

ESTUDO DO AVANÇO DE INJEÇÃO EM UM MOTOR DUAL DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO UTILIZANDO GÁS NATURAL E BIODIESEL EM PROPORÇÕES VARIADAS.

Márcio A. Rocha¹, Lesso B. dos Santos², Carlos. A. C. dos Santos³, Jefferson W. M. Mendonça⁴

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia-IFBA/Jequié, Brasil. Email: marcioandrade@ifba.edu.br

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas-IFAL/Maceió, Brasil. Email: lessob@ifal.edu.br

³Universidade Federal da Paraíba-UFPB/João Pessoa, Brasil. Email: carloscabralsantos@yahoo.com.br

⁴Universidade Federal da Paraíba-UFPB/João Pessoa, Brasil. Email: mendonca11@gmail.com

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo estudar o avanço de injeção de Diesel/biodiesel em um motor de combustão interna do ciclo Diesel trabalhando com Gás Natural e Diesel/biodiesel em proporções variadas. Essa mistura de combustível decorre da possibilidade de redução de emissões como também no custo envolvido, haja vista o GNV é mais barato quando comparado ao diesel/biodiesel. Trata-se de um trabalho experimental em que foi desenvolvido usando uma técnica de análise de vibração para a determinação do delay de ignição. Trata-se de uma técnica não invasiva e de baixo custo baseada em equipamentos simples e de fácil aquisição sem alterar a originalidade do motor. Para isso, foi utilizado um motor MWM 4.07 TCE a Diesel com injeção eletrônica onde foi acoplado um sensor de detonação utilizado em motor do ciclo Otto equipado com injeção eletrônica de combustível. Um circuito eletrônico foi construído e instalado para condicionamento do sinal emitido pelo sensor de detonação. O circuito continha microprocessador, amplificador, filtro e comparador. Após o condicionamento, o sinal do sensor piezoelétrico foi comparado com o sinal de abertura do injetor de combustível através do uso do osciloscópio para a determinação do avanço de ignição. O estudo foi realizado no Laboratório de Ensaio de Motores e Emissões-LEME da Universidade Federal da Paraíba-UFPB. O avanço de ignição impacta diretamente no processo de combustão. Quanto mais preciso for o avanço, melhor será a combustão, melhor a eficiência térmica do motor, reduz a emissão de poluentes e também custos envolvidos com combustível e manutenção do equipamento.

Palavras-chave: Avanço de Injeção; Gás Natural; Biodiesel; Vibração; Sensor Piezoelétrico.

Abstract

The present work aims to study the advancement of Diesel/biodiesel injection in a Diesel cycle internal combustion engine working with Natural Gas and Diesel/biodiesel in varying proportions. This fuel mix results from the possibility of reducing emissions as well as the cost involved, given that CNG is cheaper when compared to diesel/biodiesel. This is experimental work that was developed using a vibration analysis technique to determine the ignition delay. It is a non-invasive and low-cost technique based on simple and easily acquired equipment without altering the originality of the engine. For this, a MWM 4.07 TCE Diesel engine with electronic injection was used, where a knock sensor used in an Otto cycle engine equipped with electronic fuel injection was coupled. An electronic circuit was built and installed to condition the signal emitted by the knock sensor. The circuit contained a microprocessor, amplifier, filter and comparator. After conditioning, the piezoelectric sensor signal was compared with the fuel injector opening signal using the oscilloscope to determine the ignition advance. The study was carried out at the Engine and Emissions Testing Laboratory-LEME of the Federal University of Paraíba-UFPB. The ignition advance directly impacts the combustion process. The more precise the advance, the better the combustion, the better the engine's thermal efficiency, reducing pollutant emissions and also the costs involved with fuel and equipment maintenance.

Keywords: Injection advance; Natural Gas; Biodiesel; Vibration; Piezoelectric sensor.

1. Introdução

Motores de combustão interna por compressão admitem ar e, em um instante predeterminado e preciso, injetam o combustível na câmara de combustão. O processo de injeção começa imediatamente antes do pistão atingir o ponto morto superior e se estende até após o início da descida do pistão. No entanto, o combustível não se inflama instantaneamente desde o início da injeção, levando assim uma fração de segundos desde a abertura do injetor até o começo da ignição da mistura. Neste trabalho, propomos usar a análise de vibração a partir do uso de um sensor piezoelétrico do tipo sensor de detonação utilizado em motores do ciclo Otto equipados com injeção eletrônica de combustível para a determinação do atraso de ignição em um motor do ciclo Diesel.

O "atraso de ignição" em um motor a diesel foi definido [6] como o intervalo de tempo (ou ângulo de manivela) entre o início da injeção e o início da combustão. O início da injeção é geralmente considerado como o momento em que a agulha do injetor sai do assento. No entanto, como afirmado por [7], o início da combustão é mais difícil de detectar.

Segundo descreve [8], o atraso de ignição se decompõe em "atraso físico" (transferência de calor, vaporização das gotículas e difusão) e "retardamento químico" (reações químicas de oxidação lenta).

Vários fatores físicos e químicos influenciam no atraso de ignição. De acordo com [16], aspectos relacionados com a qualidade do combustível utilizado como tamanho da cadeia do hidrocarboneto, número de cetano do combustível, propriedades característica do ar local como densidade, pressão, temperatura e concentração de oxigênio, atomização das moléculas do combustível, tamanho das gotas formadas, velocidade de injeção do combustível, geometria da câmara de combustão, avanço de ignição, taxa de swirl, taxa de compressão do motor e recirculação dos gases de exaustão (EGR).

Segundo [16], em termos físicos, o atraso na ignição depende em grande parte do jato de combustível e da preparação da mistura. A Figura 1 obtida de [13] ilustra os diferentes estágios de combustão em uma máquina de compressão.

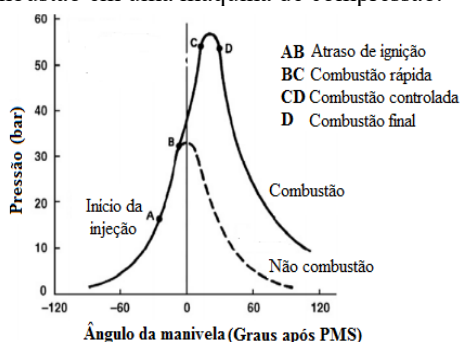


Figura 1. Diferentes estágios da combustão em motores de ignição por compressão (ICO) de acordo com [13].

2. Técnicas aplicadas na determinação do atraso da ignição

Geralmente as técnicas utilizadas para determinar o atraso de ignição são complexas e exigem equipamentos sofisticados de alto custo e requerem intervenções invasivas no motor que alterem sua originalidade.

De acordo com [6], o uso de sensores ópticos de luz instalados dentro da câmara de combustão ou o uso de curvas experimentais de pressão são duas maneiras de determinar o atraso da ignição. Vale ressaltar que em ambos os casos é necessário intervir no motor para a instalação do sensor óptico ou do sensor de pressão. Nestes casos, o custo envolvido é bastante alto tanto para a aquisição do sensor quanto para sua instalação. Ainda é preciso mão de obra específica e qualificada para realizar das modificações necessárias no cabeçote do motor.

A Figura 2, extraída [1], ilustra uma vista em corte da instalação de um sensor de pressão na câmara de combustão de um motor.



Figura 2. Sensor de pressão montado na câmara de combustão de um motor.

Outra técnica que pode ser utilizada são as correlações empíricas para prever processos como transferência de calor, o atraso da ignição e a taxa de queima conforme descreve [14]. Neste caso específico, o método utilizado deixa de ser experimental e passa a ser simulação computacional.

2.1 Alguns estudos sobre o atraso da ignição

Estudos conduzidos por [12] determinaram os atrasos de ignição de um motor marítimo Diesel operando com óleo marítimo Diesel. Os testes foram realizados com variação de carga e utilizando dados experimentais da pressão da câmara de combustão e levantamento da agulha do bico injetor. Quatro diferentes critérios disponíveis na literatura foram utilizados para identificar o ponto de partida da combustão de forma comparativa.

Análise do atraso da ignição de um motor diesel "dual fuel" trabalhando com Diesel e variações de

hidrogênio e GLP como combustíveis secundários foi objeto de estudo de [7]. Nesse estudo observou-se que o atraso na ignição depende não apenas do tipo de gás combustíveis e suas concentrações, mas também da temperatura, da carga, pressão e concentração de oxigênio.

O Tempo de Atraso da Ignição e o Estudo Cinético Químico de Misturas de Óxido Nitroso e Metano a Altas Temperaturas foi o assunto de um estudo de [2]. Nesta investigação, a reatividade do metano é promovida pela adição de N_2O , resultando em uma redução óbvia do tempo de retardamento da ignição, e este efeito torna-se mais pronunciado na condição rica em combustível e alta pressão.

O aumento da concentração de etanol causou um aumento no atraso de ignição, diminuiu a duração da combustão e reduziu a temperatura dos gases de escape. Estes dados foram confirmados em estudos realizados por [10] sobre os efeitos de misturas de combustíveis contendo 5, 10 e 15% em peso de etanol anidro em óleo diesel com 7% de biodiesel (B7) em desempenho, emissões e características de combustão em um gerador de potência a Diesel.

Estudo Experimental sobre o Impacto do Etanol em Misturas Diesel-Biodiesel-Etanol em Motores de Ignição por Compressão foram realizados por [4]. Verificou-se que os atrasos de ignição das misturas em testes com avanços otimizados mostraram evidências de que a tendência de redução do intervalo de atraso da ignição sugere a viabilidade de condições mais adequadas à autoignição da carga no interior da câmara através das investigações do avanços ideais.

O atraso na ignição, características de combustão e emissão do motor diesel abastecido com biodiesel foram objetos de estudo de [13]. Nesse estudo os autores apresentam uma revisão literária acerca de pesquisas desenvolvidas sobre o tema descrito. Como resultados significativos descrevem as características de combustão do motor com biocombustível são ligeiramente diferentes do motor funcionando com diesel puro. A combustão do biodiesel tem início precoce e apresenta menor atraso de ignição.

A investigação a qual nos propomos tem sua importância residindo no aprimoramento de uma técnica de baixo custo, não requer intervenções invasivas no motor, mantém a sua originalidade e que pode ser utilizada posteriormente para avaliar os processos de combustão envolvendo outros ciclos com uso de combustíveis variados. Além disso, um estudo de otimização de avanço de injeção no processo de combustão poderá ser implementado de forma a se obter maior rendimento do motor e menor emissão de gases nocivos ao meio ambiente.

3. Materiais e métodos

Trata-se de um trabalho de caráter experimental realizado no Laboratório de Ensaio de Motores e

Emissões-LEME da Universidade Federal da Paraíba-UFPB onde foram utilizados: um motor MWM 4.07 TCE Diesel, turbo alimentado com quatro cilindros e sistema de injeção common rail; sensor de detonação automotiva tipo piezoelétrico utilizado em motores do ciclo Otto com injeção eletrônica; osciloscópio de dois canais modelo Tektronix MDO 4054-6, 6 GHz e 2,5 GS/s; circuito para o condicionamento dos sinais dos sensores contendo amplificador, filtro, comparador e micro controlador.

3.1 Instalação do sensor de detonação

A vibração produzida pela combustão da mistura ar/combustível dentro da câmara de combustão do motor se espalha por toda a sua massa numa variação temporal que implicou, em uma primeira etapa do desenvolvimento do trabalho, na escolha do sensor ideal para a medição dessa vibração considerando o princípio de operação, custo envolvido, complexidade de aquisição e frequência de vibração do motor. Dessa forma, os sensores que trabalham com o efeito piezoelétrico [9] foram considerados.

O sensor de detonação é um sensor de vibrações mecânicas que tem como função transformar as vibrações mecânicas do motor em oscilações elétricas. É constituído de um cristal piezoelétrico que, quando submetido a deformações mecânicas, emitem sinais de tensão variáveis capazes de serem interpretados pela unidade de comando do motor.

A Figura 3 ilustra a instalação do sensor de detonação na lateral do bloco motor conforme recomendação do fabricante sem instalação de arruela e com torque apropriado.



Figura 3. Instalação do sensor de detonação

O sinal gerado pelo sensor de detonação foi analisado e percebeu-se que necessitava de amplificação, pois sua amplitude era baixa demais para ser detectada pelo conversor analógico-digital de 10 bits do micro controlador sendo amplificador com ganho de 100, que apresentou sinais com picos em torno de 50 mV. Após a seleção do primeiro amplificador de alto ganho, notou-se que o sinal estava perdendo a definição da borda, como mostra a Figura 4.



Figura 4. Aspecto do sinal sem definição de borda.

Ao investigar a causa possível, considerou-se a possibilidade de o ganho ser muito alto e o amplificador estar saturado. Depois de adquirir um amplificador de baixo ruído, o sinal com o motor de baixa velocidade ficou novamente abaixo da resolução do conversor analógico-digital do micro controlador. Considerando as amostras obtidas dos testes, observou-se que houve aumento na amplitude do sinal juntamente com o aumento da rotação do motor, e que o amplificador apresentou o comportamento esperado quando a tensão do sinal de saída estava abaixo de 1,5V menor que tensão de alimentação. Com isso, o amplificador foi alimentado com 12V e o ganho foi ajustado para 15.

Devido a alterações nos amplificadores operacionais, incluindo ajuste de ganho, tensão de alimentação e topologia do amplificador, o sinal estava dentro dos níveis de tensão necessários e esperava-se que funcionassem perfeitamente com o micro controlador. A Figura 5 ilustra o sinal obtido após essas modificações.

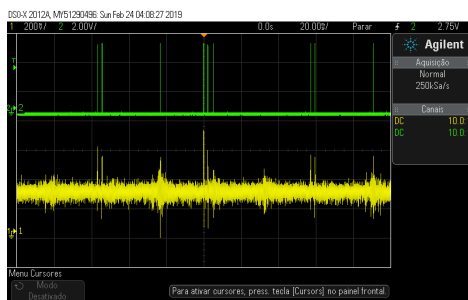


Figure 5. Aparência do sinal do sensor piezoelétrico (em cor amarela) após tratamento.

Observamos que houve melhora no sinal do sensor piezoelétrico, porém seria necessário limpar ainda mais o sinal. Decidimos então adicionar um comparador para que o sinal se tornasse binário, contendo apenas os níveis alto e baixo. Um comparador funciona da seguinte maneira: se o nível do sinal de entrada exceder o nível de um sinal de referência, a saída do comparador se tornará 5V, caso contrário, a saída será 0V.

A Figura 6 mostra os sinais do sensor piezoelétrico em cor amarela após o tratamento e o do bico em verde,

sendo a diferença de tempo entre eles o atraso de ignição.



Figure 6. Aparência dos sinais do sensor piezoelétrico, abertura do injetor e a medida do atraso de ignição.

Todos esses testes serviram de base para elaboração do projeto e construção de um circuito de condicionamento contendo filtragem, amplificação, comparação e processamento [15]. Vários circuitos foram montados e testados na prática com auxílio do osciloscópio até se chegar ao sinal apropriado mostrado na Figura 6.

A Figura 7 mostra o fluxograma de todo o processo de condicionamento que foi realizado.

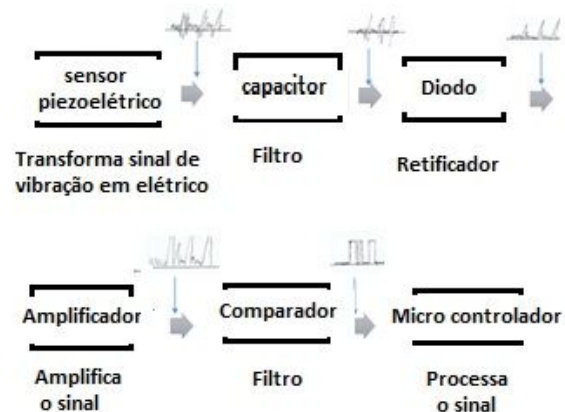


Figure 7. Fluxograma das etapas do procedimento de condicionamento do sinal do sensor piezoelétrico

3.2 Circuito de condicionamento de sinal

O passo seguinte foi a realização do projeto do circuito, sua construção e instalação. A Figura 8 mostra o projeto elaborado e o circuito construído.

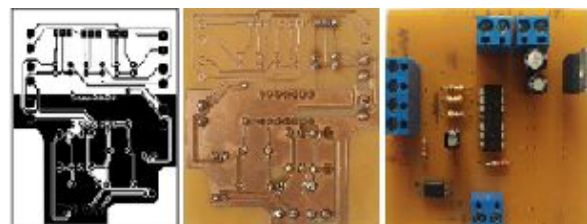


Figura 8. Circuito para condicionamento de sinal

Na etapa final foi construído um código em C/C++ para o microcontrolador Atmega328p para o aferimento dos sinais do piezoelétrico, da injeção do combustível e da fase dos pistões em tempo real. Um trabalho semelhante de monitoramento em tempo real utilizando sensor piezoelétrico foi descrito por [3] em seu trabalho de pesquisa. O código consiste em capturar o tempo da última injeção antes da explosão no pistão e as amostras do piezo durante a mesma.

O sinal provindo do piezoelétrico de frequência aproximadamente 15khz não estava sendo reconstituído perfeitamente pela taxa de amostragem de 50khz do Atmega328p que apesar de cumprir o teorema de Nyquist ou teorema da amostragem [11] não possuía memória flash suficiente. O Teorema de Nyquist afirma que para um sinal poder ser reconstituído com o mínimo de perda de informação, a frequência de amostragem deve ser igual ou maior que o dobro da maior frequência do sinal. Sendo assim, para melhorar o desempenho a Atmega foi substituída pela placa Tiva C Series TM4C1294 que com a taxa de amostragem de 120khz cumpre o teorema de Nyquist e armazena as 600 amostras necessárias para o sistema de bolha com os valores do piezo.

Paralelo a Tiva C foi utilizado o mesmo Arduino para o aferimento das rotações por minuto devido ao atraso que o *Serial.print* causa na programação.

Para validação usamos o osciloscópio Tektronix MDO 4054-6 que se aproximou do valor capturado pela placa em torno dos 90%.

Pela não idealidade dos materiais e sensores utilizados foram encontrados ruídos que para diminuir seu efeito foi feita uma média dos valores obtidos em 10 segundos de amostras enquanto o motor se encontrava na temperatura estabelecida de 77C°.

3.3 Variador de avanço

O processo de combustão não ocorre igualmente para todos os combustíveis sendo uns mais lentos outros mais rápidos a depender principalmente das características físico-químicas de cada um deles. Dessa forma, dado um motor que seja projetado para trabalhar com um determinado combustível ao substituímos por outro combustível, é de se esperar que, no mínimo, seja necessário ajuste no avanço de ignição para que o motor não perca potência e funcione de forma mais adequada possível. Nesse projeto foi utilizado o variador de avanço T30 universal da Tury para efetuar os ajustes necessários. Esse variador utiliza o sinal da roda fônica para efetuar o ajuste do avanço e pode ser instalado em roda fônica do tipo 60-2, 44-4, 36-2 e 36-1 dente. O ajuste do avanço é feito através das microchaves conforme ilustra a Fig. 9, podendo variar o ângulo de 6°, 9°, 12° e 15°.

Chaves 1 e 2: Programam o ângulo de avanço de ignição.



6° de avanço 9° de avanço 12° de avanço 15° de avanço

Chave 3: Programa o tipo de veículo.



Universal Renault e Volvo

Chave 4: Programa a curva de avanço de ignição.



Curva de avanço 1: Curva de avanço 2:
Corte do avanço em 5500rpm Sem corte do avanço em alta rotação

Figura 9. Procedimentos para programação do avanço de ignição [17]

4. Análise de erros envolvidos

Para o cálculo do atraso de ignição, foram usados 3 sinais provindos do motor, a saber: o sinal do sensor de fase; abertura do bico injetor e o do sensor piezoelétrico. O código elaborado detecta o sinal do sensor de fase, em seguida detecta o sinal da pré-injeção e, logo após, o da injeção principal, sendo o tempo de ocorrência da injeção principal armazenado. A partir desse instante, inicia-se o processo de armazenamento de todos os valores de amplitude e tempo das amostras vindas do piezoelétrico com uma frequência de amostragem em torno de 120khz que é a frequência de amostragem do microcontrolador Tiva C. Após a placa armazenar 1000 valores ela faz o comparativo entre esses valores para ver qual deles possui maior amplitude. Ao achar o valor máximo ele vai estar atribuído a um tempo e a partir disso é calculado a diferença de tempo entre ele e o instante de ocorrência da injeção principal.

O tempo em que o microcontrolador Tiva C faz esses cálculos e escreve na tela é irrelevante no processamento dos dados pois ele só calcula a diferença após receber todos os valores necessários para fazer o cálculo. Também foi implementado no programa uma rotina que impede que o microcontrolador calcule erroneamente a diferença entre o tempo de injeção e o sinal de máxima amplitude do piezo fora de ordem.

Um dos erros que ocorre é do tempo de propagação da onda de vibração ocasionada pelo início da explosão da mistura no interior do cilindro até a sua chegada ao sensor piezoelétrico. Essa vibração deve atravessar as espessuras do cilindro, do fluido de arrefecimento existente entre a camisa e o bloco e do próprio bloco até atingir o sensor piezoelétrico.

Outro erro observado é a interferência de vibrações de componentes do motor sendo detectado pelo piezoelétrico. Esse tipo de problema afetava bastante as medidas em rotações elevadas e, por isto, os

experimentos foram limitados à máxima rotação de 2000 rpm.

O que poderia ajudar na hora de utilizar o sinal proveniente do piezo era analisar o sinal no espectro da frequência e ver se a componente que aparecia tinha natureza de alta frequência ou baixa frequência para ser projetado um filtro seletivo em frequência que, segundo [11], deixa passar exponenciais complexas em um conjunto de frequências sem qualquer distorção e rejeita completamente os sinais em todas as outras frequências. O problema desse filtro é que ele tem que abranger desde a frequência mínima de operação do motor até a frequência máxima, pois a frequência de explosão do pistão aumenta de acordo com a velocidade do motor. Um filtro físico seria mais apropriado pois um filtro digital iria requerer bastante do processador utilizado ao usar a transformada rápida de Fourier a cada ciclo da placa.

Por fim pode ser mencionado ainda o erro da propagação do sinal via os fios condutores utilizados que seria recomendado substituí-los cabo coaxiais pela sua propriedade de imunizar o sinal transmitido de sinais externos de alta frequência.

5. Resultados e discussão

5.1 Testes iniciais.

Os testes foram realizados utilizando, a princípio, apenas um tipo de combustível o Diesel com 10% de biodiesel (B10) comercializado no Brasil. O motor funcionou sem carga em rotações variadas.

Para a determinação do início da combustão consideramos exatamente o primeiro pico detectado pelo sensor piezoelétrico. A Figura 10 mostra a detecção dos sinais de abertura do bico e do sensor piezoelétrico e os valores do atraso de ignição e rotação do motor durante a realização do ensaio.

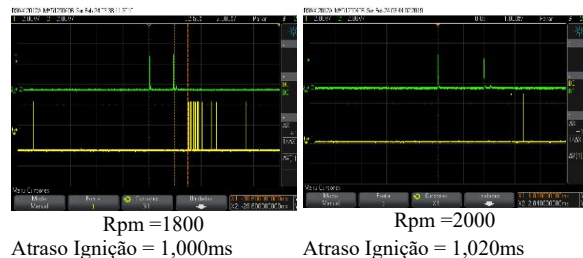
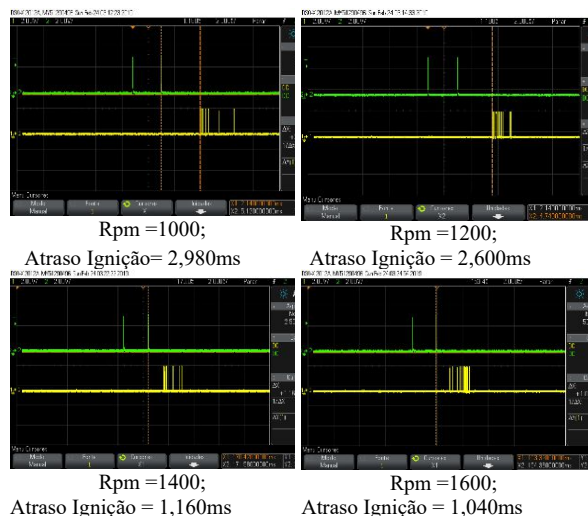


Figura 10. Valores encontrados do atraso de ignição

A Figura 11 ilustra os resultados obtidos e expressos em forma de gráfico relacionando os valores da rotação do motor com os atrasos de ignição durante o ensaio realizado.

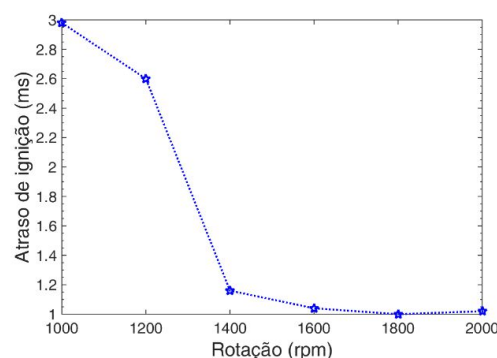


Figura 11. Gráfico rotação do motor x atraso de ignição.

5.2 Análise dos testes com proporções variadas

Seguindo o mesmo princípio, foram realizados testes utilizando Diesel com três proporções distintas de biodiesel, ou seja, 10% (B10), 20% (B20) e 50% (B50). Os resultados obtidos são mostrados em dois gráficos. Na Figura 12, a temperatura de funcionamento do motor estava abaixo do seu valor ideal, principalmente quanto ao B10 que foi o primeiro a ser utilizado.

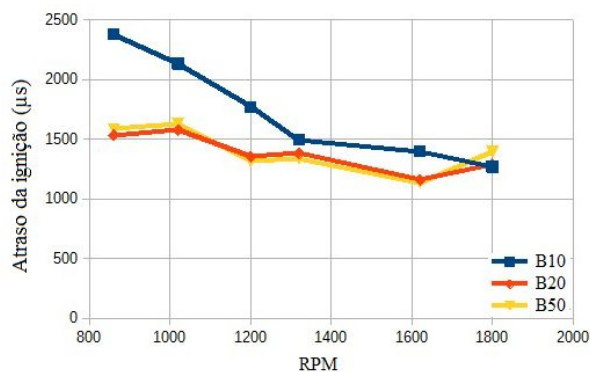


Figura 12. Gráfico rotação x atraso de ignição comparativo realizado em temperatura de funcionamento do motor abaixo do ideal.

Os testes realizados na sequencia onde os valores obtidos são mostrados no gráfico da Figura 13 diferenciaram do anterior apenas pelo fato do motor funcionar na temperatura ideal, em torno de 77 °C, para cada combustível utilizado.

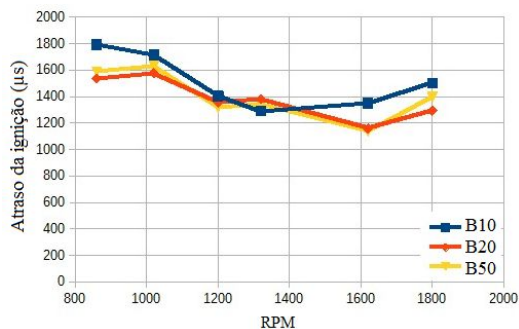


Figura 13. Gráfico rotação x atraso de ignição comparativo realizado em temperatura de funcionamento ideal do motor em torno de 77 °C.

Analisando ambos os gráficos, três fatos nos chamou a atenção de imediato: o primeiro deles é que os resultados obtidos em específico para o B10 mostram que o atraso da ignição se reduz com o aumento da temperatura do motor, fato que pode ser visto ao compararmos as curvas obtidas com B10 nas Figuras 12 e 13, respectivamente; o segundo é que houve um comportamento das curvas bem parecidos principalmente ao compararmos o B20 com o B50, geralmente seguindo uma redução no atraso com o aumento da rotação; terceiro fato é que não houve uma variação crescente ou decrescente no atraso da ignição quando comparamos os três combustíveis utilizados em ordem crescente de proporção, ou seja, esperávamos que o B10 descrevesse uma curva acima, o B20 uma curva intermediária e o B50 uma curva abaixo ou então ocorresse o inverso.

A Figura 14 ilustra os resultados do atraso de ignição em relação à rotação do motor para mistura ternária de combustíveis Diesel/biodiesel/GNV, sendo que a quantidade de gás injetada foi mantida constante para as três proporções de Diesel/biodiesel B10, B20 e B50.

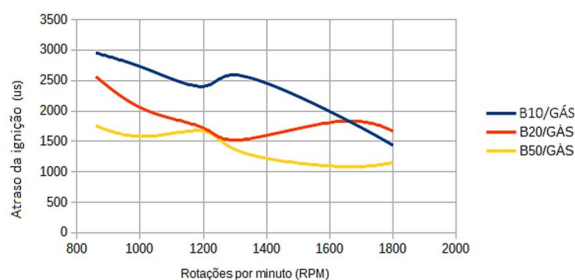


Figura 14. Atraso de ignição x rotação para misturas Diesel/biodiesel /GNV

A Figura 15 ilustra os resultados do atraso de ignição em relação à rotação do motor de forma comparativa para os combustíveis Diesel/ biodiesel em três proporções B10, B20 e B50 e estas mesmas proporções acrescidas do GNV.

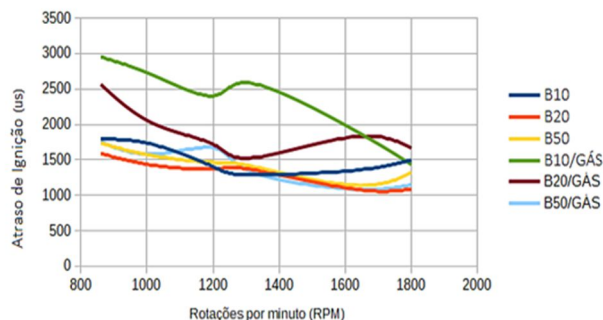


Figura 15 Atraso de ignição x rotação com mistura de combustível Diesel/biodiesel e Diesel/biodiesel/GNV

O próximo passo do experimento foi introduzir o variador de avanço. Com ele seria possível avançar a injeção da mistura Diesel/biodiesel em °6, °9, °12 e °15 de acordo com o fabricante do equipamento. A Figura 16 descreve os resultados dos testes realizados.

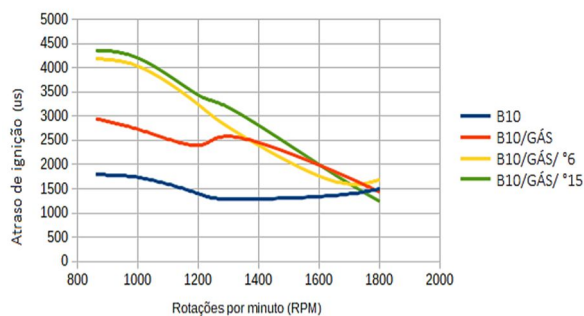


Figura 16 Atraso de ignição x rotação com variação de avanço

Com a utilização do variador de avanço, achava-se que seria possível reduzir o atraso de ignição para os valores obtidos nas misturas sem o GNV apenas aumentando o avanço da injeção. O resultado apresentado na Fig. 16 mostra exatamente o contrário, ou seja, com o aumento do avanço de injeção o atraso de ignição aumentou ainda mais. A explicação para tal fato é que a temperatura e a pressão atingidas ao avançar a injeção sejam menores, dificultando ainda mais a combustão. Dessa forma, seria preciso atrasar a injeção de combustível ao invés de adiantar, entretanto o variador de que se disponha apenas avançava a injeção.

6. Conclusão

O uso da técnica de análise de vibração a partir do uso do sensor piezoelétrico mostrou-se viável para o estudo do avanço de ignição em motores de combustão interna do ciclo Diesel, haja vista os resultados encontrados estão de acordo com os encontrados na literatura especializada obtidos com outras técnicas.

De acordo com [6], um aumento na velocidade do motor com carga constante resulta em uma leve diminuição no atraso de ignição quando medido em milissegundos. Este fato pode ser observado nos resultados encontrados expressos nos gráficos. Um aumento na temperatura de funcionamento do motor também reduz o atraso da ignição.

Outros fatores que influenciam o avanço de ignição conforme [5, 6] não puderam ser avaliados neste estudo e, portanto, poderão ser objeto de análise em futuras investigações.

O custo envolvido no experimento foi baixo. O sensor de detonação utilizado é de fácil aquisição e também de baixo custo e simples de ser instalado. Os componentes eletrônicos utilizados na construção dos circuitos de condicionamento dos sinais envolvendo filtragem, amplificação, comparação e processamento seguem os aspectos acima citados.

Não houve necessidade de interferir no projeto original do motor seja de ordem mecânica, elétrica ou eletrônica e em sua integridade física, pois a técnica aplicada não é invasiva.

Espera-se que este estudo sirva de base para o aprimoramento da técnica aqui desenvolvida.

7. Agradecimentos

Prestamos nossos agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES, Universidade Federal da Paraíba-UFPA e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia-IFBA e também de Alagoas-IFAL.

8. Referências

[1] Denton, T. Advanced Automotive Fault Diagnosis. Automotive Technology: vehicle maintenance and repair. 4th Ed. Routledge, Taylor & Francis Group – London and New York, 2017.

[2] Deng, F., et al. Ignition Delay Time and Chemical Kinetic Study of Methane and Nitrous Oxide Mixtures at High Temperatures. *Energy Fuels*, 2016;30: 1415-1427.

[3] Freitas, V. and SILVA, J.. Sensor de Vibração Mecânica Utilizando Plataforma Arduino e Material Piezoelétrico. Mossoró-RN, 2017.

[4] Guedes, A. D. M.. Experimental Study on the Impact of Ethanol on Diesel-Biodiesel-Ethanol Blends on Compression Ignition Engines [Dissertation]. Rio

de Janeiro, Brazil: Pontifical Catholic University-PUC-RJ, 2017.

[5] Gupta, H. N.. Fundamentals of Internal Combustion Engines. 2^a. ed. India: Prentice-Hall, 2009.

[6] Heywood, J.B.. Internal combustion engine fundamentals. New York: McGraw-Hill; 1988.

[7] Lata, D.B. and Misra, A.. Analysis of ignition delay period of a dual fuel Diesel engine with hydrogen and LPG as secondary fuels. *International journal of hydrogen energy* v. 36 (2011), p. 3746 a 3756.

[8] Martins, J.. Motores de Combustão Interna. Porto-Portugal: Publindústria, 2016.

[9] Nusc, Technology Monograph, Handbook for the Analysis of Piezoelectric Transducers, 1978.

[10] Oliveira, A., et al. Combustion characteristics, performance and emissions from a Diesel power generator fuelled by B7-ethanol blends. *Fuel Processing Technology*, 2015;139: 67–72

[11] Oppenheim, A. V. & Willsky, A. S.. Sinais e sistemas. 2^a Ed. Pearson: São Paulo, 2010.

[12] Pasqualetto, M. A., et al. Methods for the determination of ignition delay in a marine Diesel engine operating with marine Diesel oil. *Proceedings of the 8th National Congress of Mechanical Engineering-CONEM 2014*, Ago 10-15; Uberlândia, Brazil.

[13] Shahabuddin, M., et al. Ignition delay, combustion and emission characteristics of Diesel engine fueled with biodiesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013; 21: 623–632.

[14] Stone, R. Introduction to Internal Combustion Engines. 3th ed. Macmillan Press LTD – London, 1999.

[15] Texas Instruments, Handbook of Operational Amplifiers Applications. Outubro de 2001. Revisado em Outubro de 2016.

[16] Zhao, H.. Advanced direct injection combustion engine technologies and development. New York: CRC Press, v. 2: Diesel engines, 2009.

[17] https://tury.com.br/downloads/MANUAL%20T30_R EV.02.1470313198.pdf