumentar a eficiência energética e a reduzir as emissões de poluentes. A partir da síntese proposta, o objetivo do presente trabalho é realizar a varredura de avanços de ignição (do inglês ignition timing sweep) para dois diferentes biocombustíveis: etanol hidratado com 5% de água em razão volumétrica e o n-butanol anidro (B100). Além desses, uma mistura com 73% v/v (razão volumétrica) de butanol e 27% v/v de etanol (B73E27) será utilizada para uma posterior comparação de desempenho e emissões com a gasolina vendida em postos de combustíveis brasileiros (G73E27).

Metodologia

Embora o etanol hidratado (E95W05) seja propício para utilização devido ao grande número de octanas presentes, o seu poder calorífico inferior (PCI) reduzido limita a autonomia do veículo frente à gasolina brasileira (G73E27). Uma alternativa para reduzir a diferença entre esses valores de PCI (poder calorífico inferior) é a utilização de butanol anidro (B100) em mistura com etanol (B73E27). Os valores das propriedades dos combustíveis utilizados nos testes são apresentados na tabela 1.

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Parâmetro	Combustível			
	E95W05	**B100**	**G73E27**	**B73E27**
Densidade (kg/m³)	786	806	760	804
PCI (MJ/kg)	26.84	33.12	38.51	31.46
Octanas	110	94	89	-

Tabela 1. Valores e parâmetros dos combustíveis utilizados.
Adaptado de Thewes - Analysis of the Effect of Biofuels on the Combustion in a Downsized DI SI Engine, 1991.

Os testes experimentais foram realizados em um motor monocilíndrico Agrale M90 originalmente Diesel, adaptado para operar com injeção de combustível no duto de admissão e ignição por centelha. A sonda lambda Bosch LSU 4.2 foi utilizada para medir a concentração de oxigênio na exaustão e, desse modo, controlar a razão ar-combustível da mistura. A pressão de cilindro foi medida através da adaptação de um transdutor de pressão piezoelétrico AVL GH14D no cabeçote do motor, e esses dados foram sincronizados através da utilizadação de um *encoder* Veeder Root B58N, que possui resolução de 0,1° do virabrequim (*crank angle degree* ou CAD). As condições ambientes – temperatura, pressão e umidade – foram obtidas através da utilização do VAISALA HMT330. As demais temperaturas foram controladas e medidas por termopares tipo K, enquanto os dados de pressão foram obtidos através da adaptação de transdutores de pressão MPX4250AP, da manufaturadora Freescale Semiconductor. O equipamento AVL SESAM FTIR i60 realizou a análise das emissões provenientes da combustão enquanto o controle de carga, rotação e aquisição de dados do motor foram feitos através da plataforma automatizada AVL PUMA OpenTM, que atua sobre um dinamômetro AVL DynoPerform 240. As medidas de consumo foram realizadas através da adaptação de uma bureta com resolução de 0,2 mililitro na linha de combustível do motor. Um diagrama geral do sistema utilizado é mostrado na figura 1.

Para realizar a avaliação dos parâmetros obtidos através das médias dos ciclos observados, um posterior processamento de dados foi necessário. Para tal, o software comercial Microsoft Office Excel foi utilizado, que também foi responsável pela produção

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

dos gráficos que representam os dados obtidos experimentalmente e são mostrados no corpo desse trabalho. Para avaliação dos parâmetros, com o intuito de eliminar a variabilidade cíclica que ocorre durante o experimento, realiza-se a aquisição de 200 ciclos, retornando, por final, a média desses, que é um dos melhores meios para representação dos eventos ocorridos ao longo de todos os ciclos, atenuando erros, instabilidade, ruído e imprecisões gerais.

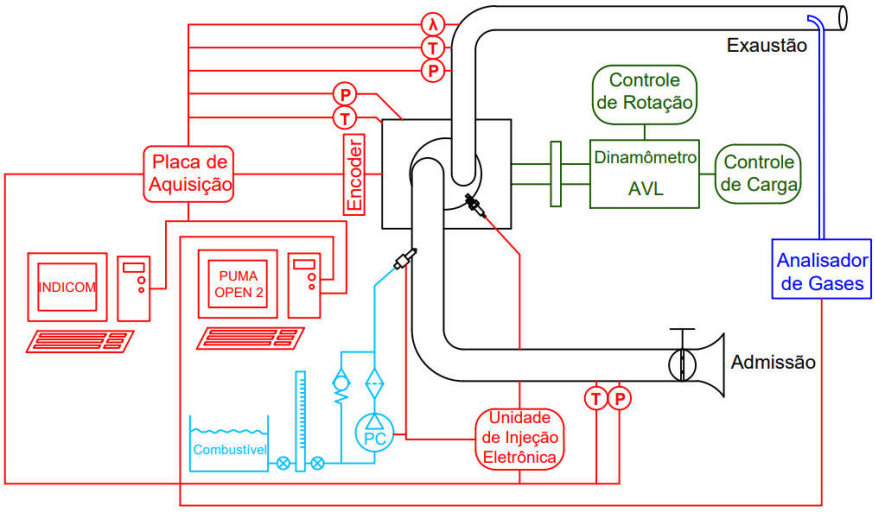

Figura 1. Diagrama eletro-hidráulico do sistema.
Adaptado de Sari - Exploring optimal operating conditions for wet ethanol use in spark ignition engines, 2018.

As condições de testes empregadas para todos os combustíveis foram: 700 kPa de pressão média efetiva indicada (IMEP – *indicated mean effective pressure*), velocidade de rotação de 1800 rpm, razão ar-combustível estequiométrica ($\lambda = 1{,}00$) e razão de compressão igual a 9,5:1, de modo a fornecer uma maior extensão de pontos de ignição operáveis. A bibliografia aconselha a utilização do instante de 50% de massa queimada (CA50 – *cranck angle of 50% mass fraction burned*) em 8 CAD após o ponto morto superior (Heywood, 2018), e desta forma a varredura de avanços de ignição neste presente trabalho realizou-se através da observação do CA50, e não diretamente através do ponto de ignição. Desse modo, altera-se o ponto de ignição de cada combustível para que o CA50 varie entre 6 e 14 graus de virabrequim após o ponto morto superior. Todavia, a figura 2 mostra os pontos de ignição

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

utilizados experimentalmente para cada um dos pontos realizados durante a varredura dos instantes de CA50.

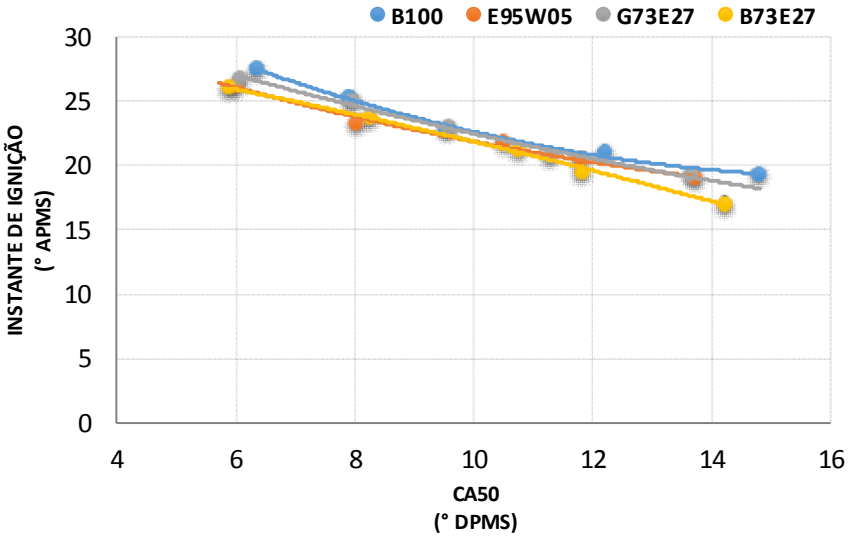

Figura 2. Ângulo de ignição em função do CA50 para os combustíveis utilizados.

Através da análise do ângulo utilizado para a centelha de cada combustível, observa-se um comportamento quase linear durante a realização do trabalho. Também, vale ressaltar o comportamento semelhante que os combustíveis apresentaram, possuindo maiores discrepâncias somente para os valores mais atrasados de CA50, local onde o coeficiente de variação do IMEP aumenta, mostrando a presença de uma combustão instável e, desse modo, de menor confiabilidade dos valores pois esses oscilam de uma maior forma quando comparados a pontos com menores valores para esse parâmetro, que será melhor explicado posteriormente no corpo do texto.

Resultados e Discussão

O principal motivo para utilizar a razão de compressão de 9,5 é a redução da ocorrência de detonação – ou *knock* - nos pontos mais avançados de CA50 (6 a 8 CAD após o ponto morto superior). Um dos métodos para sua verificação é a análise da taxa de crescimento da pressão, representada na unidade bar/°, e os resultados dos testes

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

experimentais para esse parâmetro são mostrados na figura 3. O B100 apresentou algumas condições de detonação durante os testes experimentais, detectados pelo diagrama de pressão dos ciclos de combustão. Esse fato pode ser justificado pelo combustível possui menor número de octanos, como mostra a tabela 1. Seguindo o mesmo padrão de análise de número de octanas, verifica-se que o E95W05 é o combustível mais resistente à detonação entre os testados, o que é explicado por um maior número de octanas na sua composição química. Outro fator que diminui a detonação do etanol e pode ser observado nesse trabalho é a presença de água, que atua como agente antidetonante.

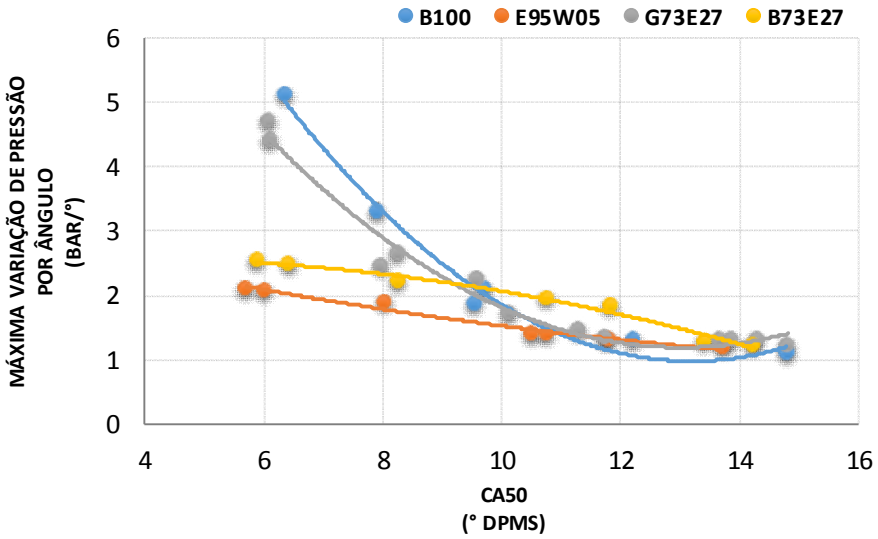

Figura 3. Variação de pressão por ângulo em função do CA50 para os combustíveis utilizados.

O coeficiente de variação (CoV) do IMEP é o valor obtido entre a razão do desvio padrão pela média do vetor, o qual representa a variabilidade sobre a média durante os ciclos. Para aplicação em motores de combustão interna, as indústrias automotivas de alto desempenho e tecnologia recomendam valores inferiores a 3 por cento. Ao observar a figura 4, a seguir, percebe-se que o valor do coeficiente de variação para a pressão média efetiva indicada possui um comportamento tendencioso, que aumenta conforme se atrasa o instante de 50% de massa queimada para cada um dos combustíveis. Vale ressaltar que embora a combustão atrasada (maiores valores de CA50) seja possível, ela fica prejudicada e possui a

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

presença de uma combustão instável, que pode gerar maiores concentrações de emissões não desejadas.

O único combustível que obteve resultados dentro dos limites aceitos para uma boa dirigibilidade foi o G73E27, na faixa entre 6 e 9 graus de CA50. Esse fato pode ser atrelado a uma razão de compressão adequada ao combustível, já que o etanol requer maiores compressões para atingir seu ponto de maior eficiência. Embora o butanol esteja perto da razão de compressão ideal para o combustível, seu baixo número de octanas, conforme tabela 1, remete a baixas ocorrências de detonação (figura 3), que, desse modo, degradam o valor do CoV. O combustível B73E27 apresenta um comportamento de coeficiente de variação inicialmente parecido com o B100, já que sua maior parte mássica é composta do mesmo combustível.

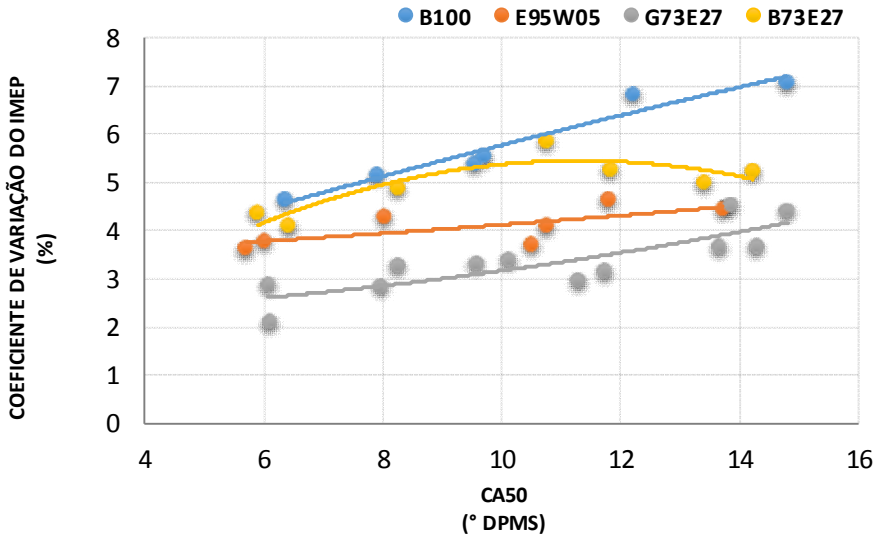

Figura 4. Coeficiente de variação do IMEP em função do CA50 para os combustíveis utilizados.

A temperatura do cabeçote é o parâmetro utilizado para avaliar a temperatura de combustão dos diferentes combustíveis, e é mostrada na figura 5. Verifica-se que todos os combustíveis possuem um caráter linear decrescente conforme se atrasa o instante de ignição, já que a pressão interna instantânea no momento do CA50 também aumenta. Por consequência, diminui-se a temperatura e velocidade da frente laminar de chama, aumentando

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

o tempo de combustão necessário. Todos os combustíveis possuem os limites de temperaturas do cabeçote próximos, com exceção do E95W05. As menores temperaturas impactaram nas emissões de poluentes, e foram causadas devido ao maior calor latente de vaporização que o etanol possui perante os demais combustíveis.

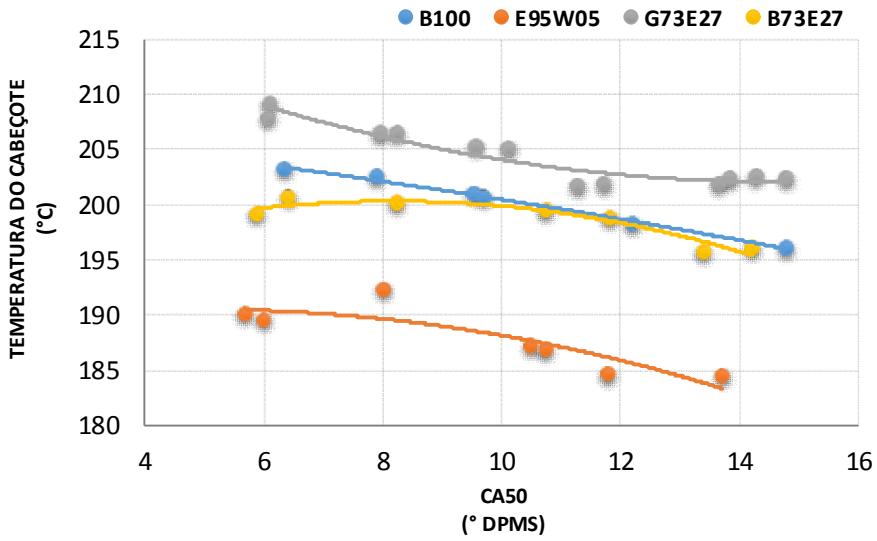

Figura 5. Temperatura do cabeçote em função do CA50 para os combustíveis utilizados.

Os dados obtidos sobre as emissões de hidrocarbonetos totais são mostrados na figura 6. Percebe-se que o etanol possui sua combustão degradada com o atraso significativo da ignição. Esse fato é justificado pela menor temperatura de frente de chama alcançada, já que possui maiores transferências de calor. O B100 apresenta comportamento diferente dos outros combustíveis para valores avançados de ignição, e esse fato pode ser causado pela ocorrência de detonação nos dois primeiros pontos realizados. Durante o restante dos testes experimentais o B100 apresenta emissão de hidrocarbonetos constante, fato também perceptível no B73E27, composto em maior parte por butanol além da tendência apresentada pelo etanol, também presente na mistura.

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

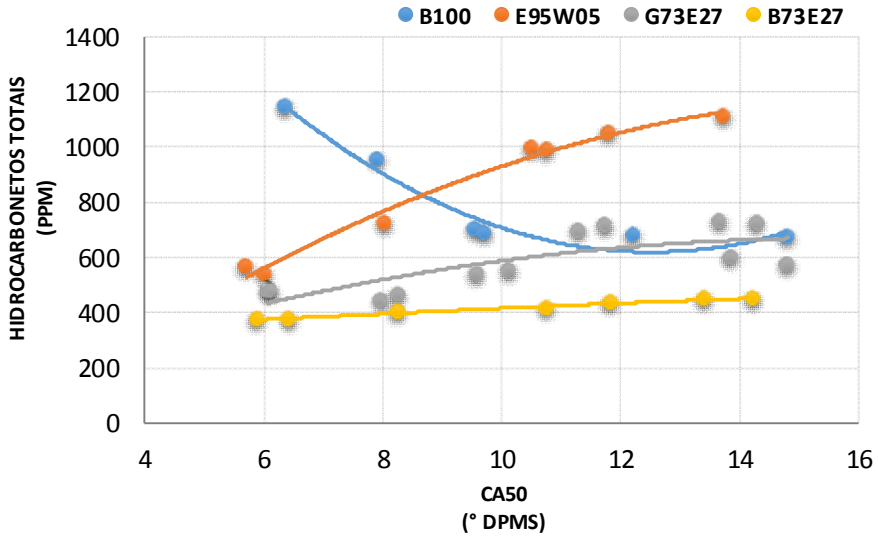

Figura 6. Emissão de hidrocarbonetos totais em função do CA50 para os combustíveis utilizados.

Os biocombustíveis apresentaram menores emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) quando comparados ao G73E27, como pode ser observado na figura 7. Altas temperaturas de combustão são diretamente proporcionais à liberação de NOx, já que dissociam as moléculas de nitrogênio do ar admitido com maior facilidade. Desse modo, podem-se comparar as emissões dessa espécie com a temperatura do cabeçote, presentes na figura 5. Percebe-se que o E95W05 apresenta as menores temperaturas de cabeçote e, por consequência, as menores liberações de NOx, e o fato se repete com os demais combustíveis.

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

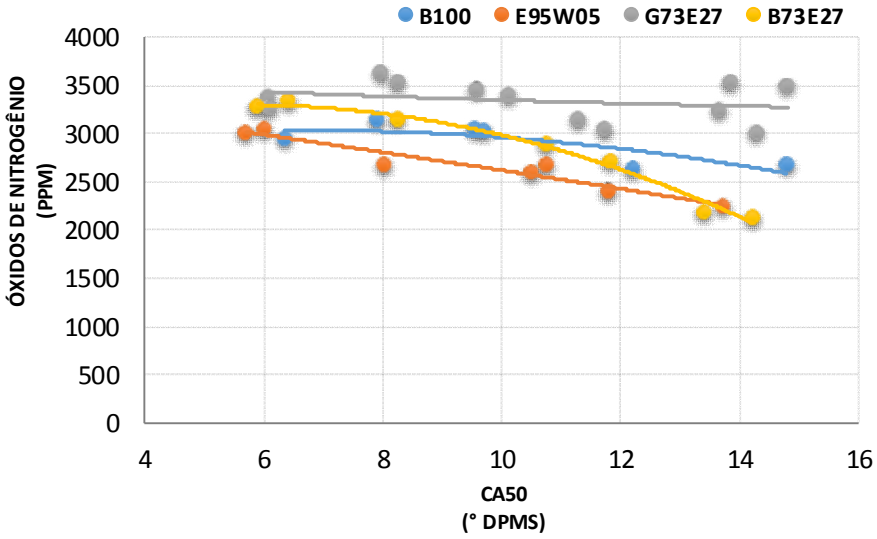

Figura 7. Emissão de hidrocarbonetos totais em função do CA50 para os combustíveis utilizados.

As emissões de monóxido de carbono (CO) dos combustíveis seguem um mesmo padrão, como mostra a figura 8, com exceção do G73E27. Essa diferença pode estar atrelada ao fato de os álcoois possuírem oxigênio em sua estrutura molecular, o que gera um aumento na emissão de CO. O E95W05 possui as menores emissões de CO devido a uma melhor eficiência de combustão, já que possui uma menor temperatura de autoignição que o butanol. Um ponto a ser ressaltado são as baixas emissões de CO para os pontos adiantados de ignição de B100, que pode se explicar pela maior emissão de THC, que também afeta os pontos de ignição atrasada do E95W05.

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

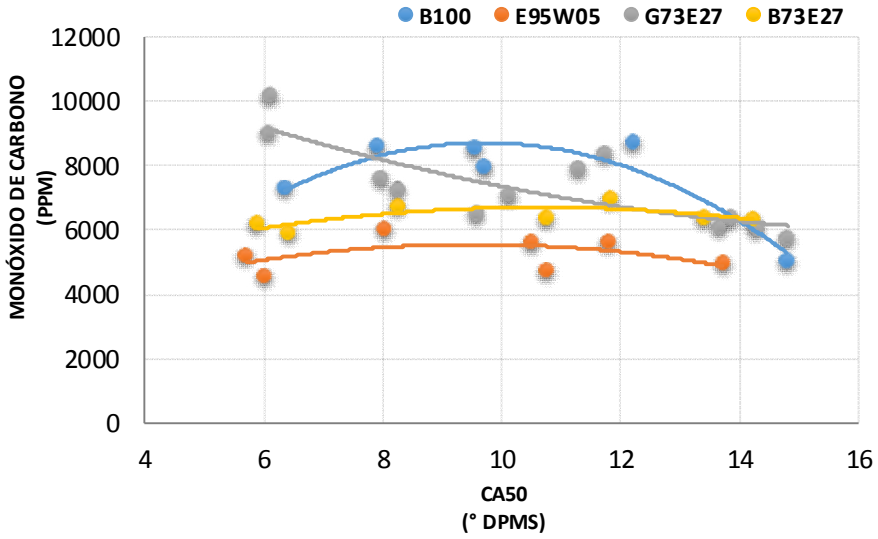

Figura 8. Emissão de monóxidos de carbono em função do CA50 para os combustíveis utilizados.

Por fim, o gráfico de eficiência indicada mostrado na figura 9 aponta que todos os biocombustíveis apresentam maior eficiência quando comparados a G73E27. Os valores de THC das emissões seguem atrelados a esse gráfico, evidenciados pelos pontos de baixo CA50 do B100 e dos altos valores para o E95W05. A maior duração de combustão apresentado para os valores mais elevados de CA50 são responsáveis por uma maior eficiência indicada, em razão de uma maior eficiência de combustão. Todavia esses valores degradam-se no extremo do CA50, onde o coeficiente de variação (CoV) do IMEP atinge valores elevados e apontam uma grande instabilidade da combustão.

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

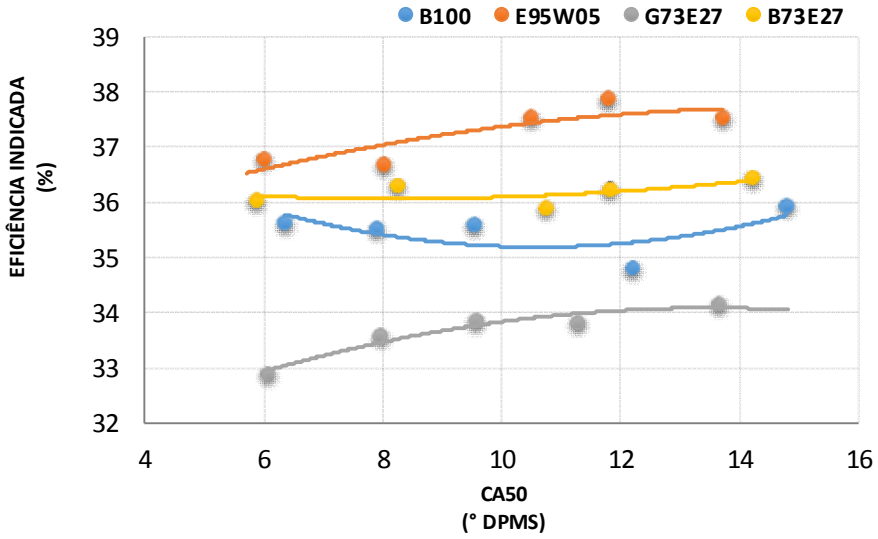

Figura 9. Eficiência indicada em função do CA50 para os combustíveis utilizados.

Conclusão

Em uma análise global verifica-se que o E95W05 possui sua combustão degradada devido a estar fora da razão de compressão adequada para a utilização. A gasolina é o combustível que apresenta a melhor adequação para a razão de compressão de 9,5:1, enquanto o B100 poderia ter sua razão de compressão de utilização reduzida por causa de parâmetros antidetonantes.

Embora possua os maiores valores de poder calorífico inferior, o B100 apresenta os piores desempenhos quanto a detonação, que pode ser evidenciado pela presença da maior taxa de aumento de pressão, mostrado no figura 3, pela presença de leves níveis sonoros do barulho característico que apresenta e pelo ruído presente no gráfico de pressão durante o teste experimental. O combustível B73E27 apresentou melhores desempenhos quanto a esses parâmetros, o que prova que a adição de 27% de etanol (combustível com melhores parâmetros de combustão e maior número de octanas) em volume da mistura são capazes de melhorar o combustível para aplicação a razão de compressão do ensaio experimental, sendo capaz de aumentar a eficiência indicada, reduzir as emissões e diminuir a presença de detonação para os pontos de ignição realizados.

Instante de ignição adiantada (baixos valores de CA50) apresentam maiores índices de detonação (figura 3), enquanto os pontos de centelha atrasados (valores elevados de CA50) apresentam os valores de coeficiente de variação muito altos perante o estipulado pela indústria, inviabilizando sua aplicação por causa da instabilidade da combustão e da dificuldade na dirigibilidade que ela traz. Ao descartar os dois extremos de CA50 por inviabilizações de aplicação, sugere-se a utilização dos valores médios de CA50 testados, os quais conferem com a literatura ao se manterem entre 8 e 12 graus de virabrequim após o ponto morto superior. Essa faixa de operação não é a mais eficiente para alguns dos combustíveis testados, mas torna-se vantajoso por não possuir nenhum parâmetro de combustão ineficiente e por não ter limites altos de nenhuma emissão quando comparadas aos valores obtidos em pontos similares para o teste experimental.

Em suma, os biocombustíveis apresentam caráter competitivo perante o combustível fóssil, já que sua estrutura atômica favorece a ocorrência da combustão de uma maneira mais estável e ideal.

Referências

Stein, R.A., House, C.J., and Leone, T.G., "**Optimal Use of E85 in a Turbocharged Direct Injection Engine**", SAE Technical Paper 01(1490):670–682, 2009, doi:10.4271/2009-01-1490.

Thewes, M., Müther, M., Brassat, A., Pischinger, S., and Sehr, A., "**Analysis of the Effect of Bio-Fuels on the Combustion in a Downsized DI SI Engine**", SAE International Journal of Fuels and Lubricants 5(1):274–288, 2012, doi:10.4271/2011-01-1991.

R.L. Sari, D. Golke, H.J. Enzweiler, N.P.G. Salau, F.M. Pereira, M.E.S. Martins, "**Exploring optimal operating conditions for wet ethanol use in spark ignition engines**", Applied Thermal Engineering (2018), doi: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.078.

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. 2º ed., 2018 [s.l: s.n.].