



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**  
Departamento de Engenharia Mecânica  
DEM/POLI/UFRJ



**ESTUDO EXPERIMENTAL DO USO DE MISTURAS DE  
BIOCOMBUSTÍVEIS EM UM MOTOR CFR/ASTM**

Vinicius Mange Olivares

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado por:

---

Prof. Marcelo José Colaço, D.Sc.

---

Prof. Nísio de Carvalho Lobo Brum, D.Sc.

---

Prof. Albino José Kalab Leiroz, Ph.D.

---

Eng. Tadeu Cavalcante Cordeiro de Melo, M.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

FEVEREIRO DE 2012

## **Agradecimentos**

Ao engenheiro Nauberto Rodrigues pela ajuda no preparo do motor, infra-estrutura e operação dos ensaios, além da logística dos preparativos dos experimentos.

Aos meus orientadores Marcelo Colaço e Nísio Brum por terem me dado a oportunidade de realizar esse projeto e pelo suporte durante sua realização.

Ao professor Albino Leiroz pela ajuda com o uso do analisador de gases.

Aos engenheiros Pedro Paulo Pereira e Wilson Vila Maior do Laboratório de Máquinas Térmicas da UFRJ pelo apoio quando preciso.

Aos demais funcionários e alunos do Laboratório de Máquinas Térmicas da UFRJ pela ajuda quando necessário.

Ao Programa de Recursos Humanos 37 da ANP pela oportunidade de realizar esse projeto, pela ajuda acadêmica e pelo suporte financeiro.

Aos engenheiros Tadeu Melo e Leonardo Carvalho do Cenpes/Petrobras pela ajuda técnica.

# Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Objetivo.....	1
1.2. Estudo da arte.....	2
2. Biodiesel.....	4
3. Motores de combustão interna.....	5
3.1. Classificação do motor quanto à ignição.....	5
3.2. Classificação do motor quanto ao ciclo de trabalho.....	6
3.3. Classificação do motor quanto à câmara de combustão (para motores Diesel).....	6
4. Combustão nos motores Diesel.....	8
4.1. Atraso da ignição.....	8
4.1.1. Medição do número de cetano.....	10
4.2. Período de rápida combustão ou combustão pré-misturada.....	12
4.3. Período de combustão controlada ou combustão difusiva.....	12
5. Emissões.....	13
5.1. Principais poluentes.....	15
5.2. Medição das emissões de poluentes.....	16
6. Aparato experimental.....	19
6.1. Motor.....	19
6.2. Instrumentação e Sistemas de controle.....	20
6.2.1. Medição de Temperatura.....	20
6.2.2- Medição no atraso de ignição e avanço da injeção.....	21
6.2.3. Vazão de combustível.....	21
6.2.4. Sistema de variação na razão de compressão.....	23
6.2.5. Medição de emissões.....	24
7. Experimentos.....	26
7.1. Preparação das misturas de combustíveis.....	26
7.2. Procedimento de teste.....	28
7.3. Planejamento dos testes.....	30
8. Resultados.....	32
8.1. Atraso da ignição.....	32
8.2. Início da combustão.....	34
8.3. Emissões de NOx.....	37

8.4. Emissões de CO.....	39
9. Conclusão e sugestões.....	42
Referências Bibliográficas .....	43
Apêndice I - Tabela número de cetano X posição do volante.....	46
Apêndice II - Informações Técnicas do Analisador Testo 350.....	48
Apêndice III - Análise do combustível utilizado e Especificações da ANP para o Biodiesel e para o óleo diesel rodoviário .....	50
Apêndice IV - Organização/Ordem dos testes .....	54
Apêndice V - Resultado dos testes .....	56
Apêndice VI - Valores de atraso de ignição e início da combustão para as diferentes misturas de combustível.....	60
Apêndice VI – Emissões de NOx e CO para as diferentes razões de compressão .....	63

## **1. Introdução**

O presente estudo faz parte do Programa de Recursos Humanos 37 da Agência Nacional do Petróleo. O mesmo forneceu o suporte necessário para a realização deste trabalho.

Sabe-se que as frotas veiculares são os agentes com maior influência na poluição urbana [1]. Tem-se também que a frota de caminhões para transporte vem crescendo ano após ano [2]. Com isso a legislação das emissões fica cada vez mais restritiva e é de fundamental importância o estudo de alternativas menos poluentes.

Vale a pena ressaltar ainda que o governo brasileiro, através da Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005, introduziu o biodiesel na matriz energética brasileira. Deve-se levar em conta que desde 1º de janeiro de 2010 o óleo diesel comercializado em todo o Brasil contém 5% de biodiesel, de acordo com a Resolução nº 6/2009 do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), publicada no Diário Oficial da União (DOU) em 26 de outubro de 2009. Além disso, outros governos como o dos Estados Unidos já assumiram compromissos em aumentar o uso de bio-energia [3].

Do ponto de vista da questão ambiental deve-se considerar que os combustíveis fósseis são finitos, enquanto os biocombustíveis, como o Biodiesel, são renováveis. Devido a tais fatores, estudos sobre os mesmos se fazem necessários, tanto no que diz respeito a sua eficiência energética quanto na questão das emissões, já que a tendência é uma utilização cada vez maior dos mesmos.

O presente estudo visa analisar o comportamento do atraso da ignição e das emissões de motores Diesel operando com diversas misturas de Biodiesel, para várias razões de compressão e ângulos de injeção de combustível.

### **1.1. Objetivo**

Esse trabalho tem como objetivo a análise experimental do funcionamento de um motor de ignição por compressão (ICO) operando com diversas misturas de Diesel e Biodiesel. O estudo envolve a modelagem e operação de um motor CFR, com taxa de compressão variável, visando verificar a influência e possível otimização de parâmetros de operação, como a injeção de combustível e taxa de compressão do motor, no atraso de ignição e emissões de motores ICO quando operando com misturas de biocombustíveis.

## 1.2. Breve estudo da arte

Relata-se na literatura [4-7] que algumas misturas de diesel com ésteres de óleo vegetal têm um desempenho comparável ao do diesel comercial e níveis de emissões mais baixos de hidrocarbonetos e material particulado. Entretanto, um efeito colateral possível dos níveis baixos de particulado é um aumento nas emissões do óxido do nitrogênio [5-7], o que poderia restringir seu uso de acordo com a rigorosa legislação das emissões. Felizmente, há algumas maneiras de balancear as emissões de particulado e do óxido de nitrogênio, tais como otimizar a variação do tempo da injeção [5-7], mudar o tamanho do dispositivo da injeção [5], usar injeção pulsátil [6], e o uso dos aditivos tais como o EHN (nitrato de 2-etil hexila) [7]. Tais alternativas diminuem significativamente emissões do óxido do nitrogênio e, no exemplo de EHN, aumentam o número de cetano do combustível.

A legislação cada vez mais restritiva das emissões promoveu a busca para otimização dos motores atuais, especialmente quando devem ser usados com misturas diferentes de biocombustíveis. Alguns estudos consideraram o uso de revestimentos de barreira térmica, particularmente na câmara de combustão, a fim de simular motores adiabáticos. Isto poderia reduzir as emissões e melhorar o desempenho dos motores [8-10]. Avanços mais recentes focalizam no uso de materiais com variação gradativa das propriedades termofísicas, de modo a reduzir a descontinuidade entre os materiais diferentes [8].

Estudos com motores de ciclo Diesel de médio porte [11] usando 100% de diesel e 100% de biodiesel, levando-se em consideração a taxa de transferência de calor, foram feitos com diferentes cargas e velocidades, confirmando-se que o atraso na ignição nos motores com biodiesel são menores, além da duração da combustão a cargas médias para altas ser menor devido a uma taxa de difusão de queima mais rápida, fato não verificado a baixas cargas. Especula-se que essa taxa mais rápida de difusão tenha forte influência no aumento das emissões de NOx.

Já um estudo [12] usando biodiesel a base de soja, onde foram empregadas otimizações na razão ar-combustível e na recirculação dos gases de exaustão, foi realizado a fim de verificar uma possível diminuição nas emissões de NOx. Tal estudo chegou a conclusão que para se obter menores emissões de NOx com B100 deve-se diminuir a razão ar-combustível e aumentar a recirculação dos gases de exaustão.

Outra pesquisa [13] com diferentes misturas de biodiesel derivados da soja chegou a conclusão que o retardamento da injeção de combustível diminui a formação de NOx não importando a composição das misturas, assim como a diminuição da temperatura na combustão. Para tal foram utilizados modos de combustão como o HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) e o PCCI (Premixed Charge Compression Ignition) que se mostraram promissores.

Testes [14] num motor CFR-Cetano com óleo de dendê ‘in natura’ mostraram que os parâmetros que mais influenciam no desempenho do motor são o débito de combustível e o avanço da injeção. Notou-se também que o uso do óleo de dendê ‘in natura’ em relação ao óleo diesel mostrou ser vantajoso quanto às emissões de monóxido de carbono e hidrocarbonetos em todas as condições testadas.

## **2. Biodiesel**

Segundo a ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) e a ASTM (American Society for Testing and Materials), o biodiesel é um combustível composto de mono-ésteres alquílicos de ácidos graxos de cadeia longa derivados de óleos vegetais ou gorduras animais.

Ele é produzido através da reação de um óleo vegetal ou gordura animal com um álcool (etanol ou metanol) na presença de um catalisador. Tal reação gera glicerina além do biodiesel [15].

A produção brasileira de biodiesel vem crescendo: ela mais que dobrou entre 2008 e 2010 (de 1,1 bilhões de litros produzidos para 2,4 bilhões), deixando o Brasil como um dos maiores produtores do mundo [16].

No Brasil as principais matérias-primas são a soja e o sebo, com a região centro-oeste se destacando como a grande produtora nacional. Apesar de o dendê apresentar maior produtividade, a produção com soja se tornou mais economicamente viável e por isso representa mais de 80% da produção nacional [16].

Alguns fatores, como a viscosidade e o número de cetano, têm que ser controlados na produção do biodiesel para que atinjam valores próximos ao do óleo diesel, já que sua função é substituir parcial ou totalmente este último [17].

### **3. Motores de combustão interna**

Os motores de combustão interna são máquinas térmicas que produzem energia mecânica através da energia química presente no combustível. Essa energia é liberada pela queima controlada de combustível, que no caso dos motores de combustão interna se dá internamente. O fluido de trabalho é composto de ar, combustível e os produtos da combustão. Os motores mais comuns e alvos deste trabalho são os alternativos, onde o movimento linear de um pistão proveniente da expansão dos gases na câmara de combustão é transformado em movimento rotativo de um eixo de manivelas (virabrequim). Essa transformação é feita por um mecanismo biela / manivela. A câmara de combustão é composta por um cilindro que contém um pistão, no cabeçote do qual se encontram válvulas de admissão e descarga com tempos de abertura e fechamento controlados. O pistão é preso à biela por um pino numa extremidade. A outra extremidade da biela é presa ao eixo de manivelas. Motores de combustão interna alternativos podem possuir um ou múltiplos cilindros com configurações de arranjo variadas. O primeiro protótipo do motor de ignição por centelha quatro tempos data de 1876 e foi projetado por Nicolaus A. Otto. Já em 1892, na Alemanha, Rudolf Diesel desenvolveu o motor por ignição à compressão [18].

#### **3.1. Classificação do motor quanto à ignição**

-Ignição por centelha (Motor Otto)

Motores de ignição por centelha utilizam a energia da centelha elétrica da vela de ignição para dar início à reação de combustão. Nesses motores a mistura ar-combustível é admitida pré-misturada [18].

-Ignição por compressão (Motor Diesel)

Nos motores de ignição por compressão a ignição se dá pelo aumento da temperatura devido à compressão do ar de admissão. Inicialmente admite-se somente ar. Após a compressão, o combustível é pulverizado na massa de ar quente dando início à combustão [18].

### **3.2. Classificação do motor quanto ao ciclo de trabalho**

-Ciclo Dois tempos:

O pistão necessita de dois cursos ou uma volta ( $360^\circ$ ) no eixo de manivelas (virabrequim) para realizar um ciclo completo [18].

-Ciclo Quatro Tempos:

O pistão necessita de quatro cursos ou duas voltas ( $720^\circ$ ) no eixo de manivelas (virabrequim) para realizar um ciclo completo [18]. Seus quatro cursos são:

- Admissão: o pistão se move do PMS (ponto morto superior), que é a posição em que o pistão está mais próximo das válvulas, ao PMI (ponto morto inferior), que é a posição em que o pistão está mais afastado das válvulas, ocorrendo a admissão do ar (motor Diesel) ou da mistura ar-combustível (motor Otto).
- Compressão: o pistão se move do PMI ao PMS com as válvulas fechadas, comprimindo o ar ou a mistura para que se atinja o ponto de início da combustão.
- Expansão: os gases a altas temperaturas e pressões empurram o pistão do PMS ao PMI fornecendo assim rotação a manivela. É o curso que realmente se produz trabalho útil no motor.
- Exaustão: o pistão se move do PMI ao PMS e a válvula de descarga se abre para que os gases provenientes da combustão saiam do interior do cilindro e da câmara de combustão do motor.

### **3.3. Classificação do motor quanto à câmara de combustão (para motores Diesel)**

Como em motores diesel um dos maiores problemas é conseguir misturar o ar e o combustível de maneira rápida e eficiente, devemos fazer a escolha certa quanto ao tipo de câmara de combustão [18]. Os tipos podem ser:

- Injeção direta (D.I.): o combustível é injetado diretamente na câmara de combustão. Empregado em motores onde não existem problemas em misturar o ar com o combustível, geralmente motores de grande porte.

- Injeção indireta (I.D.I.): o combustível é injetado numa pré-câmara de combustão, se mistura com o ar, e inicia a queima para depois entrar na câmara de combustão. O ar, durante a compressão, entra nesta pré-câmara de combustão a alta velocidade aumentando o “swirl” (turbilhamento). Suas vantagens são maior “swirl”, combustão mais suave, menor atraso de ignição e possibilidade de maiores velocidades. Suas desvantagens são: maior perda de calor, menor rendimento térmico e maior dificuldade de partida a frio. Geralmente usados em motores de menor porte.

## 4. Combustão nos motores Diesel

A combustão é um dos responsáveis pelo controle da potência, do desempenho e das emissões nos motores Diesel. Diferente dos motores do ciclo Otto, a admissão é feita apenas de ar e sua mistura com o combustível é feita posteriormente. Assim, uma das formas de controlar e melhorar as características da combustão é modificar a injeção de combustível [18].

Outra diferença entre os ciclos é que no Diesel usa-se mistura pobre, ou seja, uma razão ar-combustível alta para se minimizar as emissões de particulados.

A combustão nos motores Diesel pode ser dividida em três fases [18]:

- Atraso da ignição
- Período de rápida combustão ou combustão pré-misturada
- Período de combustão controlada ou combustão difusiva

### 4.1. Atraso da ignição

O atraso da ignição é o intervalo de tempo (ou ângulo do eixo de manivelas) entre o início da injeção e o começo da combustão [18].

O atraso da ignição se deve a processos físicos e químicos.

Os processos físicos são: a atomização do jato de combustível líquido, a vaporização das gotas de combustível, a mistura do vapor de combustível com o ar; o aquecimento do combustível até a temperatura de ignição.

Os processos químicos são as reações de pré-combustão entre combustível, ar e gases residuais.

Vários fatores afetam o atraso de ignição, eles são [18]:

1. Razão de compressão: seu aumento influencia a pressão e a temperatura do ar. Além disso, a temperatura mínima de auto-ignição diminui com o aumento da densidade do ar, diminuindo assim o atraso de ignição.
2. Velocidade angular do motor: seu aumento faz com que as perdas de temperatura durante a compressão diminuam, aumentando a temperatura e a pressão do ar, diminuindo o atraso de ignição.

3. Potência: seu aumento equivale a uma diminuição na razão ar-combustível, o que leva a um aumento da temperatura e uma conseqüente diminuição no atraso da ignição.
4. Atomização: uma melhor atomização reduz o atraso de ignição. Uma maior viscosidade e uma menor volatilidade prejudicam a atomização, aumentando o atraso da ignição.
5. Avanço da injeção: um dos fatores com maior influência sobre o atraso da ignição, seu aumento leva o combustível a encontrar o ar no cilindro a temperaturas menores, aumentando o atraso.
6. Temperatura de admissão: seu aumento produz um aumento na temperatura do ar comprimido, melhorando a vaporização do combustível, diminuindo assim o atraso de ignição. Porém, esse aumento de temperatura no ar provoca uma redução em sua densidade, reduzindo a eficiência volumétrica e conseqüentemente a potência.
7. Pressão de admissão: o aumento da pressão de admissão aumenta a pressão e temperatura do ar comprimido, reduzindo a temperatura de auto-ignição e assim o atraso de ignição
8. Qualidade do combustível: um importante indicador da qualidade de ignição do combustível é o número de cetano. Ele mede a qualidade de ignição de um combustível para máquina Diesel e tem influência direta na partida do motor e no seu funcionamento sob carga. Fisicamente, o número de cetano se relaciona diretamente com o atraso de ignição de combustível no motor de modo que: quanto menor o número de cetano maior será o atraso da ignição. Conseqüentemente, maior será a quantidade de combustível que permanecerá na câmara sem queimar no tempo certo. Isso leva a um mau funcionamento do motor, pois quando a queima acontecer, gerará uma quantidade de energia superior àquela necessária. Esse excesso de energia força o pistão a descer com velocidade superior aquela adotada pelo sistema, o que provocará esforços anormais sobre o pistão, podendo causar danos mecânicos e perda de potência. Combustíveis com alto teor de parafinas apresentam alto número de cetano, enquanto produtos ricos em hidrocarbonetos aromáticos apresentam baixo número de cetano. Devido a isso, na determinação dessa característica o desempenho do diesel é comparado com o desempenho do n-hexadecano, produto parafínico comercializado como cetano, o qual é atribuído um número

de cetano igual a 100. A um produto aromático (alfa mentil-naftaleno) é atribuído um número de cetano igual a zero. A determinação do número de cetano requer o uso de um motor de teste padrão (motor CFR) operando sob condições também padronizadas [19]

#### 4.1.1. Medição do número de cetano

O teste padrão de medição do número de cetano em combustíveis diesel é feito em motores ASTM CFR Cetano através do método padrão desenvolvido pela ASTM sob o código D 613.

Tal método consiste na comparação da qualidade de ignição de certo combustível sob condições padrão de operação com as de combustíveis de referência, de conhecido número de cetano. Esta comparação é feita variando-se a razão de compressão e a injeção até se atingir 13 graus tanto para o avanço da injeção quanto ao atraso da ignição, ou seja, a combustão tem seu início no PMS. Combustíveis de pior qualidade necessitam de razões de compressões maiores para que seu atraso de ignição atinja 13 graus. Os combustíveis de referência são misturas feitas a partir do Cetano (n-hexadecano) e do Heptametilnonano (HMN) ou alternativamente do T-Fuel e do U-Fuel que são combustíveis padrão com número de cetano conhecido. Compara-se a leitura no volante que controla a razão de compressão nas condições padrão e faz-se uma média ponderada para determinar o número de cetano do combustível em questão [19].

As condições padrões de operação são:

- Rotação:  $900 \pm 9$  rpm
- Avanço da injeção: 13 graus antes do PMS
- Pressão da abertura do injetor:  $1500 \pm 50$  psi ( $10,3 \pm 0,34$  MPa)
- Vazão de combustível:  $13,0 \pm 0,2$  ml/min
- Temperatura da água de arrefecimento do injetor:  $100 \pm 5^{\circ}\text{F}$  ( $38 \pm 3^{\circ}\text{C}$ )
- Temperatura da água de arrefecimento do motor:  $212 \pm 3^{\circ}\text{F}$  ( $100 \pm 2^{\circ}\text{C}$ )
- Pressão do óleo lubrificante: 25 a 30 psi (0,17 a 0,20 MPa)
- Temperatura do óleo lubrificante:  $135 \pm 15^{\circ}\text{F}$  ( $57 \pm 8^{\circ}\text{C}$ )
- Temperatura do ar de admissão:  $150 \pm 1^{\circ}\text{F}$  ( $66 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ )

Uma forma de ganhar agilidade e não precisar usar a cada teste combustíveis de referência, o que encarece tal medição, é fazer uso da curva do comportamento do motor. Tal curva relaciona a leitura no volante, que controla a razão de compressão nas condições padrões, com o número de cetano do combustível.

A mesma foi feita a partir de 11 misturas preparadas com diferentes proporções dos combustíveis padrões T-22, com número de cetano igual a 74,8, e U-15, com número de cetano igual a 18,7. Depois o engenheiro Nauberto R. Pinto operou o motor CFR-Cetano nas condições padrões de operação com cada mistura de conhecido número de cetano, anotando a leitura correspondente no volante que controla a razão de compressão. De posse de tal dados a engenheira Monique Soriano Vital da Silva, que na época era aluna de doutorado da COPPE/UFRJ, plotou através do software MATH uma curva ajustada aos pontos obtidos (figura 4.1). A tabela com os pontos da mesma se encontra no Apêndice I. Os resultados obtidos através de tal procedimento se mostraram bastante precisos, visto que a maior diferença entre um ponto calculado e um medido foi menor que 1,8%.

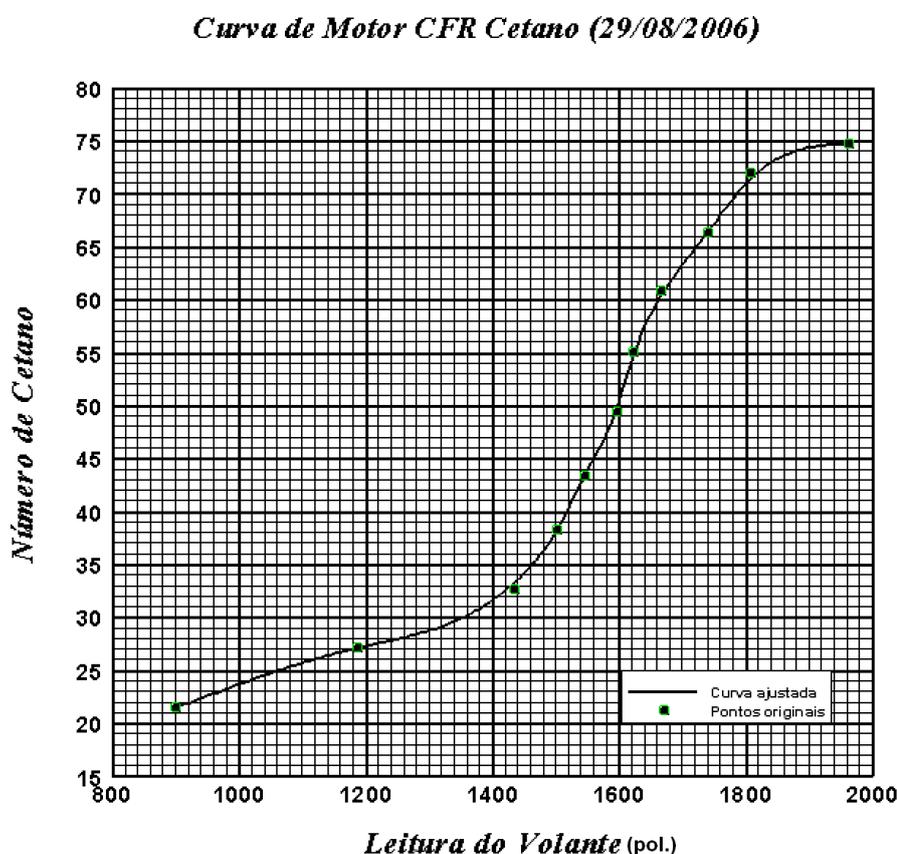


Figura 4.1- Curva ajustada do motor CFR Cetano/LMT (29/08/2006)

A fim de se obter o número de cetano dos combustíveis utilizados no presente projeto (B5, B20 e B60), operou-se o motor CRF-Cetano nas condições padrões para cada um deles. De posse das leituras do volante e valendo-se da curva do comportamento do motor (Figura 4.1), os seguintes resultados foram obtidos (Tabela 4.1):

Tabela 4.1- Número de cetano dos combustíveis utilizados

	combustível		
	B5	B20	B60
número de cetano	46,1	47,4	52,5

Tais resultados são importantes pelo número de cetano estar, como visto anteriormente, diretamente ligado a propriedades do combustível como o atraso da ignição.

#### **4.2. Período de rápida combustão ou combustão pré-misturada**

O período de rápida combustão ou combustão pré-misturada é a fase que ocorre logo após o atraso da ignição [18]. No atraso de ignição, as partículas de combustível se espalham, evaporam e se misturam com o ar a altas temperaturas. Com isso, porções de combustível começam a entrar em combustão espontaneamente, iniciando assim o período de combustão pré-misturada. Nesse período o aumento de pressão é rápido e está diretamente ligado à duração do período de atraso de ignição. Quanto mais longo o atraso, maior e mais rápido será o aumento de pressão, já que mais combustível estará presente no cilindro antes que a velocidade da combustão fique sob controle.

#### **4.3. Período de combustão controlada ou combustão difusiva**

No período de combustão controlada ou combustão difusiva, já com elevadas temperaturas e pressões no cilindro, a queima acontece conforme o combustível se mistura com o ar, apresentando assim uma liberação de calor mais lenta e controlada [18].

## 5. Emissões

Com o intuito de reduzir a poluição atmosférica e melhorar a qualidade do ar no país, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) criou em 1986 o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE). Tal programa foi instituído pela Resolução nº 18/86 e tem como objetivo reduzir as emissões de poluentes de veículos novos, por meio da implantação progressiva de fases que, gradativamente, obrigam a indústria automobilística a reduzir as emissões nos veículos que serão colocados no mercado. Para veículos pesados (ciclo Diesel), desde o mês de janeiro de 2012 está em vigor a fase P7, com ela as emissões dos veículos brasileiros se encontram em grau de equivalência com as emissões dos veículos de países europeus (fase Euro V) [20]. Uma das formas de se alcançar os novos limites de emissões, mais especificamente o limite para as emissões de SO<sub>x</sub>, tem sido diminuir cada vez mais o teor de enxofre presente no diesel. Altos investimentos foram e estão sendo feitos para se produzir diesel S50 (50 partes por milhão de enxofre) e S10.

Vale ressaltar ainda que o PROCONVE impõe limites não só para os veículos pesados, mas também para veículos leves.

A evolução dos limites para emissões, como mostrado na Figuras 5.1 e 5.2, obriga a indústria automobilística a desenvolver novas tecnologias que reduzam as emissões. Os catalisadores utilizados nos motores Otto, que são responsáveis pelo pós-tratamento dos gases, e o sistema de injeção eletrônica, que ao melhorar o processo de queima do combustível reduz as emissões, são alguns dos exemplos dessas novas tecnologias.

Nos veículos a Diesel estão sendo empregadas ainda outras tecnologias além dessas para reduzir as emissões.

Uma delas é o uso do EGR (Exhaust Gas Recirculation ou recirculação dos gases de escape), associado ao filtro DPF (Diesel Particulate Filter ou filtro de partículas). O sistema EGR abaixa a temperatura máxima da combustão e o teor de oxigênio, que são as causas da formação de NO<sub>x</sub>, conseguindo assim reduzir suas emissões em até 40%. Porém isto leva a um aumento do material particulado, surgindo assim a necessidade do DPF que é capaz de promover drástica redução no material particulado (MP) lançado pelos veículos diesel.

Outra é o SCR (Selective Catalytic Reduction ou catalisador de redução seletiva) associado ao uso de uréia, o Agente Redutor Líquido Automotivo (ARLA-32). Em motores que o utilizam prioriza-se na estratégia de injeção a redução do material

particulado e o SCR associado à uréia atua no intuito de reduzir as emissões de NOx [20] .

LIMITES DAS EMISSÕES PARA VEÍCULOS PESADOS A DIESEL								
PROCONVE	EURO	CO (g/kW.h)	HC (g/kW.h)	NOx (g/kW.h)	MP (g/kW.h)	Norma (Conama)	Vigência	Teor de enxofre (S)
Fase P1	-	14,00 <sup>1</sup>	3,50 <sup>1</sup>	18,00 <sup>1</sup>	-	Res. 18/85	1989 a 1993	-
Fase P2	Euro 0	11,20	2,45	14,40	0,60 <sup>1</sup>	Res. 08/93	1994 a 1995	3.000 a 10.000 ppm
Fase P3	Euro 1	4,90	1,23	9,00	0,40 ou 0,70 <sup>2</sup>	Res. 08/93	1996 a 1999	3.000 a 10.000 ppm
Fase P4	Euro 2	4,00	1,10	7,00	0,15	Res. 08/93	2000 a 2005	3.000 a 10.000 ppm
Fase P5	Euro 3	2,10	0,66	5,00	0,10 ou 0,13 <sup>3</sup>	Res. 315/02	2006 a 2008	500 a 2.000 ppm
Fase P6 <sup>4</sup>	Euro 4	1,50	0,46	3,50	0,02	Res. 315/02	2009 a 2012	50 ppm
Fase P7	Euro 5	1,50	0,46	2,00	0,02	Res. 403/08	a partir de 2012	10 ppm

<b>CO</b>	monóxido de carbono	<b>HC</b>	hidrocarbonetos	<b>NOx</b>	óxidos de nitrogênio	<b>MP</b>	material particulado	<b>S</b>	enxofre
-----------	---------------------	-----------	-----------------	------------	----------------------	-----------	----------------------	----------	---------

Figura 5.1- Limites das emissões ao longo das fases do PROCONVE para veículos pesados

Fonte: A fase P7 do PROCONVE e o impacto no setor de transporte. – Brasília: CNT : Sest/Senat, 2011.

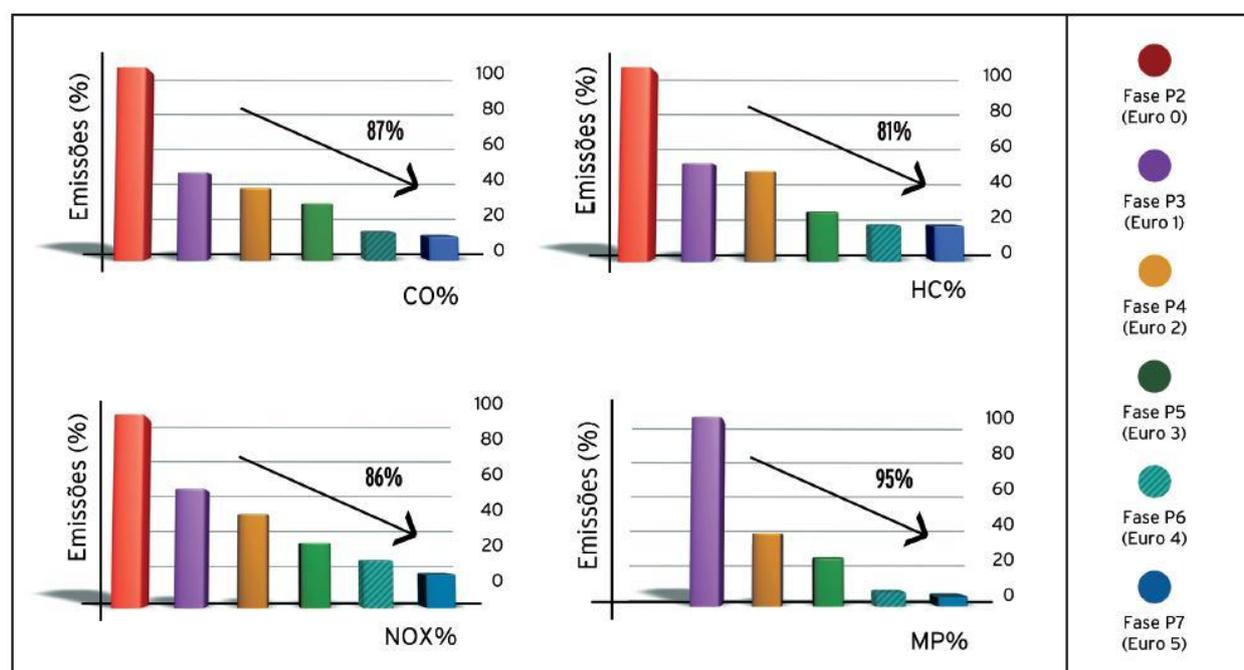


Figura 5.2- Redução dos limites das emissões ao longo das fases do PROCONVE para veículos pesados

Fonte: A fase P7 do PROCONVE e o impacto no setor de transporte. – Brasília: CNT : Sest/Senat, 2011.

## 5.1. Principais poluentes

### -Monóxido de carbono (CO)

Em condições ambientes de temperatura e pressão é um gás incolor, inodoro e insípido. É formado devido a combustão incompleta [21]. Em motores de combustão interna pode ocorrer por causa de mistura rica (falta de oxigênio), mistura ineficiente (baixo “swirl”), ou quando a chama encontra as paredes da câmara de combustão numa temperatura mais baixa (“quenching”). Pode ocorrer também pela dissociação de CO<sub>2</sub> a altas temperaturas. Sua inalação prolongada pode levar a morte [18].

### -Óxidos de Nitrôgenio( NO<sub>x</sub>)

O NO é incolor, inodoro e insípido e na presença de O<sub>2</sub> é rapidamente convertido em NO<sub>2</sub>. O NO<sub>2</sub> é um gás marrom-avermelhado, com odor forte e tóxico que ataca os alvéolos pulmonares[21]. A formação de NO é proporcional a quantidade de O<sub>2</sub> e a temperatura [18].

### -Hidrocarbonetos(HC)

Tendem a irritar as mucosas e os olhos, podendo ser cancerígenos [21]. Geralmente são originados por uma combustão incompleta ou por partes do combustível que ficaram presas nas folgas entre o pistão e o cilindro durante a compressão. Podem ser oriundos também de partes do combustível que foram absorvidas pelo óleo ou por depósitos [18].

### -Particulados

São contaminantes mecânicos que afetam os pulmões, além de serem cancerígenos. Tem presença maior em motores Diesel, sendo responsáveis pela fumaça negra dos mesmos. O principal motivo de sua formação é a combustão incompleta [18].

-Aldeídos(HCHO)

São substâncias formadas devido a combustão incompleta, principalmente na partida à frio em motores que utilizam álcool. Possuem cheiro forte, irritam olhos e mucosas [18].

-Compostos de enxofre (SO<sub>x</sub>)

São provenientes do enxofre presente no combustível, constituindo um problema maior no óleo diesel onde o enxofre exerce uma função lubrificante. O principal composto formado é o SO<sub>2</sub>. Ao reagir com vapor d'água pode formar ácidos [18].

## **5.2. Medição das emissões de poluentes**

-Analisador Infravermelho Não Dispersivo (NDIR- Non-dispersive Infrared Analyser)

Usualmente empregado na medição de CO e CO<sub>2</sub>, se baseia no princípio de que algumas moléculas absorvem radiação em faixas muito específicas do espectro luminoso. O CO<sub>2</sub>, por exemplo, tem maior absorção com comprimentos de onda na faixa de 4,2µm enquanto o CO em torno de 4,6µm. Assim a intensidade e a faixa de absorção indicam o tipo de molécula e a sua concentração. Geralmente a faixa de maior absorção se encontra no infravermelho. É dito não dispersivo, pois toda a luz policromática da fonte passa através da amostra de gás antes de atravessar por um filtro em frente ao sensor, enquanto que em sistemas dispersivos a luz de origem é filtrada para uma estreita faixa de frequência antes da amostra [22].

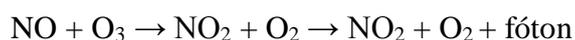
-Analisador Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR-Fourier Transform Infrared Analyser)

O analisador infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) baseia-se no princípio de que algumas moléculas absorvem radiação em faixas muito específicas do espectro luminoso. O mesmo realiza uma análise com a Transformada de Fourier de todo o espectro de absorção infravermelho da amostra de gás. Isso faz com que ele seja capaz de medir as emissões de um grande número de componentes. O mesmo é útil

sobretudo na medição de emissões de motores de combustão usando álcool já que os aldeídos e álcoois não queimados podem ser detectados [22].

-Detector de Quimioluminescência (CLD- Chemiluminescence Detector)

É usado para medir as emissões de NO<sub>x</sub>. A quimioluminescência é o fenômeno pelo qual algumas reações químicas produzem luz (fóton). Pelo objetivo ser medir NO<sub>x</sub>, a reação de interesse é:



No detector, o NO<sub>2</sub> é convertido cataliticamente em NO e o ozônio é produzido através de descarga elétrica no oxigênio a baixa pressão numa câmara de vácuo aquecida. A luz (quantidade de fótons) é medida por um fotomultiplicador que indica a concentração de NO<sub>x</sub> na amostra [22].

-Detector de Ionização de Chama (FID- Flame Ionization Detector)

Por ter uma alta sensibilidade em relação à substâncias que têm presença de carbono, é usada na medição de hidrocarbonetos, porém não é recomendado o seu uso com combustíveis oxigenados, pois a presença de compostos, como os aldeídos, nos gases de descarga pode introduzir erros nas medições. Seu funcionamento consiste na queima controlada dos gases a serem analisados com um combustível adicional (hélio ou hidrogênio), produzindo elétrons livres e íons positivos que são detectados por um ânodo e um cátodo, gerando um campo elétrico proporcional à concentração de hidrocarbonetos [22].

-Analisador Paramagnético (PMD-Paramagnetic detection analyser )

É usado para medir o oxigênio. Seu funcionamento é baseado no fato de que o oxigênio é um gás paramagnético (é atraído por campos magnéticos). Dentro da célula de medição, as moléculas de oxigênio são levadas por um campo magnético forte e heterogêneo onde elas tendem a se acumular na zona de fluxo mais forte e fisicamente deslocar um detector cuja deformação é proporcional à concentração de oxigênio. Como NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub> mostram algumas características paramagnéticas, o analisador tem que ser capaz de calcular uma compensação para essa interferência [22].

## -Sensores Eletroquímicos

Os sensores eletroquímicos são os sensores mais usados no mundo para medições de concentrações gasosas. Eles se baseiam em reações espontâneas de oxidação e redução do gás a ser medido, as quais geram uma circulação de uma corrente elétrica entre os eletrodos, que é proporcional a concentração do gás. O eletrólito, os eletrodos e o material a ser oxidado definem qual gás a ser mensurado [23].

## 6. Aparato experimental

Para este trabalho foi utilizado a bancada de testes do motor ASTM CFR Cetano, fabricado pela WAUKESHA Co., que se encontra no Núcleo de Ensaio de Combustíveis Automotivos do Laboratório de Máquinas Térmicas da Universidade Federal do Rio de Janeiro (LMT – UFRJ).

Tal bancada foi escolhida principalmente por seu motor apresentar razões de compressão, débito de combustível, avanço de injeção e temperatura do ar de entrada variáveis.

### 6.1. Motor

O motor (Figura 6.1) é monocilíndrico de quatro tempos e ignição por compressão, com injeção indireta e taxa de compressão variável. Possui múltiplos sistemas de reservatório de combustível, com válvulas seletoras, montagem de injetor com bico injetor específico, controles elétricos, e uma tubulação de descarga adequada. O motor opera em rotação fixa controlada por um motor elétrico síncrono. O mesmo é ligado ao motor por correias e funciona como motor de partida para quando quisermos ligar o motor, ou para absorver energia, em uma velocidade constante, enquanto a combustão ocorre. Abaixo estão listados dados técnicos e geométricos do motor.

- Diâmetro do cilindro: 83 mm
- Curso do pistão: 114 mm
- Volume da pré-câmara de combustão:  $4,291 \times 10^{-5} \text{ m}^3$
- Velocidade do pistão: 3,42 m/s
- Rotação do motor: 900 rpm
- Relação biela/manivela: 4,44
- Peso do motor aproximado: 399,16 kg (880 lb)
- Peso da bancada de testes aproximado: 1247,38 kg (2750 lb)
- Variação da razão de compressão: entre 8:1 e 36:1



Figura 6.1 - Motor ASTM CFR Cetano

## 6.2. Instrumentação e Sistemas de controle

### 6.2.1. Medição de Temperatura

O próprio motor possui um sensor de temperatura do óleo lubrificante e termômetros para possibilitar o controle da temperatura em alguns pontos do motor, tais como:

- Temperatura do ar de admissão: pode ser controlada através de um termostato instalado no painel do motor ligado a uma resistência elétrica instalada no duto de admissão;
- Temperatura de água de arrefecimento do cabeçote e temperatura da água de arrefecimento do motor: o motor opera com dois circuitos de água de arrefecimento, um aberto para resfriar o bico injetor e outro fechado para o bloco do cabeçote do motor.

### 6.2.2- Medição no atraso de ignição e avanço da injeção

O motor é equipado com um medidor transistorizado de atraso de ignição do combustível ('Ignition Delay Meter') que através de um sensor de pressão instalado na câmara de combustão ('pick up') e sensores de posição instalados no volante do motor indica o atraso de ignição (Figura 6.2). O mesmo instrumento também mede o avanço de injeção através dos sensores de posição instalados no volante do motor e de um sensor instalado no bico injetor que indica o instante de início de injeção de combustível. A injeção pode ser controlada através de um sistema onde, se ajustando uma alavanca, pode-se aumentar ou diminuir o avanço da injeção.



Figura 6.2 - Medidor de Avanço de Injeção e Atraso de Ignição

### 6.2.3. Vazão de combustível

Os reservatórios de combustível do motor possuem buretas volumétricas anexas aos mesmos e com o auxílio de um cronômetro foi possível fixar o débito de combustível em  $13 \pm 0,2$  ml/min. Tal vazão foi escolhida por ser a mesma empregada no teste padrão do motor. Para cada mistura de combustível diferente empregada foi necessária

uma verificação dos parâmetros da bomba (Figura 6.3) que são ajustados por uma cremalheira que controla o movimento rotativo do pistão da bomba.

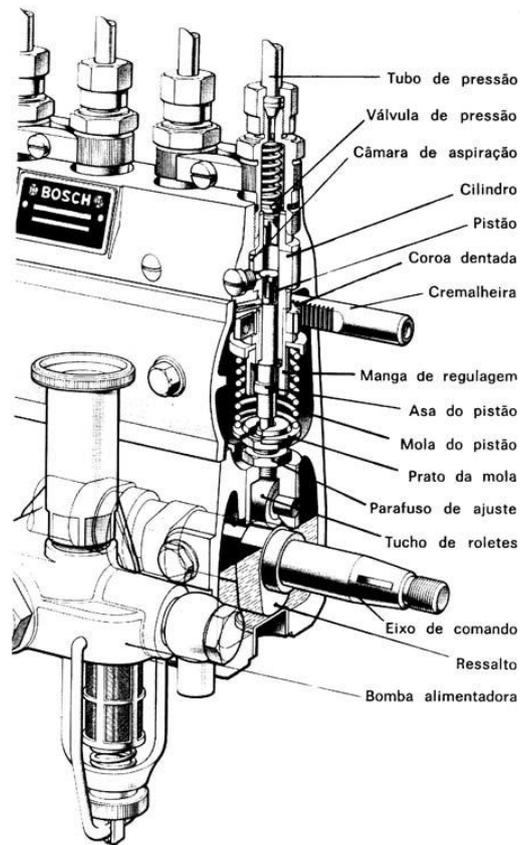


Figura 6.3 - Elementos da bomba em linha.  
Fonte: Apostila técnica Bosch. Bombas injetoras PE e PF.

O pistão possui externamente uma ranhura longitudinal e uma hélice (ranhura oblíqua fresada). Uma cremalheira aciona a manga de regulagem que desloca a asa do pistão fazendo o pistão mover-se no sentido horário e anti-horário. Girar o pistão no sentido horário ou anti-horário controla o débito de combustível, pois o fim do débito se dá quando a ranhura helicoidal atinge o furo de alimentação. Quando a ranhura vertical do pistão coincide com o furo de alimentação, o débito de combustível é nulo, portanto o motor não funciona. O funcionamento desse mecanismo de controle exercido pela cremalheira esta representado na Figura 6.4.

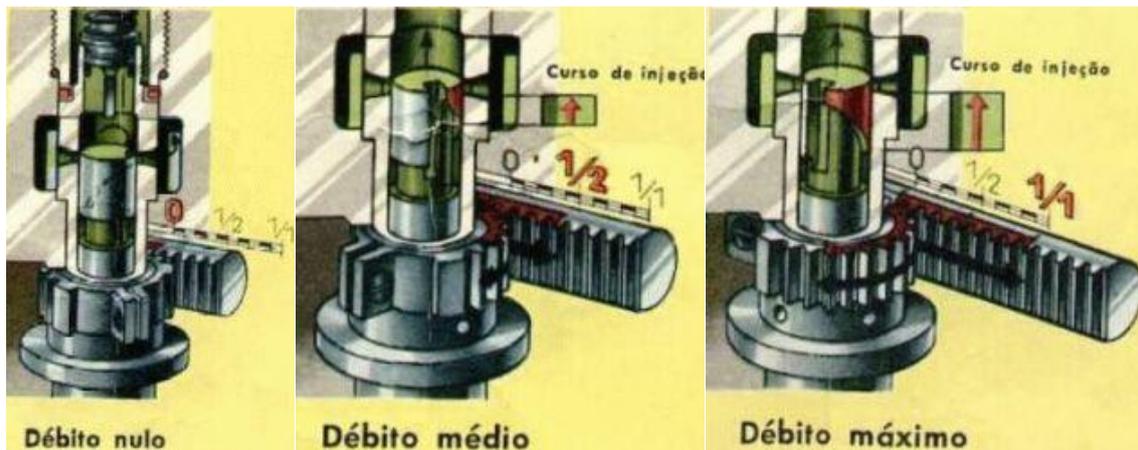


Figura 6.4 - Funcionamento da Cremalheira  
 Fonte: Folder Bosch.

#### 6.2.4. Sistema de variação na razão de compressão

Uma das vantagens do motor CFR Cetano é o mesmo possuir sistema de variação da razão de compressão. Através de um volante, mostrado pela Figura 6.5, pode-se alterar a geometria da pré-câmara de combustão.

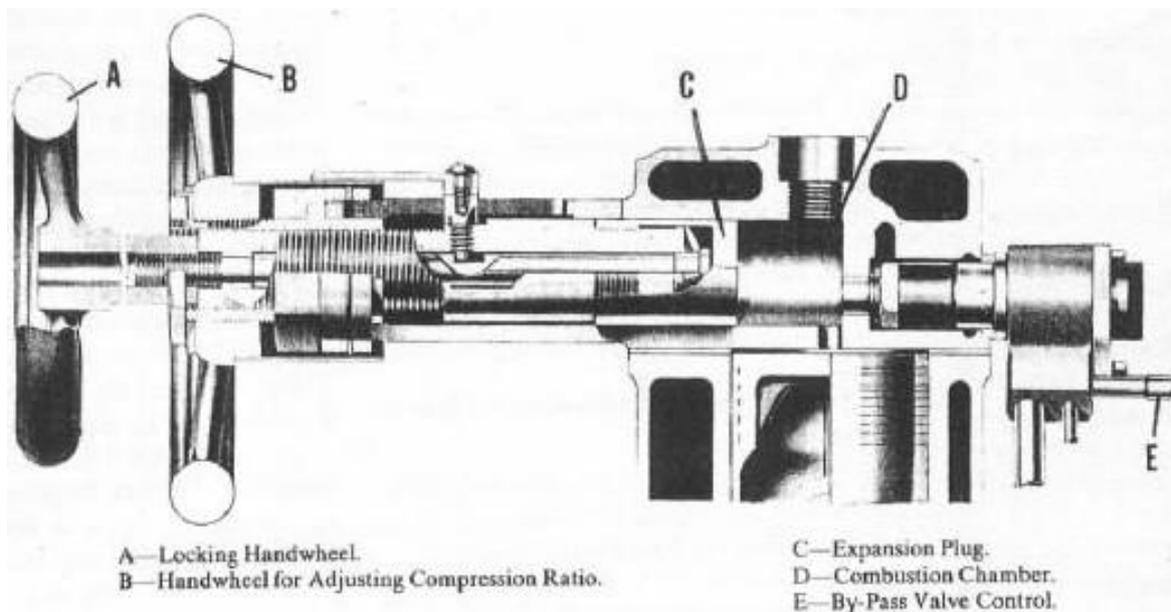


Figura 6.5 - Vista da câmara de combustão

Fonte: ASTM, Test Method for Standard, Ignition Quality of Diesel Fuels By the Cetane Method, ASTM D 613, 1985

Diminuindo-se a mesma aumenta-se por consequência a razão de compressão. Tal correspondência é dada pela conversão apresentada pela tabela abaixo (Figura 6.6), onde dado o grau de rotação do volante temos a razão de compressão correspondente.

Hand-wheel Reading	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	Hand-wheel Reading
<b>Compression Ratio</b>											
0.8	23.50	23.22	22.95	22.69	22.43	22.18	21.93	21.69	21.45	21.22	0.8
0.9	21.00	20.78	20.57	20.35	20.15	19.95	19.75	19.56	19.37	19.18	0.9
1.0	19.00	18.82	18.65	18.48	18.31	18.14	17.98	17.82	17.67	17.51	1.0
1.1	17.36	17.22	17.07	16.93	16.79	16.65	16.52	16.38	16.25	16.13	1.1
1.2	16.00	15.88	15.75	15.63	15.52	15.40	15.28	15.17	15.06	14.95	1.2
1.3	14.85	14.74	14.64	14.53	14.43	14.33	14.24	14.14	14.04	13.95	1.3
1.4	13.86	13.77	13.68	13.59	13.50	13.41	13.33	13.24	13.16	13.08	1.4
1.5	13.00	12.92	12.84	12.76	12.69	12.61	12.54	12.46	12.39	12.32	1.5
1.6	12.25	12.18	12.11	12.04	11.98	11.91	11.84	11.78	11.71	11.65	1.6
1.7	11.59	11.53	11.47	11.40	11.34	11.29	11.23	11.17	11.11	11.05	1.7
1.8	11.00	10.94	10.89	10.84	10.78	10.73	10.68	10.62	10.57	10.52	1.8
1.9	10.47	10.42	10.38	10.33	10.28	10.23	10.18	10.14	10.09	10.05	1.9
2.0	10.00	9.96	9.91	9.87	9.82	9.78	9.74	9.69	9.65	9.61	2.0
2.1	9.57	9.53	9.49	9.45	9.41	9.37	9.33	9.29	9.26	9.22	2.1
2.2	9.18	9.14	9.11	9.07	9.04	9.00	8.96	8.93	8.89	8.86	2.2
2.3	8.83	8.79	8.76	8.73	8.69	8.66	8.63	8.59	8.56	8.53	2.3
2.4	8.50	8.47	8.44	8.41	8.38	8.35	8.32	8.29	8.26	8.23	2.4
2.5	8.20	8.17	8.14	8.11	8.09	8.06	8.03	8.00	7.98	7.95	2.5

Figura 6.6 - Tabela de conversão entre a leitura do volante e a razão de compressão

Fonte: ASTM, Test Method for Standard, Ignition Quality of Diesel Fuels By the Cetane Method, ASTM D 613, 1985

## 6.2.5. Medição de emissões

Para efetuar as medições de emissões foi introduzida uma sonda (Figura 6.7) no duto de descarga do motor. A esta sonda foi acoplado um analisador de gases TESTO 350 (Figura 6.8), que através de um analisador infravermelho não dispersivo (NDIR) e de sensores eletroquímicos, é capaz de mensurar NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>. Informações como a resolução, o tempo de resposta, a faixa de aplicação e a precisão nas medições encontram-se no Apêndice II.

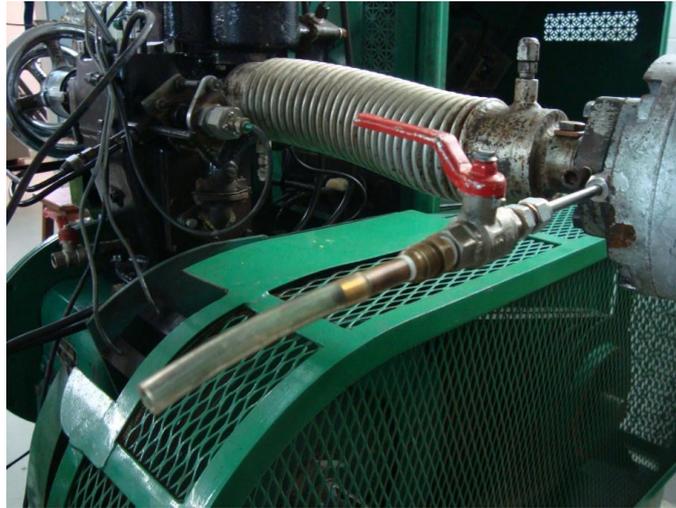


Figura 6.7 - Sonda de emissões



Figura 6.8 – Analisador de gases TESTO 350

## 7. Experimentos

### 7.1. Preparação das misturas de combustíveis

Este trabalho se propôs a testar B5, B20 e B60. Para obtê-las foram feitas misturas com diesel comercial metropolitano S500 (B5) e biodiesel de óleo de dendê (B100). Análises químicas feitas mostraram que as características do biodiesel utilizado (tabela A III.1), com exceção do índice de acidez (0,7 mg KOH/g onde o limite é 0,5 mg KOH/g), estavam de acordo com as normas da ANP (tabela A III.2). As referidas norma e análises se encontram no Apêndice III, assim como as especificações para o óleo diesel de uso rodoviário (tabela A III.3).

Para o B20, calculou-se que a mistura teria que ter aproximadamente 84,2% de B5 e 15,8% de B100 em volume. Já o B60 teria que ter 42,1% de B5 e 57,9% de B100.

Com o intuito de se obter maior precisão foram medidas as massas específicas do B5 e do B100 (Figura 7.1), para passar a proporção de volume para massa e assim poder fazer o uso de uma balança de precisão.

A massa específica foi calculada pesando 500 ml do combustível em questão numa bureta calibrada em uma balança de precisão. Com tal procedimento, obteve-se 833,4 g/l de massa específica para o B5 e 865,8 g/l para o B100.



Figura 7.1 - Cálculo da massa específica do Biodiesel (B100)

De posse de tais valores, chegou-se a conclusão que para três litros de B20 (o necessário para realização dos testes contando com margem de segurança) precisava-se de 2105,3 g de B5 e 410,3 g de B100. Já para o B60 necessitava-se de 1053,0 g de B5 e 1503,9 g de B100.



Figura 7.2 - Combustíveis utilizados

No final obteve-se B20 com massa específica medida de 838,5 g/l e B60 com massa específica medida de 852,3 g/l, além do B5 (Figura 7.2).

Vale ressaltar que antes do uso de tais misturas no motor, as mesmas foram deixadas em repouso por uma semana para verificar se haveria problemas de estabilidade, como uma possível separação de fases, o que não foi evidenciado.

## 7.2. Procedimento de teste

Os testes foram realizados utilizando-se um único combustível por vez. Primeiro foi ajustado o débito de combustível, depois realizaram-se os procedimentos para medição do número de cetano. Por fim foram mudadas a razão de compressão e a injeção para valores pré-definidos com o intuito de levantar os demais dados.

As medições das emissões foram feitas após os testes iniciais, já de posse de todos os dados e ajustes do motor necessários. Para cada ponto a ser medido, foram reproduzidas as condições dos testes anteriores e esperado o sistema se estabilizar antes da efetiva medição.

Para simplificação e prevenção de problemas operacionais com o motor CFR-Cetano, as variáveis auxiliares como temperatura do ar admissão e débito de combustível, entre outras, foram mantidas fixas e iguais as usadas no procedimento padrão de uso do motor. Já os valores da razão de compressão, do avanço da injeção e da mistura de combustível utilizada foram definidos da seguinte forma:

- Mistura de combustível: foram usados nos testes o B5 (diesel com 5% de biodiesel em volume), que é obrigatório por lei no Brasil, o B20 e o B60.
- Razão de compressão: para simular com maior precisão os efeitos do uso de Biodiesel nos motores Diesel, priorizamos o uso de razões de compressão típicas de tais motores. Primeiro utilizamos 15:1, que foi a máxima que conseguimos obter já que encontramos limitações mecânicas no motor ao tentar usar razões de compressão maiores, uma segunda escolha foi 14:1 e por último utilizamos 13:1.
- Avanço da injeção: num primeiro momento foi pensado se utilizar os avanços de 13°(o utilizado no teste padrão), 10° e 7° antes do Ponto Morto Superior, pois os mesmos se encontram dentro da faixa utilizada em motores Diesel de injeção indireta [19]. Ao realizarmos testes iniciais com Diesel Marítimo, o qual não possui adição de biodiesel, percebeu-se que essa escolha nos levaria a obtenção de vários pontos com o início da combustão ocorrendo após o Ponto Morto Superior, fato mostrado no gráfico a seguir (Figura7.3), o que seria indesejado do ponto de vista do desempenho do motor. Por isso, os avanços de injeção foram alterados para 13°, 11° e 9° antes do PMS. O uso do Diesel Marítimo nos pré-testes deveu-se sobretudo a sua grande disponibilidade no Laboratório de Máquinas Térmicas da UFRJ.

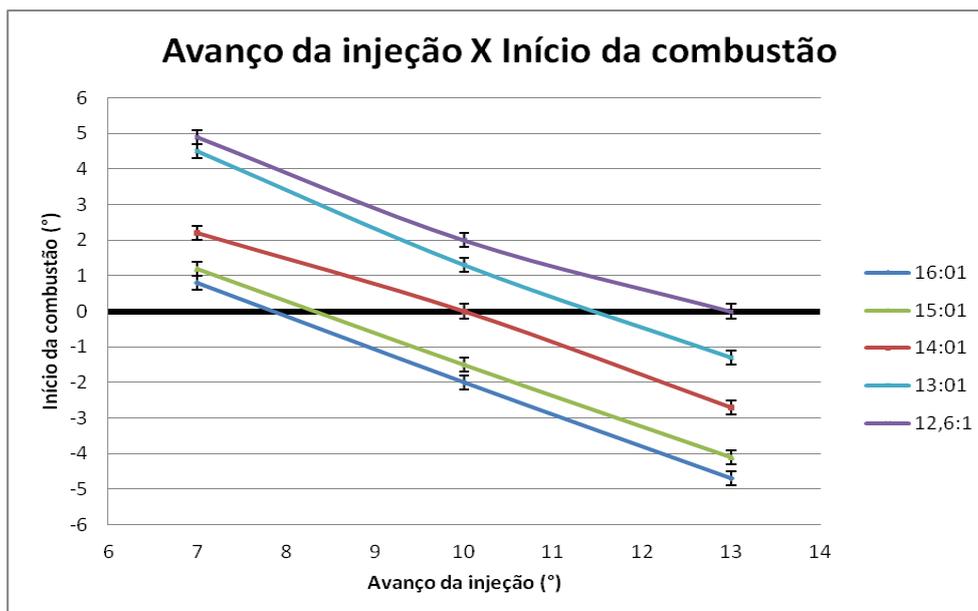


Figura 7.3- Avanço da Injeção X Atraso da Ignição, com Diesel Marítimo a diferentes razões de compressão.

Uma observação a ser feita após tal teste é que a razão de compressão de 16:1 é muito difícil de ser alcançada no motor utilizado, já que neste primeiro teste a mesma só foi alcançada com muita dificuldade em se mover o volante que controla a razão de compressão até a posição desejada e nos testes posteriores não se conseguiu alcançá-la.

### 7.3. Planejamento dos testes

Para evitar desperdício de combustível e diminuir os tempos de testes foi feito um estudo inicial do comportamento do motor utilizando-se Diesel Marítimo.

Durante esses testes iniciais com Diesel Marítimo algumas observações e considerações foram feitas:

1. Chegar a altas taxas de compressão como 15:1 é difícil, então é razoável quando for utilizada, serem feitas todas as medições necessárias antes de trocar de razão de compressão .
2. Tirando a exceção da razão de compressão de 15:1, é mais fácil e rápido alterar a razão de compressão do que o avanço de injeção.
3. É necessário começar e terminar os testes com razões de compressão mais baixas, assim a razão de compressão inicial escolhida deve ser a do teste padrão de número de cetano e a final a de 13:1.

Com base nessas conclusões, a ordem dos testes foi definida da seguinte maneira:

- Primeiro utilizar as condições padrão para medição do número de cetano (a mesma utiliza avanço de injeção de  $13^\circ$  e razões de compressão abaixo de 13:1);
- O próximo passo é ir aumentando a razão de compressão para 13:1, depois 14:1 e por último 15:1 com o avanço de injeção fixo em  $13^\circ$ ;
- Quando em 15:1 alterar os avanços de injeção para  $11^\circ$  e depois  $9^\circ$ ;
- Após o término das medições com a razão de compressão de 15:1, abaixar a razão de compressão para 14:1, fazendo as medições com avanço de injeção de  $9^\circ$  e depois  $11^\circ$ ;
- Terminadas tais medições, diminuir a razão de compressão para 13:1 com o avanço de injeção ainda em  $9^\circ$  e por último alterar o avanço para  $11^\circ$ .

Tais passos, quando seguidos corretamente, reduziram drasticamente a duração dos testes. Um diagrama com o passo a passo se encontra no Apêndice IV.

## 8. Resultados

Nesse t3pico ser3o apresentados e analisados os gr3aficos do comportamento do atraso da igni3o, do in3cio da combust3o e das emiss3es quando variados o avan3o da inje3o e a raz3o de compress3o para as diferentes misturas de combust3veis.

Cabe ressaltar que n3o houve an3lise de reprodutibilidade, ou seja, n3o houve repeti3o dos testes. Os erros nas medi3es ficaram ent3o baseados no manual do motor [19] ou nas informa3es t3cnicas do equipamento no caso o analisador de gases (Ap3ndice II). Para o atraso de igni3o e para o in3cio da combust3o o erro adotado foi de 0,2 graus para mais e para menos. J3 para as emiss3es o erro adotado foi de 5% sobre o valor medido tanto para NOx quanto para CO.

### 8.1. Atraso da igni3o

A figura abaixo (Figura 8.1) representa o gr3afico do atraso na igni3o em fun3o do avan3o da inje3o para diferentes raz3es de compress3o utilizando B5.

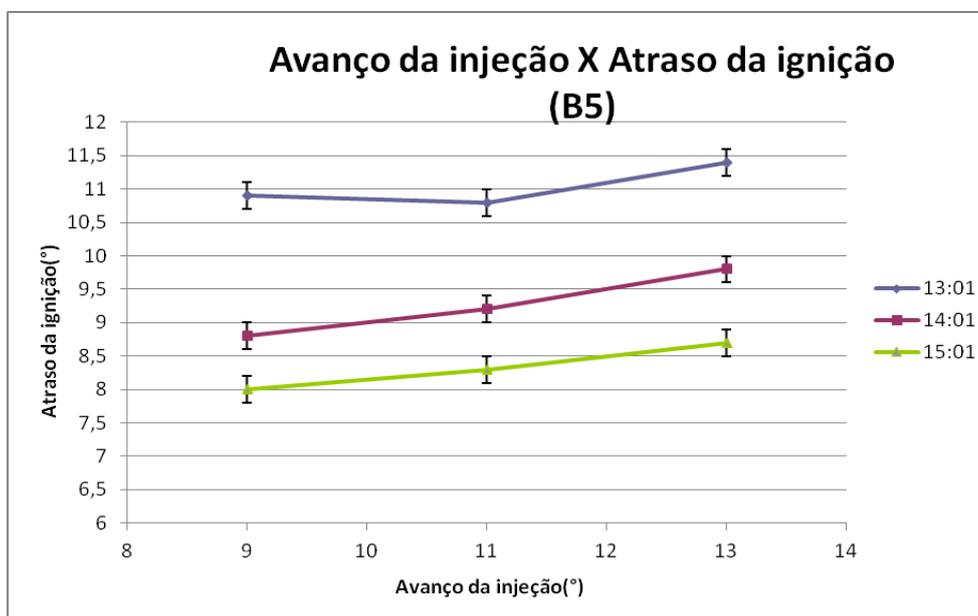


Figura 8.1- Atraso da igni3o em fun3o do avan3o da inje3o para diferentes raz3es de compress3o utilizando B5

Analisando este gr3afico, observa-se que, para um mesmo avan3o de inje3o, quanto maior a raz3o de compress3o menor o atraso da igni3o. Isso se deve ao fato do

aumento na razão de compressão elevar a temperatura e a pressão na câmara de combustão, o que facilita a atomização do combustível e aumenta a densidade do ar, diminuindo a temperatura mínima de auto-ignição. Percebe-se ainda que ao se retardar o avanço de injeção o atraso de ignição cresce. Tal comportamento se justifica pelo fato que ao injetar o combustível mais cedo, o mesmo encontrará temperatura e pressão menores na câmara de combustão. Neste gráfico, a única exceção ficou por conta dos avanços de injeção de 9° e 11° na razão de compressão de 13:1. Um possível motivo seria que por estar numa baixa razão de compressão para motores de ignição por compressão, essa variação não demonstra efeitos na prática.

O segundo gráfico (Figura 8.2), traçado de maneira semelhante ao primeiro, contém os dados dos testes com B20.

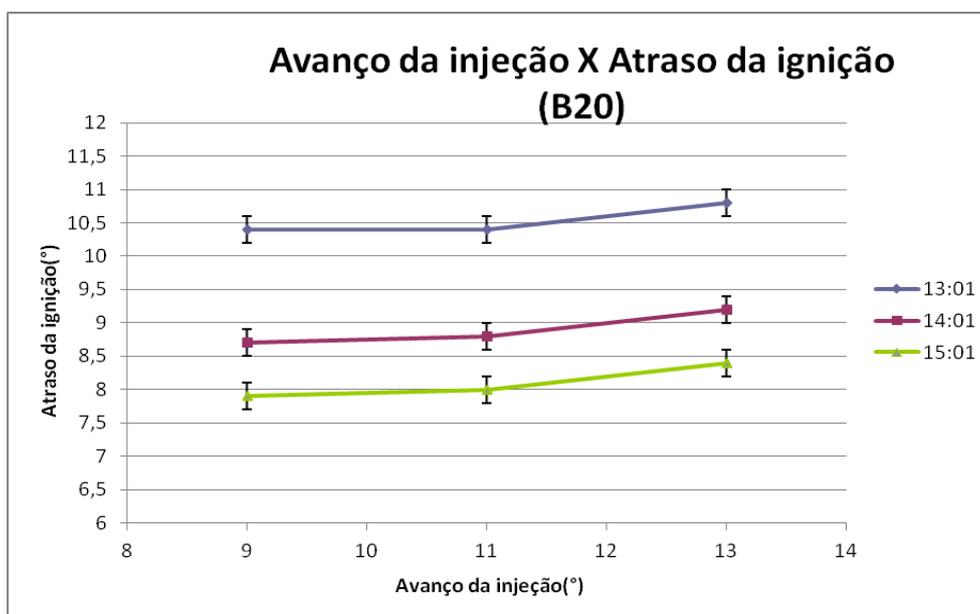


Figura 8.2- Atraso da ignição em função do avanço da injeção para diferentes razões de compressão utilizando B20

Através deste gráfico, observa-se que o comportamento do atraso de ignição mediante as variações feitas no avanço de injeção e na razão de compressão é semelhante ao do primeiro gráfico que contém os dados para o B5. Analisando ainda conjuntamente o primeiro gráfico com o segundo, nota-se claramente uma diminuição no atraso de ignição para todos os pontos medidos. Isso se deve ao B20 utilizado possuir um número de cetano maior que o B5.

O gráfico com os dados do B60 (figura 8.3), como esperado, demonstrou comportamento semelhante aos anteriores e também era previsto que ao usar um combustível com número de cetano maior que os demais, como verificado na Tabela 4.1, o atraso de ignição diminuísse para todos os pontos.

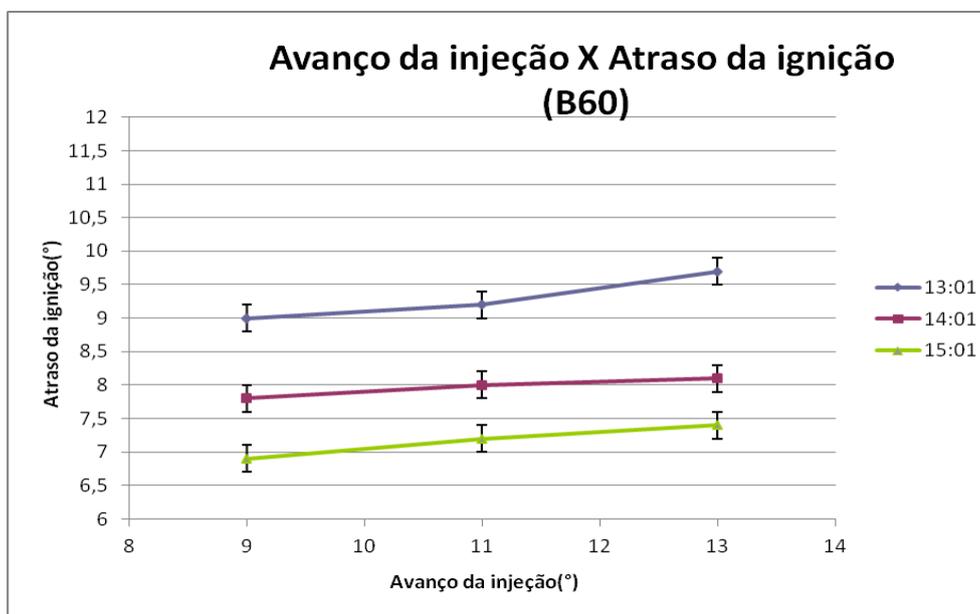


Figura 8.3- Atraso da ignição em função do avanço da injeção para diferentes razões de compressão utilizando B60

## 8.2. Início da combustão

No gráfico seguinte (figura 8.4), que representa o início da combustão em função do avanço da injeção para diferentes razões de compressão utilizando B5, é possível notar que conforme se aumenta a razão de compressão o início da combustão fica antecipado. Isto ocorre em consequência da diminuição no atraso de ignição mencionada anteriormente. Observa-se que retardar o avanço da injeção pode ser usado como um artifício para antecipar o início da combustão, evitando seu começo após o Ponto Morto Superior.

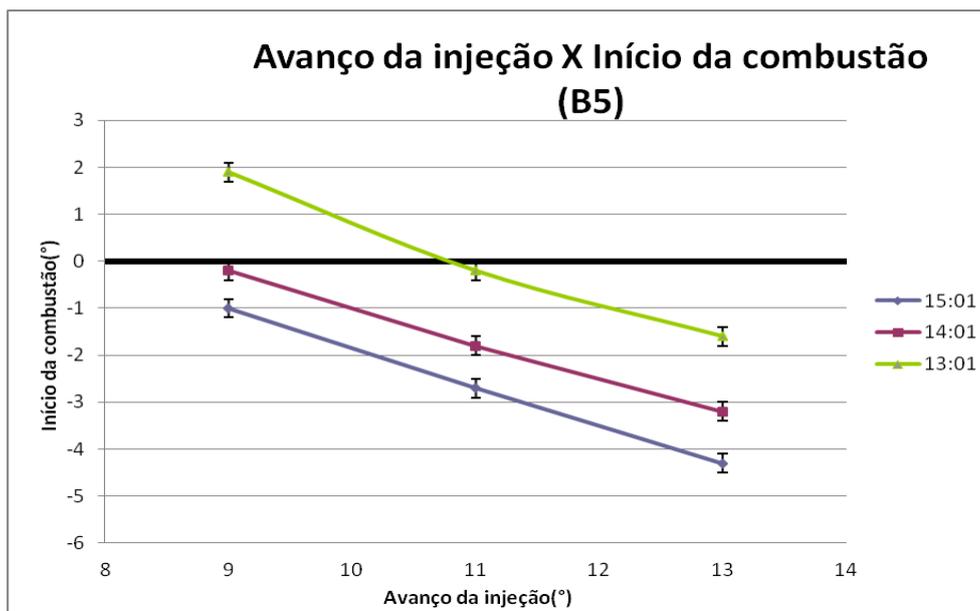


Figura 8.4- Início da combustão em função do avanço da injeção para diferentes razões de compressão utilizando B5

Já a Figura 8.5 representa o início da combustão em função do avanço da injeção para diferentes razões de compressão utilizando B20.

Através de sua análise, percebe-se que, por consequência de seus menores atrasos de ignição, o B20 apresenta uma antecipação no início da combustão para todos os pontos analisados se comparado com o B5. Nos demais aspectos os comportamentos são semelhantes.

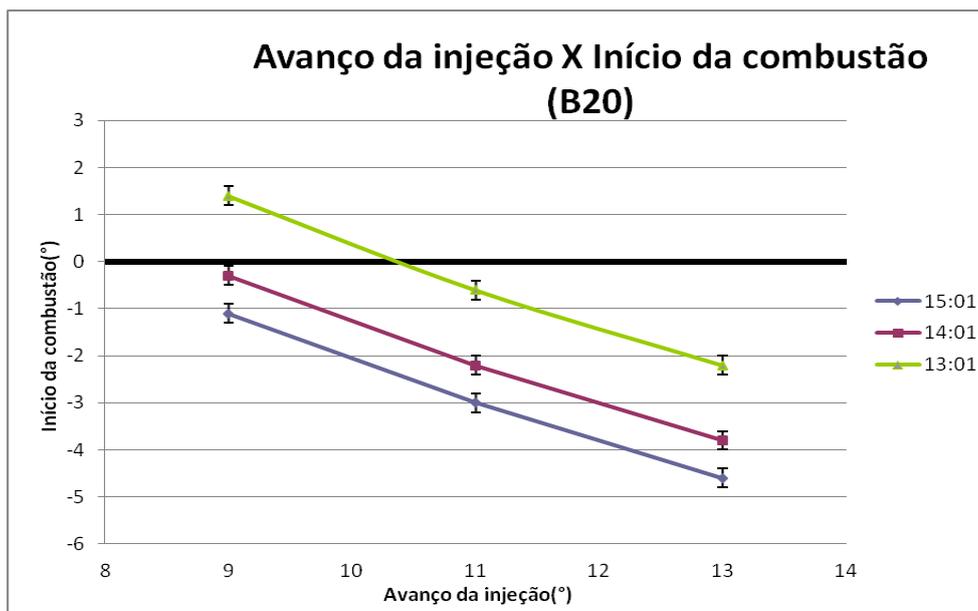


Figura 8.5- Início da combustão em função do avanço da injeção para diferentes razões de compressão utilizando B20

A antecipação do início da combustão evidenciada quando aumentamos a proporção de Biodiesel na mistura fica ainda mais perceptível quando analisamos os resultados para o B60 (figura 8.6). Nota-se ainda que a necessidade de se antecipar o avanço da injeção para evitar um início da combustão tardio diminui a medida que adicionamos mais Biodiesel a mistura, já que como vimos anteriormente para as misturas utilizadas o número de cetano aumentou conforme maior proporção de Biodiesel na mistura (tabela 4.1).

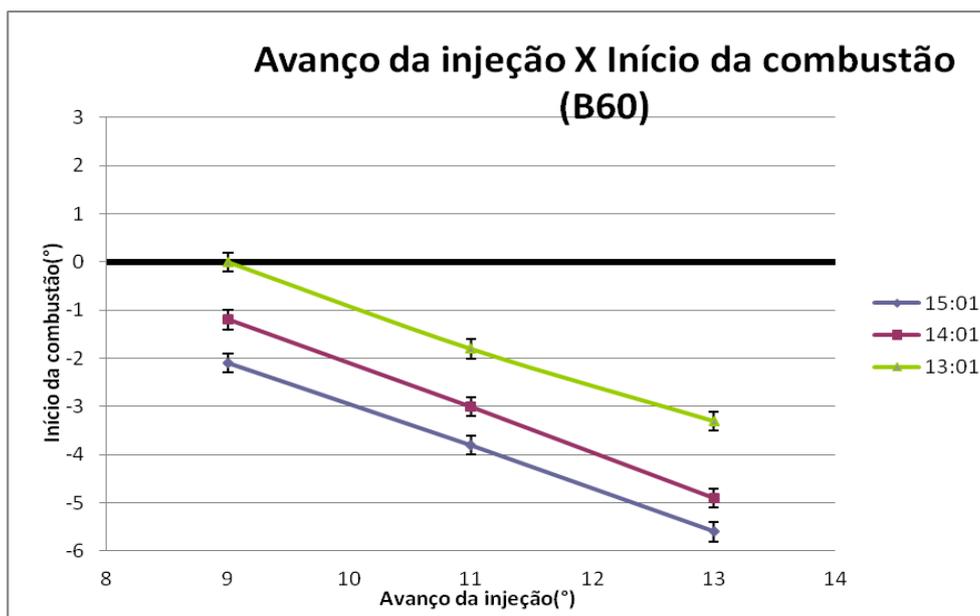


Figura 8.6- Início da combustão em função do avanço da injeção para diferentes razões de compressão utilizando B60

### 8.3. Emissões de NOx

O comportamento das emissões de NOx com o débito de combustível fixo em 13 ml/min e com a razão de compressão de 13:1 está representado pela Figura 8.7. Através dela verifica-se que o B20 apresentou maiores emissões de NOx em relação ao B5 (crescimento de até 12% no caso do avanço de 9°). Um motivo para tal comportamento é o mesmo ter uma maior proporção de Biodiesel, o qual contém oxigênio em sua molécula.

A antecipação da injeção também fez crescer as emissões de NOx (crescimentos que podem chegar a 41,5%, no caso de se aumentar o avanço de 9° para o de 13° graus com o B20). Uma possível explicação é o fato de que o aumento do avanço da injeção como visto anteriormente faz com que combustão tenha seu início antecipado o que pode propiciar maiores temperaturas e pressões na câmara de combustão.

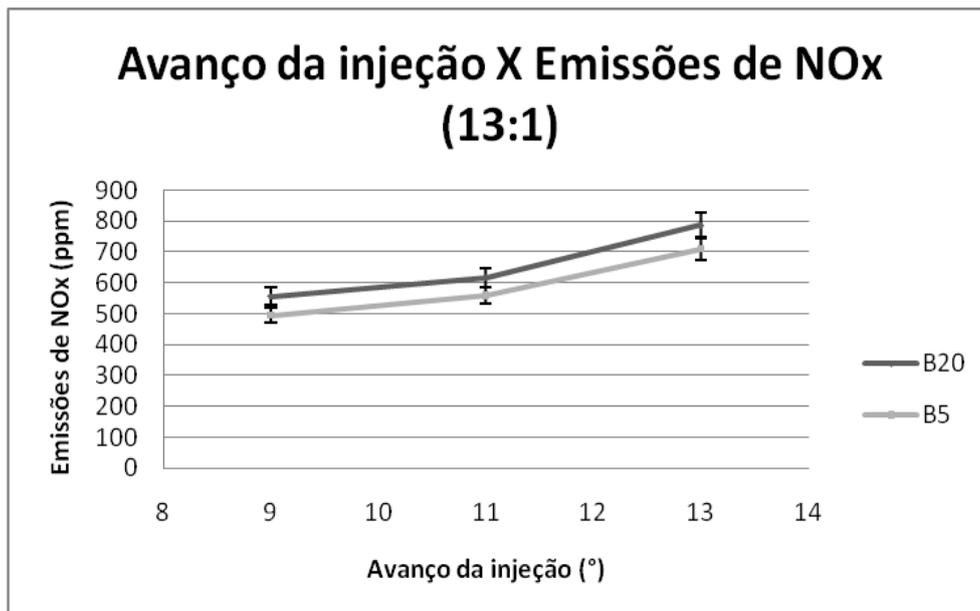


Figura 8.7- Emissões de NOx em função do avanço da injeção para razão de compressão de 13:1, utilizando B5 e B20

Os gráficos seguintes (figuras 8.8 e 8.9) representam respectivamente as emissões de NOx em função do avanço da injeção para razão de compressão de 14:1 e para a razão de 15:1, utilizando B5 e B20.

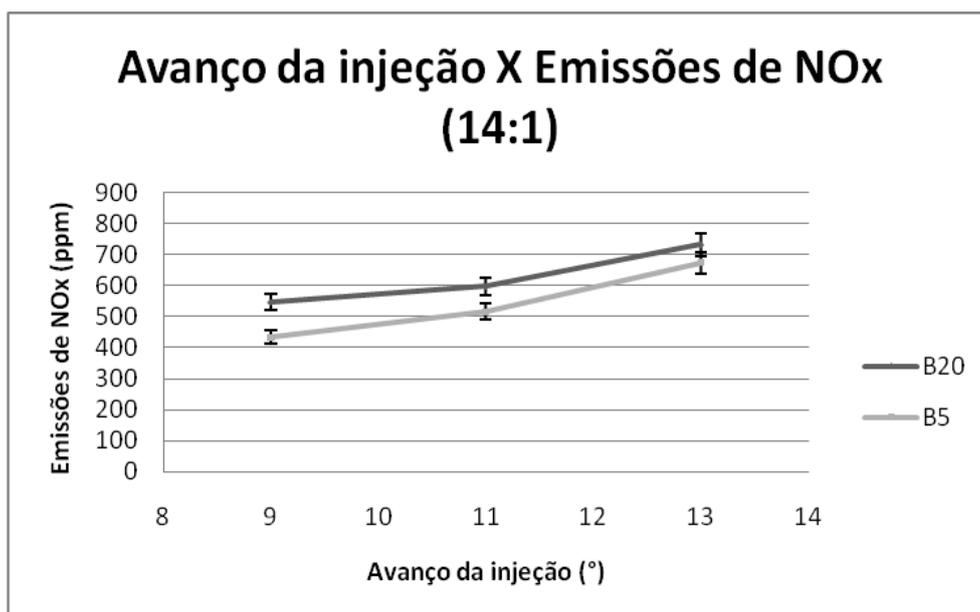


Figura 8.8- Emissões de NOx em função do avanço da injeção para razão de compressão de 14:1, utilizando B5 e B20

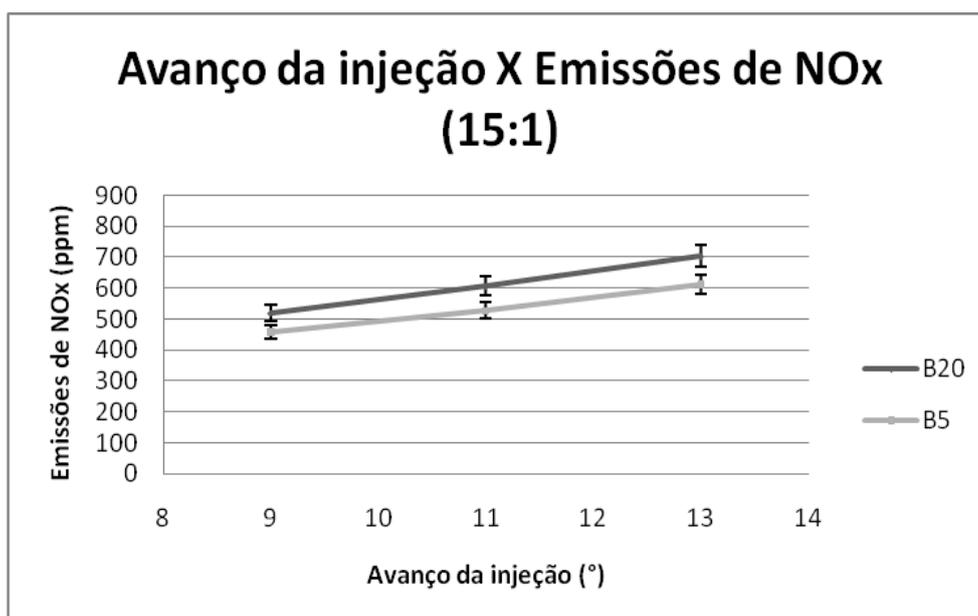


Figura 8.9- Emissões de NOx em função do avanço da injeção para razão de compressão de 15:1, utilizando B5 e B20

Observando-os, nota-se que o comportamento das emissões de NOx em função do avanço da injeção a razões de compressão diferentes é semelhante.

Verifica-se ainda que ocorre um decréscimo (diminuição de menos de 10% na maioria dos pontos, ao se modificar a razão de 13:1 para 14:1 ou da razão de 14:1 para a de 15:1) nas emissões quando aumentada a razão de compressão. Era de se esperar que com maiores razões de compressão as emissões aumentassem devido a maior temperatura na combustão, porém provavelmente outros fatores como a duração da combustão influenciaram tal diminuição nas emissões de NOx.

#### 8.4. Emissões de CO

A Figura 8.10 representa o gráfico das emissões de CO em função do avanço da injeção para razão de compressão de 14:1, utilizando B5 e B20, já a Figura 8.11 representa a razão de compressão de 15:1.

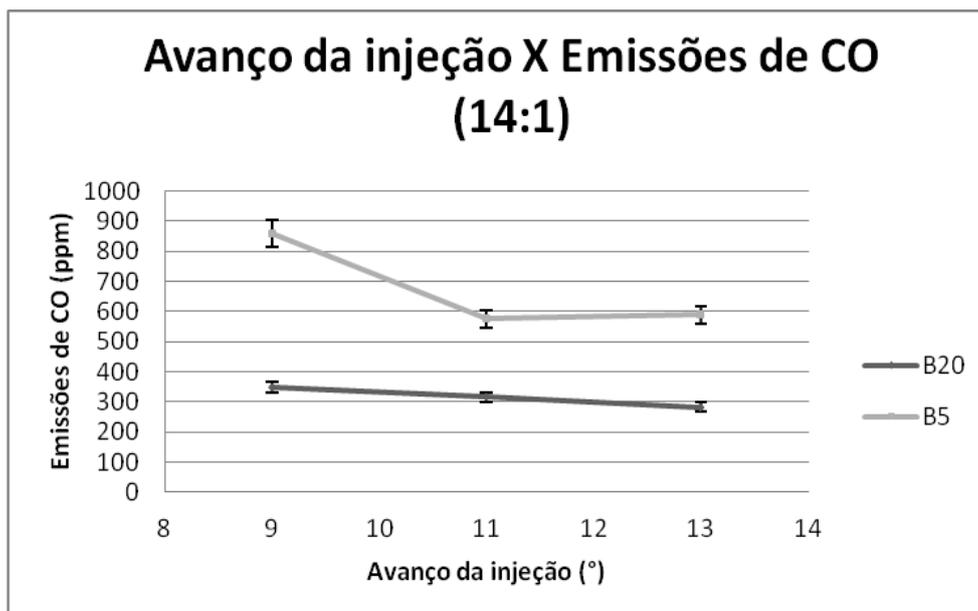


Figura 8.11- Emissões de CO em função do avanço da injeção para razão de compressão de 14:1, utilizando B5 e B20

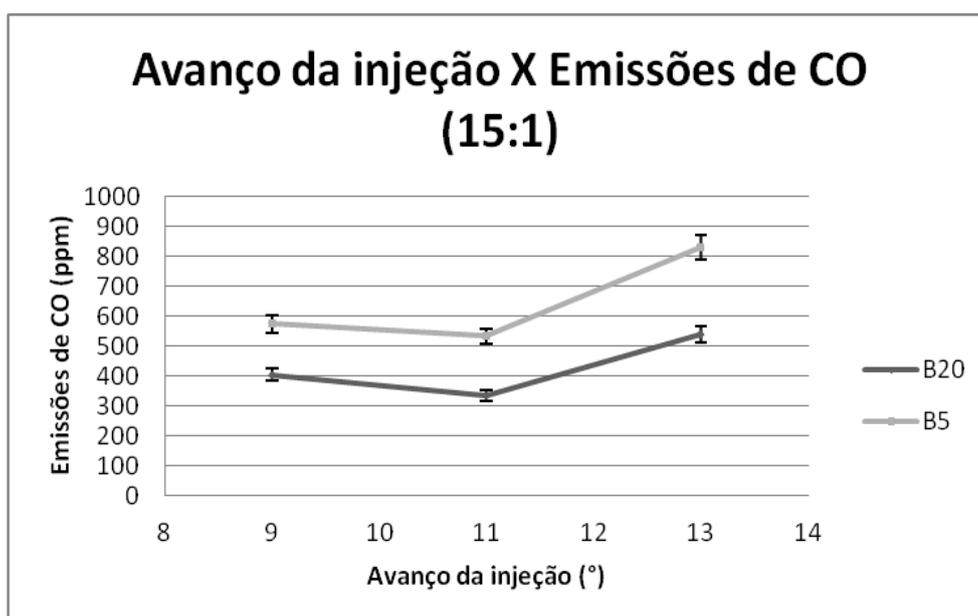


Figura 8.12- Emissões de CO em função do avanço da injeção para razão de compressão de 15:1, utilizando B5 e B20

Analisando-os, nota-se que as emissões de CO foram maiores para o B5, em média 81% maior para a razão de 14:1 e 52% para a razão de 15:1. As justificativas para a queima do B20 produzir menos CO são parecidas com a de ele produzir mais NOx. O fato do B20 utilizado apresentar menor atraso na ignição e conseqüentemente um menor

retardo no início de combustão pode propiciar a diminuição da combustão incompleta, sobretudo, pelo já mencionado excesso de oxigênio.

O aumento do avanço da injeção também fez decrescer as emissões de CO em até 31,5% em alguns casos (no caso do B5, na razão de 14:1, ao se passar o avanço da injeção de 9° para 13°), já que a combustão tem seu início antecipado o que pode propiciar maiores temperaturas e pressões na câmara de combustão favorecendo uma combustão mais completa.

Na razão de 15:1 (figura 8.12), nota-se que com o avanço de injeção 13° antes do PMS, as emissões de CO para ambos combustíveis, ao contrário do esperado, não diminuíram. Um possível motivo é que como o motor trabalha a baixas rotações (900 rpm), com esse avanço de injeção, a essa razão de compressão, tem-se um início de combustão muito cedo, podendo assim ter ocorrido dissociação do CO<sub>2</sub>.

Já o gráfico abaixo representa as emissões de CO em função do avanço da injeção para a razão de compressão de 13:1 (Figura 8.10).

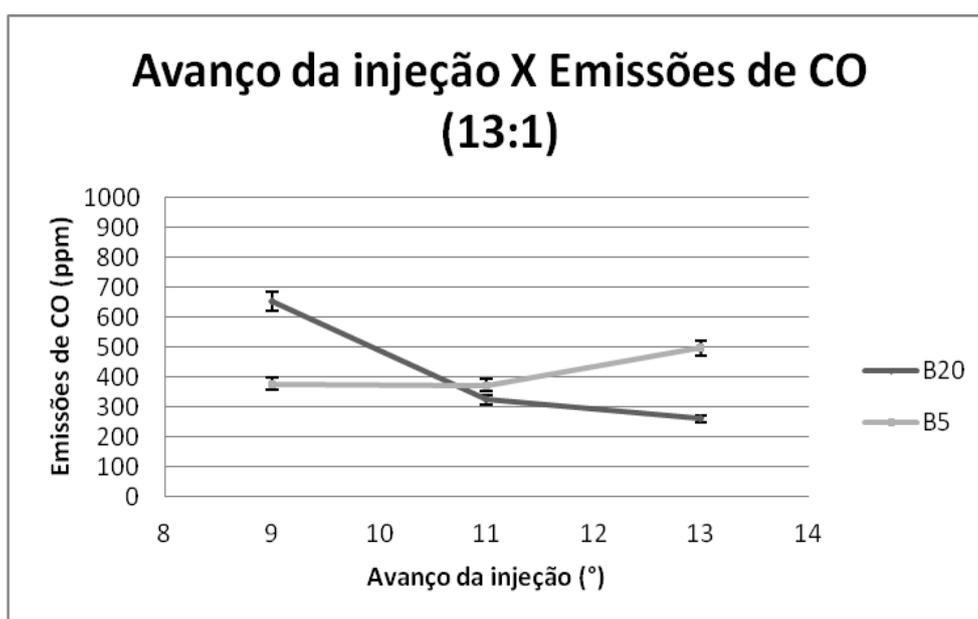


Figura 8.10- Emissões de CO em função do avanço da injeção para razão de compressão de 13:1, utilizando B5 e B20

Neste gráfico não fica evidenciada a tendência dos demais. Uma possível explicação para tal fato é que essa razão de compressão apresenta maiores atrasos de ignição, dificultando a vaporização do combustível pelo mesmo encontrar temperaturas e pressões menores.

## 9. Conclusão e sugestões

Tal trabalho foi de grande valia para se conhecer o comportamento de diferentes misturas de Biodiesel, sujeitas a variações na razão de compressão e no avanço de injeção.

No mesmo verificou-se que tanto a razão de compressão quanto o avanço de injeção influenciam diretamente na combustão e conseqüentemente nas emissões para todas as misturas de combustíveis testadas.

O atraso de ignição e o início da combustão tiveram um decréscimo conforme a proporção de Biodiesel na mistura foi aumentada, fato já esperado pelo Biodiesel usado ter maior número de cetano que o óleo diesel utilizado. O aumento da razão de compressão também propiciou o mesmo efeito no atraso de ignição e no início da combustão.

As emissões de CO tiveram um decréscimo conforme aumentada a proporção de Biodiesel na mistura e também quando aumentado o avanço da injeção.

Já as emissões de NOx tiveram um acréscimo conforme aumentada a proporção de Biodiesel na mistura e também quando aumentado o avanço da injeção.

Tais comportamentos são uteis para mostrar a influência de parâmetros de operação, como a injeção de combustível e taxa de compressão do motor, no atraso de ignição e nas emissões num motor operando com misturas de biocombustíveis.

Em futuros trabalhos pode-se, além de mensurar o atraso de ignição e a emissões, medir também a potencia através de um dinamômetro, a fim de ter o cálculo das emissões por kilowatts gerado e verificar a influência do atraso na ignição na potência do motor.

Outro possível trabalho seria plotar a curva de pressão na câmara de combustão pelo ângulo de virabrequim, a fim de mensurar além da potência, a influência dos parâmetros na duração da combustão e verificar sua influência nas emissões.

De posse dos dados obtidos no presente trabalho pode-se também fazer simulações numéricas que auxiliem a previsão de resultados sem a necessidade de inúmeras horas de testes.

## Referências Bibliográficas

- [1]<http://www.respirasaopaulo.com.br/page3.htm> (acessado em 30/01/2012)
- [2]<http://www.denatran.gov.br/frota.htm> (acessado em 30/01/2012)
- [3]UNEP (United Nations Environment Programme), *Towards sustainable production and use of resources: Assessing Biofuels*, 2009
- [4]Governo Federal do Brasil, Grupo de Trabalho Interministerial. *Viabilidade do uso do biodiesel como fonte alternativa de energia*, Dezembro, 2004.
- [5]SCHOLL, K. W., SORENSONS, S. C., “Combustion of soybean oil methyl ester in a direct injection diesel engine”. *SAE PAPER 930934*, 1993.
- [6]CHOI, C. Y, REITZ, R. D., “An experimental study on the effects of oxygenated fuel blends and multiple injection strategies on DI diesel engine emissions.” *Fuel* 78:1303–17, 1999;
- [7]MCCORMICK, R. L., TENNANT, R. J., HAYES, R. R., et al., “Regulated emissions from biodiesel tested in heavy-duty engines meeting 2004 emission standards”. *In: 2005 SAE Brazil fuels & lubricants meeting*, Maio, 2005.
- [8]BUYUKKAYA, E., “Thermal analysis of functionally graded coating AlSi alloy and steel pistons”. *Surface and Coating Technology* 202:3856–65, 2008.
- [9]KOJIMA T., NISHIWAKI K., “Numerical analysis of heat transfer in heat insulated diesel engines.” *JSAE Rev* 15(2):133–40, 1994.
- [10]PRASAD R., SAMRIA N. K., “Transient heat transfer in an internal combustion engine piston.” *Computers & Structures* 34(5):787–93, 1990.

- [11]BITTLE, J. A., KNIGHT, B. M., JACOBS, T. J., “Interesting Behavior of Biodiesel Ignition Delay and Combustion Duration.” *Energy Fuel* 24, 4166–4177, 2010.
- [12]BUNCE. M., SNYDER, D., ADI, G., et al., “Optimization of soy-biodiesel combustion in a modern diesel engine.” *FUEL JFUE* 4960 29, Janeiro 2011.
- [13]FANG, T., LIN, Y.C , FOONG, T. M. , et al., “ Reducing NOx Emissions from a Biodiesel-Fueled Engine by Use of Low-Temperature Combustion.” *Environ. Sci. Technol.* 42, 8865–8870, 2008.
- [14]PIMENTEL, V.S.B., “*Análise e diagnose de diesel-geradores operando com óleo de dendê ‘in natura’.*” Tese de D.Sc., Engenharia Mecânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002
- [15]<http://www.biodieselbr.com/biodiesel/definicao/o-que-e-biodiesel.htm> (acessado em 30/01/2012)
- [16]<http://www.anp.gov.br/pg=11850> (acessado em 19/10/2011)
- [17]<http://www.biodieselbr.com/biodiesel/especificacoes/especificacao-biodiesel.htm> (acessado em 30/01/2012)
- [18]HEYWOOD, J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, 1 ed. New York, USA, McGraw-Hill, 1988
- [19]ASTM, *Standard Test Method for Ignition Quality of Diesel Fuels By the Cetane Method*, ASTM D 613, 1985.
- [20]CNT : Sest/Senat, *A fase P7 do Proconve e o impacto no setor de transporte.* Brasília,2011.
- [21]NAJJAR, Y. S. H., “Gaseous Pollutants Formation and Their Harmful Effects on Health and Environment”, *Innovative Energy Policies*”, Vol. 1, Article IDE101203,2011.

[22]PLINT, M.A., *Engine Testing Theory and Practice*, 3 ed., England, Butterworth-Heinemann, 2007.

[23]<http://www.habmigern2003.info/language/portuguese/Sensores-eletroquimicos.htm>  
(acessado em 30/01/2012)

**APÊNDICE I**  
**Tabela**  
**número de cetano x posição do volante**

POSIÇÃO DO VOLANTE x Nº DE CETANO DO MOTOR CFR DO LMT(UFRJ / COPPE)									
LEITURAS COM OS PADRÕES	POSIÇÃO DO VOLANTE	NÚMERO DE CETANO ESTIMADO	NÚMERO DE CETANO COM PADRÕES	DIFERENÇA EM PERCENTUAL	LEITURAS COM OS PADRÕES	POSIÇÃO DO VOLANTE	NÚMERO DE CETANO ESTIMADO	NÚMERO DE CETANO COM PADRÕES	DIFERENÇA EM PERCENTUAL
<b>1</b>	<b>900</b>	<b>21,5</b>	<b>21,5</b>	<b>0,00%</b>		1460	34,8		
	910	21,7				1470	35,5		
	920	21,9				1480	36,3		
	930	22,2				1490	37,2		
	940	22,4				1500	38,2		
	950	22,6			<b>4</b>	<b>1503</b>	<b>38,5</b>	<b>38,3</b>	<b>&gt;0,5%</b>
	960	22,8				1510	39,3		
	970	23,1				1520	40,4		
	980	23,3				1530	41,6		
	990	23,5				1540	42,8		
	1000	23,7			<b>5</b>	<b>1545</b>	<b>43,4</b>	<b>43,4</b>	<b>0,00%</b>
	1010	23,9				1550	43,9		
	1020	24,2				1560	45		
	1030	24,4				1570	46,1		
	1040	24,6				1580	47,4		
	1050	24,8				1590	48,8		
	1060	25			<b>6</b>	<b>1596</b>	<b>49,8</b>	<b>49,5</b>	<b>&gt;0,6%</b>
	1070	25,2				1600	50,5		
	1080	25,4				1610	52,5		
	1090	25,6				1620	54,4		
	1100	25,8			<b>7</b>	<b>1622</b>	<b>54,8</b>	<b>55,1</b>	<b>&lt;0,5%</b>
	1110	25,9				1630	56,1		
	1120	26,1				1640	57,6		
	1130	26,3				1650	58,8		
	1140	26,5				1660	59,8		
	1150	26,6			<b>8</b>	<b>1667</b>	<b>60,5</b>	<b>60,8</b>	<b>&lt;0,5%</b>
	1160	26,8				1670	60,8		
	1170	26,9				1680	61,7		
	1180	27,1				1690	62,5		
<b>2</b>	<b>1187</b>	<b>27,2</b>	<b>27,1</b>	<b>&gt;0,4%</b>		1700	63,3		
	1190	27,2				1710	64,1		
	1200	27,3				1720	65		
	1210	27,5				1730	65,7		
	1220	27,6			<b>9</b>	<b>1740</b>	<b>66,4</b>	<b>66,4</b>	<b>0,00%</b>
	1230	27,7				1750	67,2		
	1240	27,9				1760	68		
	1250	28				1770	68,8		
	1260	28,1				1780	69,5		
	1270	28,3				1790	70,3		
	1280	28,4				1800	71		
	1290	28,6			<b>10</b>	<b>1807</b>	<b>71,4</b>	<b>72,0</b>	<b>&lt;0,8%</b>
	1300	28,8				1810	71,5		
	1310	29				1820	72,1		
	1320	29,2				1830	72,6		
	1330	29,4				1840	73		
	1340	29,7				1850	73,3		
	1350	29,9				1860	73,6		
	1360	30,2				1870	73,9		
	1370	30,5				1880	74,1		
	1380	30,9				1890	74,3		
	1390	31,3				1900	74,4		
	1400	31,7				1910	74,5		
	1410	32,1				1920	74,6		
	1420	32,6				1930	74,7		
	1430	33,1				1940	74,7		
<b>3</b>	<b>1437</b>	<b>33,3</b>	<b>32,7</b>	<b>&gt;1,8%</b>		1950	74,7		
	1440	33,6				1960	74,8		
	1450	34,2			<b>11</b>	<b>1964</b>	<b>74,8</b>	<b>74,8</b>	<b>0,00%</b>
LEITURAS COM OS PADRÕES	POSIÇÃO DO VOLANTE	NÚMERO DE CETANO ESTIMADO	NÚMERO DE CETANO COM PADRÕES	DIFERENÇA EM PERCENTUAL	LEITURAS COM OS PADRÕES	POSIÇÃO DO VOLANTE	NÚMERO DE CETANO ESTIMADO	NÚMERO DE CETANO COM PADRÕES	DIFERENÇA EM PERCENTUAL

**APÊNDICE II**  
**Informações Técnicas do Analisador**  
**Testo 350**

Probe type	Temperature	O <sub>2</sub>	CO (H <sub>2</sub> compensated)	COlow	CO <sub>2</sub>	NO	NOlow
<b>Measuring range</b>	-40...+2192 °F	0...+25 Vol.% O <sub>2</sub>	0...+10000 ppm CO	0...+500 ppm CO	0... CO <sub>2</sub> max Vol.% CO <sub>2</sub>	0...+3000 ppm NO	0...+300 ppm NO
<b>Accuracy ± 1 digit</b>	<33°F (-40...+212°F) <0.5% m.v. (+212...+2192°F)	±0.8% of f.v. (0...+25 Vol.% O <sub>2</sub> )	±5% of m.v. (+100...+2000 ppm CO) ±10% of m.v. (+2001...+10000 ppm CO) ±10 ppm CO (0...+99 ppm CO)	±5% of m.v. (+40...+500 ppm CO) ±2 ppm CO (0...+39.9 ppm CO)	Calculated from O <sub>2</sub>	±5% of m.v. (+100...+1999.9 ppm NO) ±10% of m.v. (+2000...+3000 ppm NO) ±5 ppm NO (0...+99 ppm NO)	±5% of m.v. (+40...+300 ppm NO) ±2 ppm NO (0...+39.9 ppm NO)
<b>Resolution</b>		0.01 Vol.% (0...+25 Vol. O <sub>2</sub> )	1 ppm CO (0...+10000 ppm CO)	0.1 ppm CO (0...+500 ppm CO)	0.01 Vol.% CO <sub>2</sub>	1 ppm NO (0...+3000 ppm NO)	0.1 ppm NO (0...+300 ppm NO)
<b>Reaction time</b>		20 s	40 s	40 s	20 s	30 s	30 s
<b>Reaction type</b>		195	190	190	195	190	190
<b>Probe type</b>	<b>NO<sub>x</sub> measuring module</b>	<b>SO<sub>x</sub></b>	<b>Efficiency</b>	<b>Flue gas loss</b>	<b>Differential pressure 1</b>	<b>Differential pressure 2</b>	<b>Flow Velocity</b>
<b>Measuring range</b>	0...+500 ppm NO <sub>x</sub>	0...+5000 ppm SO <sub>x</sub>	0...+120 %	-20...+99.9 % qA	± 80" H <sub>2</sub> O	± 16" H <sub>2</sub> O	0...7900 ft/min
<b>Accuracy ± 1 digit</b>	±5% of m.v. (+100...+500 ppm NO <sub>x</sub> ) ±5 ppm NO <sub>2</sub> (0...+99.9 ppm NO <sub>x</sub> )	±5% of m.v. (+100...+2000 ppm SO <sub>x</sub> ) ±10% of m.v. (+2001...+5000 ppm SO <sub>x</sub> ) ±5 ppm SO <sub>x</sub> (0...+99 ppm SO <sub>x</sub> )			<1% of m.v. (-20"~80" H <sub>2</sub> O) <1% of m.v. (+20"~80" H <sub>2</sub> O) <0.5% (19"~+19" H <sub>2</sub> O)	<1% of m.v. (-16"~12" H <sub>2</sub> O) <1% of m.v. (+16"~+12" H <sub>2</sub> O) <0.5% (12"~+12" H <sub>2</sub> O)	
<b>Resolution</b>	0.1 ppm NO <sub>x</sub> (0...+500 ppm NO <sub>x</sub> )	1 ppm SO <sub>x</sub> (0...+5000 ppm SO <sub>x</sub> )	0.1 % (0...+120 %)	0.1 % qA (-20...+99.9 % qA)	0.01" H <sub>2</sub> O	0.01" H <sub>2</sub> O	10 ft/min
<b>Reaction time</b>	40 s	30 s					
<b>Reaction type</b>	190	190					

**APÊNDICE III**  
**Análise do Biodiesel utilizado e**  
**Especificações da ANP para o Biodiesel e**  
**para o óleo diesel rodoviário**

Tabela A III.1- Análise pelo PEQ/COPPE do Biodiesel utilizado

	<b>COPPEComb</b>		
	<b>CENTRO DE PESQUISAS E CARACTERIZAÇÃO DE PETRÓLEO E COMBUSTÍVEIS</b>		
<b>CERTIFICADO DE ENSAIO</b>			
Emissão: 10/02/2010	Revisão: 00	DQC-009	Página 1 de 1
SOLICITANTE: LMT			Data da Solicitação 04/10/2011
Endereço:			
Amostra: B100 AGROPALMA Nov.2009		Volume recebido: 01 litro	
<b>RESULTADOS</b>			
<b>Características</b>	<b>Norma Utilizada</b>	<b>Resultado</b>	
Viscosidade Cinemática a 40°C, mm <sup>2</sup> /s	ASTM D7042	4,551	
Índice de Acidez, mgKOH/g	ASTM D664	0,71	
Estabilidade Oxidativa a 110° C, h	EN ISO12185	5,94	
Obs.:			
Emissão:	28/10/2011		
		<b>Marcileny B. Porto</b> <b>Gerente Técnico</b> <b>CRQ 3ª 03415130</b>	
<b>Responsável Técnico: Beatriz Cohen Chaves ( CRQ 3ª - 033017198 )</b>			
Os resultados reportados neste documento referem-se a amostra ensaiada. Dúvidas e sugestões, favor contactar o responsável pela aprovação deste documento. UFRJ/COPPE/PEQ/COPPEComb Av.: Pedro Calmon, s/nº Prédio anexo ao CT - Cidade Universitária - Ilha do Fundão CEP.: 21949-900 Telefone: 2562-8153			

Tabela A III.2 - Especificações para o Biodiesel segundo a Resolução N° 7 da ANP,  
de 19.03.2008-DOU 20.03.2008

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE	MÉTODO		
			ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
Aspecto	-	LII (1)	-	-	-
Massa específica a 20° C	kg/m³	850-900	7148 14065	1298 4052	EN ISO 3675 - EN ISO 12185
Viscosidade Cinemática a 40°C	Mm²/s	3,0-6,0	10441	445	EN ISO 3104
Teor de Água, máx. (2)	mg/kg	500	-	6304	EN ISO 12937
Contaminação Total, máx.	mg/kg	24	-	-	EN ISO 12662
Ponto de fulgor, mín. (3)	°C	100,0	14598	93	EN ISO 3679
Teor de éster, mín	% massa	96,5	15764	-	EN 14103
Resíduo de carbono (4)	% massa	0,050	15586	4530	-
Cinzas sulfatadas, máx.	% massa	0,020	6294	874	EN ISO 3987
Enxofre total, máx.	mg/kg	50	- -	5453	- EN ISO 20846 EN ISO 20884
Sódio + Potássio, máx.	mg/kg	5	15554 15555 15553 15556	-	EN 14108 EN 14109 EN 14538
Cálcio + Magnésio, máx.	mg/kg	5	15553 15556	-	EN 14538
Fósforo, máx.	mg/kg	10	15553	4951	EN 14107
Corrosividade ao cobre, 3h a 50 °C, máx.	-	1	14359	130	EN ISO 2160
Número de Cetano (5)	-	Anotar	-	613 6890 (6)	EN ISO 5165
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	19 (7)	14747	6371	EN 116
Índice de acidez, máx.	mg KOH/g	0,50	14448 -	664 -	- EN 14104 (8)
Glicerol livre, máx.	% massa	0,02	15341 15771 - -	6584 (8) -	- EN 14105 (8) EN 14106 (8)
Glicerol total, máx.	% massa	0,25	15344 -	6584 (8) -	- EN 14105 (10)
Mono, di, triacilglicerol (5)	% massa	Anotar	15342 15344	6584 (8)	- - EN 14105 (8)
Metanol ou Etanol, máx.	% massa	0,20	15343	-	EN 14110
Índice de Iodo (5)	g/100g	Anotar	-	-	EN 14111
Estabilidade à oxidação a 110°C, mín.(2)	h	6	-	-	EN 14112 (8)

Tabela A III. 3 Especificações do óleo diesel para uso rodoviário segundo a Resolução N° 42 da ANP, de 16.12.2009 – DOU 17.12.2009 – Retificada DOU 14.01.2010

CARACTERÍSTICA (1)	UNIDADE	LIMITE			MÉTODO	
		TIPO A e B			ABNT NBR	ASTM
		S50	S500	S1800 (2)		
Aspecto	-	Límpido e isento de impurezas			Visual (3)	
Cor	-	(4)	vermelho		Visual (3)	
Cor ASTM, máx. (5)	-	3,0			14483	D1500 D6045
Teor de biodiesel (7)	% volume	(6)			15568	-
Enxofre total, máx.	mg/kg	50	-	-	-	D2622 D5453 D7039 D7212 (8) D7220 (8)
		-	500	1800	- 14533 -	D2622 D4294 D5453
Destilação					9619	D86
10% vol., recuperados	°C	Anotar				
50% vol., recuperados		245,0 a 310,0				
85% vol., recuperados, máx.		-	360,0	370,0		
90% vol., recuperados		360,0 (máx.)	Anotar	Anotar		
Massa específica a 20°C	kg/m3	820 a 850 (9)	820 a 865q	820 a 880	7148 14065	D1298 D4052
Ponto de fulgor, mín.	°C	38,0			7974 14598 -	D56 D93 D3828
Viscosidade a 40°C	mm2/s	2,0 a 5,0			10441	D445
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	(10)			14747	D6371
Número de cetano ou Número de cetano derivado (NCD), mín.	-	46	42 (11)	42 (11)	-	D613 D6890 D7170
Resíduo de carbono Ramsbottom no resíduo dos 10% finais da destilação, máx.	% massa	0,25			14318	D524
Cinzas, máx.	% massa	0,010			9842	D482
Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, máx	-	1			14359	D130
Água (12) (13)	mg/kg	Anotar	-	-	-	D6304
Contaminação total (12) (14)	mg/kg	Anotar	-	-	-	-
Água e sedimentos, máx. (15)	% volume	0,05				D2709
CARACTERÍSTICA (1)	UNIDADE	LIMITE			MÉTODO	
		TIPO A e B			ABNT NBR	ASTM
		S50	S500	S1800 (2)		
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (16)	% massa	Anotar	-	-	-	D5186 D6591 (17)
Estabilidade à oxidação (16)	mg/100mL	Anotar	-	-	-	D2274 (18) D5304
Índice de neutralização	mg KOH/g	Anotar	-	-	14248	D974
Lubricidade, máx.	µm	(19)			-	-
Condutividade elétrica, mín (20)	pS/m	25	-	-	-	D2624 D4308

**APÊNDICE IV**  
**Organização/Ordem dos testes**

# AVANÇO DE INJEÇÃO - APMS

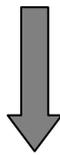
13°

11°

9°

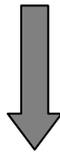
Padrão .....

**1**



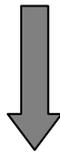
13:1 .....

**2**



14:1 .....

**3**



15:1 .....

**4**



**5**

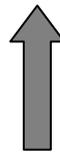


**6**

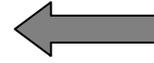
**9**



**10**



**8**



**7**



RAZÃO DE COMPRESSÃO

**APÊNDICE V**  
**Resultados dos testes**

<b>LABORATÓRIO DE MÁQUINAS TÉRMICAS - LMT/COPPE/UFRJ- TESTES NO MOTOR CFR CETANO</b>			
<b>Projeto: ESTUDO EXPERIMENTAL DO USO DE MISTURAS DE BIOCOMBUSTÍVEIS EM MOTORES COM TAXA DE COMPRESSÃO VARIÁVEL</b>			
<b>Operador(es): Nauberto e Vinicius</b>			
<b>Composição da amostra:</b>	<b>Data:17/ 01 / 2012</b>	<b>N.:1</b>	<b>Composição da amostra:</b>
<b>B5</b>	<b>às 9 horas</b>		<b>B5</b>
			<b>Data: 17/ 01 / 2012 N.:6</b>
			<b>às 9:32 horas</b>
Temp.do ar admissão (° F)	144		Temp.do ar admissão (° F)
Temp.do bico injetor (° F)	98		Temp.do bico injetor (° F)
Temp.do óleo lubrificante(° F)	110		Temp.do óleo lubrificante(° F)
Tempo de consumo de 13 ml	60		Tempo de consumo de 13 ml.
Posição da cremalheira	690		Posição da cremalheira
Posição do avanço injeção	1185		Posição do avanço injeção
Avanço da injeção	13		Avanço da injeção
Posição do volante	1570 (n. de cetano 46,1)		Posição do volante
Razão de compressão	12,46		Razão de compressão
Atraso da Ignição	13		Atraso da Ignição
<b>Composição da amostra:</b>	<b>Data: 17/ 01 / 2012</b>	<b>N.:2</b>	<b>Composição da amostra:</b>
<b>B5</b>	<b>às 9:20 horas</b>		<b>B5</b>
			<b>Data: 17/ 01 / 2012 N.:7</b>
			<b>às 9:34 horas</b>
Temp.do ar admissão (° F)	144		Temp.do ar admissão (° F)
Temp.do bico injetor (° F)	98		Temp.do bico injetor (° F)
Temp.do óleo lubrificante(° F)	110		Temp.do óleo lubrificante(° F)
Tempo de consumo de 13 ml	60		Tempo de consumo de 13 ml.
Posição da cremalheira	690		Posição da cremalheira
Posição do avanço injeção	1185		Posição do avanço injeção
Avanço da injeção	13		Avanço da injeção
Posição do volante	1500		Posição do volante
Razão de compressão	13:01		Razão de compressão
Atraso da Ignição	11,4		Atraso da Ignição
<b>Composição da amostra:</b>	<b>Data:17/ 01 / 2012</b>	<b>N.: 3</b>	<b>Composição da amostra:</b>
<b>B5</b>	<b>às 9:22 horas</b>		<b>B5</b>
			<b>Data: 17/ 01 / 2012 N.:8</b>
			<b>às 9:36horas</b>
Temp.do ar admissão (° F)	144		Temp.do ar admissão (° F)
Temp.do bico injetor (° F)	98		Temp.do bico injetor (° F)
Temp.do óleo lubrificante(° F)	110		Temp.do óleo lubrificante(° F)
Tempo de consumo de 13 ml	60		Tempo de consumo de 13 ml.
Posição da cremalheira	690		Posição da cremalheira
Posição do avanço injeção	1185		Posição do avanço injeção
Avanço da injeção	13		Avanço da injeção
Posição do volante	1380		Posição do volante
Razão de compressão	14:01		Razão de compressão
Atraso da Ignição	9,8		Atraso da Ignição
<b>Composição da amostra:</b>	<b>Data: 17/ 01 / 2012</b>	<b>N.:4</b>	<b>Composição da amostra:</b>
<b>B5</b>	<b>às 9:25 horas</b>		<b>B5</b>
			<b>Data: 17/ 01 / 2012 N.:9</b>
			<b>às 9:38 horas</b>
Temp.do ar admissão (° F)	144		Temp.do ar admissão (° F)
Temp.do bico injetor (° F)	98		Temp.do bico injetor (° F)
Temp.do óleo lubrificante(° F)	110		Temp.do óleo lubrificante(° F)
Tempo de consumo de 13 ml	60		Tempo de consumo de 13 ml.
Posição da cremalheira	690		Posição da cremalheira
Posição do avanço injeção	1185		Posição do avanço injeção
Avanço da injeção	13		Avanço da injeção
Posição do volante	1280		Posição do volante
Razão de compressão	15:01		Razão de compressão
Atraso da Ignição	8,7		Atraso da Ignição
<b>Composição da amostra:</b>	<b>Data: 17/ 01 / 2012</b>	<b>N.:5</b>	<b>Composição da amostra:</b>
<b>B5</b>	<b>às 9:30 horas</b>		<b>B5</b>
			<b>Data: 17/ 01 / 2012 N.:10</b>
			<b>às 9:45 horas</b>
Temp.do ar admissão (° F)	144		Temp.do ar admissão (° F)
Temp.do bico injetor (° F)	98		Temp.do bico injetor (° F)
Temp.do óleo lubrificante(° F)	110		Temp.do óleo lubrificante(° F)
Tempo de consumo de 13 ml	60		Tempo de consumo de 13 ml.
Posição da cremalheira	690		Posição da cremalheira
Posição do avanço injeção	1075		Posição do avanço injeção
Avanço da injeção	11		Avanço da injeção
Posição do volante	1280		Posição do volante
Razão de compressão	15:01		Razão de compressão
Atraso da Ignição	8,3		Atraso da Ignição

<b>LABORATÓRIO DE MÁQUINAS TÉRMICAS - LMT/COPPE/UFRJ- TESTES NO MOTOR CFR CETANO</b>			
<b>Projeto: ESTUDO EXPERIMENTAL DO USO DE MISTURAS DE BIOCOMBUSTÍVEIS EM MOTORES COM TAXA DE COMPRESSÃO VARIÁVEL</b>			
<b>Operador(es): Nauberto e Vinicius</b>			
<b>Composição da amostra:</b>	<b>Data:17/ 01 / 2012</b>	<b>N.:1</b>	<b>Composição da amostra:</b>
<b>B5</b>	<b>às 9 horas</b>		<b>B5</b>
Temp.do ar admissão (° F)	144		Temp.do ar admissão (° F)
Temp.do bico injetor (° F)	98		Temp.do bico injetor (° F)
Temp.do óleo lubrificante(° F)	110		Temp.do óleo lubrificante(° F)
Tempo de consumo de 13 ml	60		Tempo de consumo de 13 ml.
Posição da cremalheira	690		Posição da cremalheira
Posição do avanço injeção	1185		Posição do avanço injeção
Avanço da injeção	13		Avanço da injeção
Posição do volante	1570 (n. de cetano 46,1)		Posição do volante
Razão de compressão	12,46		Razão de compressão
Atraso da Ignição	13		Atraso da Ignição
<b>Composição da amostra:</b>	<b>Data: 17/ 01 / 2012</b>	<b>N.:2</b>	<b>Composição da amostra:</b>
<b>B5</b>	<b>às 9:20 horas</b>		<b>B5</b>
Temp.do ar admissão (° F)	144		Temp.do ar admissão (° F)
Temp.do bico injetor (° F)	98		Temp.do bico injetor (° F)
Temp.do óleo lubrificante(° F)	110		Temp.do óleo lubrificante(° F)
Tempo de consumo de 13 ml	60		Tempo de consumo de 13 ml.
Posição da cremalheira	690		Posição da cremalheira
Posição do avanço injeção	1185		Posição do avanço injeção
Avanço da injeção	13		Avanço da injeção
Posição do volante	1500		Posição do volante
Razão de compressão	13:01		Razão de compressão
Atraso da Ignição	11,4		Atraso da Ignição
<b>Composição da amostra:</b>	<b>Data:17/ 01 / 2012</b>	<b>N.: 3</b>	<b>Composição da amostra:</b>
<b>B5</b>	<b>às 9:22 horas</b>		<b>B5</b>
Temp.do ar admissão (° F)	144		Temp.do ar admissão (° F)
Temp.do bico injetor (° F)	98		Temp.do bico injetor (° F)
Temp.do óleo lubrificante(° F)	110		Temp.do óleo lubrificante(° F)
Tempo de consumo de 13 ml	60		Tempo de consumo de 13 ml.
Posição da cremalheira	690		Posição da cremalheira
Posição do avanço injeção	1185		Posição do avanço injeção
Avanço da injeção	13		Avanço da injeção
Posição do volante	1380		Posição do volante
Razão de compressão	14:01		Razão de compressão
Atraso da Ignição	9,8		Atraso da Ignição
<b>Composição da amostra:</b>	<b>Data: 17/ 01 / 2012</b>	<b>N.:4</b>	<b>Composição da amostra:</b>
<b>B5</b>	<b>às 9:25 horas</b>		<b>B5</b>
Temp.do ar admissão (° F)	144		Temp.do ar admissão (° F)
Temp.do bico injetor (° F)	98		Temp.do bico injetor (° F)
Temp.do óleo lubrificante(° F)	110		Temp.do óleo lubrificante(° F)
Tempo de consumo de 13 ml	60		Tempo de consumo de 13 ml.
Posição da cremalheira	690		Posição da cremalheira
Posição do avanço injeção	1185		Posição do avanço injeção
Avanço da injeção	13		Avanço da injeção
Posição do volante	1280		Posição do volante
Razão de compressão	15:01		Razão de compressão
Atraso da Ignição	8,7		Atraso da Ignição
<b>Composição da amostra:</b>	<b>Data: 17/ 01 / 2012</b>	<b>N.:5</b>	<b>Composição da amostra:</b>
<b>B5</b>	<b>às 9:30 horas</b>		<b>B5</b>
Temp.do ar admissão (° F)	144		Temp.do ar admissão (° F)
Temp.do bico injetor (° F)	98		Temp.do bico injetor (° F)
Temp.do óleo lubrificante(° F)	110		Temp.do óleo lubrificante(° F)
Tempo de consumo de 13 ml	60		Tempo de consumo de 13 ml.
Posição da cremalheira	690		Posição da cremalheira
Posição do avanço injeção	1075		Posição do avanço injeção
Avanço da injeção	11		Avanço da injeção
Posição do volante	1280		Posição do volante
Razão de compressão	15:01		Razão de compressão
Atraso da Ignição	8,3		Atraso da Ignição
<b>Composição da amostra:</b>	<b>Data: 17/ 01 / 2012</b>	<b>N.:10</b>	<b>Composição da amostra:</b>
<b>B5</b>	<b>às 9:32 horas</b>		<b>B5</b>
Temp.do ar admissão (° F)	144		Temp.do ar admissão (° F)
Temp.do bico injetor (° F)	98		Temp.do bico injetor (° F)
Temp.do óleo lubrificante(° F)	110		Temp.do óleo lubrificante(° F)
Tempo de consumo de 13 ml	60		Tempo de consumo de 13 ml.
Posição da cremalheira	690		Posição da cremalheira
Posição do avanço injeção	970		Posição do avanço injeção
Avanço da injeção	9		Avanço da injeção
Posição do volante	1280		Posição do volante
Razão de compressão	15:01		Razão de compressão
Atraso da Ignição	8		Atraso da Ignição

<b>LABORATÓRIO DE MÁQUINAS TÉRMICAS - LMT/COPPE/UFRJ- TESTES NO MOTOR CFR CETANO</b>			
<b>Projeto: ESTUDO EXPERIMENTAL DO USO DE MISTURAS DE BIOCOMBUSTÍVEIS EM MOTORES COM TAXA DE COMPRESSÃO VARIÁVEL</b>			
<b>Operador(es): Nauberto e Vinicius</b>			
<b>Composição da amostra:</b>	<b>Data:18/ 01 / 2012 N.:1</b>	<b>Composição da amostra:</b>	<b>Data: 18/ 01 / 2012 N.:6</b>
<b>B20</b>	<b>às 9:24 horas</b>	<b>B20</b>	<b>às 9:36 horas</b>
Temp.do ar admissão (° F)	145	Temp.do ar admissão (° F)	145
Temp.do bico injetor (° F)	98	Temp.do bico injetor (° F)	98
Temp.do óleo lubrificante(° F)	115	Temp.do óleo lubrificante(° F)	115
Tempo de consumo de 13 ml	60	Tempo de consumo de 13 ml.	60
Posição da cremalheira	683	Posição da cremalheira	683
Posição do avanço injeção	1207	Posição do avanço injeção	985
Avanço da injeção	13	Avanço da injeção	9
Posição do volante	1580 (n. de cetano 47,4)	Posição do volante	1280
Razão de compressão	12,39	Razão de compressão	15:01
Atraso da Ignição	13	Atraso da Ignição	7,9
<b>Composição da amostra:</b>	<b>Data: 18/ 01 / 2012 N.:2</b>	<b>Composição da amostra:</b>	<b>Data: 18/ 01 / 2012 N.:7</b>
<b>B20</b>	<b>às 9:26 horas</b>	<b>B20</b>	<b>às 9:38 horas</b>
Temp.do ar admissão (° F)	145	Temp.do ar admissão (° F)	145
Temp.do bico injetor (° F)	98	Temp.do bico injetor (° F)	98
Temp.do óleo lubrificante(° F)	115	Temp.do óleo lubrificante(° F)	115
Tempo de consumo de 13 ml	60	Tempo de consumo de 13 ml.	60
Posição da cremalheira	683	Posição da cremalheira	683
Posição do avanço injeção	1207	Posição do avanço injeção	1000
Avanço da injeção	13	Avanço da injeção	9
Posição do volante	1500	Posição do volante	1380
Razão de compressão	13:01	Razão de compressão	14:01
Atraso da Ignição	10,8	Atraso da Ignição	8,7
<b>Composição da amostra:</b>	<b>Data:18/ 01 / 2012 N.: 3</b>	<b>Composição da amostra:</b>	<b>Data: 18/ 01 / 2012 N.:8</b>
<b>B20</b>	<b>às 9:28 horas</b>	<b>B20</b>	<b>às 9:41 horas</b>
Temp.do ar admissão (° F)	145	Temp.do ar admissão (° F)	145
Temp.do bico injetor (° F)	98	Temp.do bico injetor (° F)	98
Temp.do óleo lubrificante(° F)	115	Temp.do óleo lubrificante(° F)	115
Tempo de consumo de 13 ml	60	Tempo de consumo de 13 ml.	60
Posição da cremalheira	683	Posição da cremalheira	683
Posição do avanço injeção	1200	Posição do avanço injeção	1095
Avanço da injeção	13	Avanço da injeção	11
Posição do volante	1380	Posição do volante	1380
Razão de compressão	14:01	Razão de compressão	14:01
Atraso da Ignição	9,2	Atraso da Ignição	8,8
<b>Composição da amostra:</b>	<b>Data: 18/ 01 / 2012 N.:4</b>	<b>Composição da amostra:</b>	<b>Data: 18/ 01 / 2012 N.:9</b>
<b>B20</b>	<b>às 9:30 horas</b>	<b>B20</b>	<b>às 9:43 horas</b>
Temp.do ar admissão (° F)	145	Temp.do ar admissão (° F)	145
Temp.do bico injetor (° F)	98	Temp.do bico injetor (° F)	98
Temp.do óleo lubrificante(° F)	115	Temp.do óleo lubrificante(° F)	115
Tempo de consumo de 13 ml	60	Tempo de consumo de 13 ml.	60
Posição da cremalheira	683	Posição da cremalheira	683
Posição do avanço injeção	1190	Posição do avanço injeção	1095
Avanço da injeção	13	Avanço da injeção	11
Posição do volante	1280	Posição do volante	1500
Razão de compressão	15:01	Razão de compressão	13:01
Atraso da Ignição	8,4	Atraso da Ignição	10,4
<b>Composição da amostra:</b>	<b>Data: 18/ 01 / 2012 N.:5</b>	<b>Composição da amostra:</b>	<b>Data: 18/ 01 / 2012 N.:10</b>
<b>B20</b>	<b>às 9:32 horas</b>	<b>B20</b>	<b>às 9:46 horas</b>
Temp.do ar admissão (° F)	145	Temp.do ar admissão (° F)	145
Temp.do bico injetor (° F)	98	Temp.do bico injetor (° F)	98
Temp.do óleo lubrificante(° F)	115	Temp.do óleo lubrificante(° F)	115
Tempo de consumo de 13 ml	60	Tempo de consumo de 13 ml.	60
Posição da cremalheira	683	Posição da cremalheira	683
Posição do avanço injeção	1085	Posição do avanço injeção	1003
Avanço da injeção	11	Avanço da injeção	9
Posição do volante	1280	Posição do volante	1500
Razão de compressão	15:01	Razão de compressão	13:01
Atraso da Ignição	8	Atraso da Ignição	10,4

**APÊNDICE VI**  
**Valores de atraso de ignição e início da**  
**combustão para as diferentes misturas de**  
**combustível**

## B5

Tabela A VI.1 - Atraso da ignição para o B5

<b>Atraso da ignição</b>		<b>Avanço da injeção</b>		
<b>B5</b>		<b>9°</b>	<b>11°</b>	<b>13°</b>
<b>Razão</b>	<b>13:01</b>	10,9	10,8	11,4
<b>de</b>	<b>14:01</b>	8,8	9,2	9,8
<b>compressão</b>	<b>15:01</b>	8	8,3	8,7

Tabela A VI.2 – Início da combustão para o B5

<b>Início da</b>		<b>Avanço da injeção</b>		
<b>combustão B5</b>		<b>9</b>	<b>11</b>	<b>13</b>
<b>Razão</b>	<b>13:01</b>	1,9	-0,2	-1,6
<b>de</b>	<b>14:01</b>	-0,2	-1,8	-3,2
<b>compressão</b>	<b>15:01</b>	-1	-2,7	-4,3

## B20

Tabela A VI.3 - Atraso da ignição para o B20

<b>Atraso da ignição</b>		<b>Avanço da injeção</b>		
<b>B20</b>		<b>9°</b>	<b>11°</b>	<b>13°</b>
<b>Razão</b>	<b>13:01</b>	10,4	10,4	10,8
<b>de</b>	<b>14:01</b>	8,7	8,8	9,2
<b>compressão</b>	<b>15:01</b>	7,9	8	8,4

Tabela A IV.4 – Início da combustão para o B20

<b>Início da</b>		<b>Avanço da injeção</b>		
<b>combustão B20</b>		<b>9°</b>	<b>11°</b>	<b>13°</b>
<b>Razão</b>	<b>13:01</b>	1,4	-0,6	-2,2
<b>de</b>	<b>14:01</b>	-0,3	-2,2	-3,8
<b>compressão</b>	<b>15:01</b>	-1,1	-3	-4,6

## B60

Tabela A VI.5 - Atraso da ignição para o B60

<b>Atraso da ignição</b>		<b>Avanço da injeção</b>		
<b>B60</b>		<b>9°</b>	<b>11°</b>	<b>13°</b>
<b>Razão</b>	<b>13:01</b>	9	9,2	9,7
<b>de</b>	<b>14:01</b>	7,8	8	8,1
<b>compressão</b>	<b>15:01</b>	6,9	7,2	7,4

Tabela A VI.6 – Início da combustão para o B60

<b>Início da</b>		<b>Avanço da injeção</b>		
<b>combustão B60</b>		<b>9°</b>	<b>11°</b>	<b>13°</b>
<b>Razão</b>	<b>13:01</b>	0	-1,8	-3,3
<b>de</b>	<b>14:01</b>	-1,2	-3	-4,9
<b>compressão</b>	<b>15:01</b>	-2,1	-3,8	-5,6

**APÊNDICE VII**  
**Emissões de NO<sub>x</sub> e CO para as diferentes**  
**razões de compressão**

**13:1**

Tabela A VII.1 – Emissões de NOx para a razão de compressão de 13:1

<b>Emissões de NOx</b>		<b>Avanço da injeção</b>		
		<b>9</b>	<b>11</b>	<b>13</b>
<b>Combustível</b>	<b>B20</b>	556	617	787
	<b>B5</b>	494	559	710

Tabela A VII.2 – Emissões de CO para a razão de compressão de 13:1

<b>Emissões de CO</b>		<b>Avanço da injeção</b>		
		<b>9°</b>	<b>11°</b>	<b>13°</b>
<b>Combustível</b>	<b>B20</b>	651	324	260
	<b>B5</b>	377	373	497

**14:1**

Tabela A VII.3 – Emissões de NOx para a razão de compressão de 14:1

<b>Emissões de NOx</b>		<b>Avanço da injeção</b>		
		<b>9°</b>	<b>11°</b>	<b>13°</b>
<b>Combustível</b>	<b>B20</b>	546	597	731
	<b>B5</b>	433	516	673

Tabela A VII.4 – Emissões de CO para a razão de compressão de 14:1

<b>Emissões de CO</b>		<b>Avanço da injeção</b>		
		<b>9°</b>	<b>11°</b>	<b>13°</b>
<b>Combustível</b>	<b>B20</b>	349	315	283
	<b>B5</b>	859	575	588

15:1

Tabela A VII.5 – Emissões de NOx para a razão de compressão de 15:1

Emissões de NOx		Avanço da injeção		
		9°	11°	13°
Combustível	B20	518	606	703
	B5	458	527	612

Tabela A VII.6 – Emissões de CO para a razão de compressão de 15:1

Emissões de CO		Avanço da injeção		
		9°	11°	13°
Combustível	B20	404	334	537
	B5	574	532	831