



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

OTIMIZAÇÃO DE MISTURAS TERNÁRIAS DE DIESEL, BIODIESEL E ETANOL

Daniel Santana Nogueira Vieira

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores: Marcelo José Colaço
 Albino José Kalab Leiroz

Rio de Janeiro
Abril de 2016

OTIMIZAÇÃO DE MISTURAS TERNÁRIAS DE DIESEL, BIODIESEL E ETANOL

Daniel Santana Nogueira Vieira

PROJETO DE GRADUAÇÃO 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.(Orientador)

Prof. Albino José Kalab Leiroz, Ph.D.(Orientador)

Prof. Carolina Palma Naveira Cotta, D.Sc.

Prof. Manuel Ernani de Carvalho Cruz, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2016

Vieira, Daniel Santana Nogueira

Misturas Ternárias de Diesel Biodiesel e Etanol/
Daniel Santana Nogueira Vieira. – Rio de Janeiro: UFRJ/
Escola Politécnica, 2016.

VIII, 119 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelo José Colaço *et al*

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/
Curso de Engenharia Mecânica, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 104-108.

1. Otimização 2. Misturas Ternárias 3. Interpolação
Multidimensional. 4. Biocombustíveis. 5. Emissão de
Poluentes. I. Colaço, Marcelo José *et al*. II. Universidade
Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de
Engenharia Mecânica. III. Otimização de Misturas
Ternárias de Diesel Biodiesel e Etanol.

“When life give you lemons, don’t make lemonade! Make life take the lemons back! Get mad! I don’t want your damn lemons! What am I supposed to do with theses? Demand to see life’s manager! Make life rue the day it thought it could give you lemons!”

Cave Johnson - Portal 2

AGRADECIMENTOS

Pois bem, chegamos a uma parte deste trabalho que a princípio parece fácil, mas se mostra tão complicada quanto, ou ainda mais, as que estão por vir. Agradecer a todos que me ajudaram durante o curso desta universidade, ou mesmo em outros momentos da vida é uma tarefa quase impossível, eu espero que o esforço aqui feito seja digno do que vocês todos merecem.

O início é fácil, começo pela família, aqueles que estiveram presentes comigo por toda minha vida, e que sempre prestaram o apoio que eu precisava nas mais diversas situações. Em especial a meu pai Reginaldo Vieira, minha mãe Maria Eunice Santana, além de meu irmão Diogo Vieira e minha cunhada Jacqueline Freitas.

Passo agora aqueles que estiveram comigo a todo momento: Jorge Antunes, Felipe Santana e Daniel Martins, com os quais sempre pude contar ao longo de todos estes anos e nos demais por vir.

Agradeço a todos os amigos que fiz durante este período de longos 5 anos e com quem divido diversas histórias, em especial: Adriano Gonçalves, André Vilela, Carlos Eduardo Paiva, Cayo Rodrigues, Hugo Bueno, Vinicius Martins, Gabriel Terra, Rodrigo Cota, Marcello Goulart, Ciro Monteiro, Arthur Berbert, Gabriel Silva, Felipe Lopes e Bruno Dias.

Aos meus companheiros de minhas duas segundas casas o Colégio Pedro 2 e o CEFET/RJ: Stelamary Domingos, Gabriel Soares, Nathalia Almeida, José Lucas Batista, João Felipe Guedes, Marcus Vinicius, Tâmara Berrada, Luiz Felipe Lopes, Igor Lobão, Raphael Graneiro, Guilherme William, Richard Martin e Bruno Seixas.

Aos professores Walter Silveira e Wolney Malafaia, por continuarem a mostrar para gerações de estudantes o dever e a importância do professor.

A Felipe Miana, por sempre se mostrar preocupado com o equilíbrio necessário entre o estágio e as atividades acadêmicas, além procurar instigar a busca por novas informações e conhecimento.

Aos profissionais e estudantes do Laboratório de Máquinas Térmicas da UFRJ: Mayara Teixeira, Matheus Vera di Vaio, Matheus Deus, Gabriel de Carvalho, Erick Sabino, Marcus Venicius, Pedro Paulo, Wilson Maior, Renato, Rosália, Marcia Alves, Rosalva, Fábio, Fabiana Cheade, César Pacheco, Juan, Andrés Castellanos, Rubelmar, Vinicius Sauer, Jean Pinho, Camila Lacerda, Gabriel Veríssimo e Gabriel Romero que me acolheram desde o meu estágio.

Aos professores do departamento de engenharia mecânica e em especial a Albino Leiroz e Marcelo Colaço que aceitaram me acompanhar nesta longa jornada desde o estágio como técnico até o projeto final. Procurando sempre me auxiliar e orientar durante os diversos trabalhos realizados, dúvidas surgidas e problemas encontrados. A estes meus mais sinceros agradecimentos, sem sua ajuda nada do que aqui se encontra poderia ter sido feito.

Um agradecimento especial ao engenheiro Nauberto Pinto por toda o auxílio e disposição na realização deste trabalho, sem o qual não seria possível sua conclusão. No mesmo sentido gostaria de agradecer ao engenheiro Luiz Guilherme e a Marcileny Porto por todo o auxílio com a preparação e caracterização do biodiesel

E derrepente esta página se mostra tão pequena...

AGRADECIMENTOS À ANP

Este trabalho foi realizado no contexto do Programa de Recursos Humanos da ANP, que forma profissionais especializados para a indústria do Petróleo e Gás Natural.

A participação dos alunos bolsistas em seminários, simpósios e congressos foi muito importante no sentido de aumentar o contato dos bolsistas com os reais atributos e dificuldades das indústrias de Petróleo e Gás Natural.

O autor gostaria de agradecer ao Programa de Recursos Humanos da ANP, em especial PRH-37 por auxiliar o desenvolvimento dos conhecimentos relativos as indústrias de hidrocarbonetos e à conclusão deste Projeto de Graduação.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

OTIMIZAÇÃO DE MISTURAS TERNÁRIAS DE DIESEL BIODIESEL E ETANOL

Daniel Santana Nogueira Vieira

Abril/2016

Orientadores: Marcelo José Colaço

Albino José Kalab Leiroz

Curso: Engenharia Mecânica

O uso de biocombustíveis no país vem crescendo cada vez mais com o tempo. Nos últimos anos o teor do biodiesel presente no diesel comercial foi elevado para 7%, bem como o teor de etanol presente na gasolina para 27%. O uso de tais combustíveis é motivado por diversos fatores econômicos, sociais e estratégicos. Dito isto o uso de misturas ternárias de combustíveis busca reduzir as emissões de certos tipos de poluentes e substituir em maior escala os combustíveis fósseis por fontes renováveis.

No trabalho foram preparadas e ensaiadas 12 misturas ternárias de diesel, biodiesel e etanol em diferentes concentrações, obtendo-se dados de número de cetano e emissão de diferentes poluentes. A partir dos dados obtidos foi utilizado um interpolador multidimensional do tipo *RBF (Radial Basis Function)* e norma *Multiquadrics* capaz de, a partir dos dados fornecidos, gerar uma função que pudesse ser calculada para qualquer ponto do domínio. Com base nesta função foi realizado um processo de otimização utilizando o método de enxame de partículas buscando minimizar ou maximizar certas características da mistura.

As superfícies de resposta geradas pela interpolação são exibidas e comparadas ao resultado obtido para a otimização quando consideramos diferentes restrições, como número mínimo de cetano e nível máximo permitido de emissão de NO_x e CO. O resultado é então discutido e comparado com o que era esperado a partir da teoria.

Palavras-chave: Otimização, Biocombustíveis, Interpolação Multidimensional, Misturas Ternárias, Emissão de Poluentes.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

OPTIMIZATION OF TERNARY MIXTURES OF DIESEL, BIODIESEL AND ETHANOL

Daniel Santana Nogueira Vieira

April/2016

Advisors: Marcelo José Colaço
 Albino José Kalab Leiroz

Course: Mechanical Engineering

The use of biofuels in Brazil is constantly growing with time. In the past few years the percentage of biodiesel mixed in the commercial diesel rose from 5 to 7%, meanwhile the ethanol percentage in the commercial gas also rose from 25 to 27%. The use of such fuels is motivated by diverse economic, social and strategic factors. The use of ternary mixtures is focused on the reduction of certain types of pollutant emissions and to substitute in a larger scale the use of fossil fuels by renewable ones.

In this work 12 samples with different concentrations of diesel, biodiesel and ethanol were prepared and tested, from which data for cetane number and pollutant emission was obtained. From the data points a multidimensional interpolator based on RBF (Radial Basis Function) and Multiquadrics norm was used to generate a function that could be calculated anywhere in the domain. Based on this function a process of optimization was done using the Particle Swarm Method, trying to minimize or maximize certain features of the mixture.

The response surfaces that were generated by the interpolated functions are exhibited and compared with the result from the optimization for different cases where restrictions like minimum cetane number, maximum allowed emission of CO and NO_x were applied. The results are then discussed and compared with what was expected based on the theory.

Keywords: Optimization, Biofuels, Multidimensional Interpolation, Ternary Mixtures, Pollutant Emission.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	1
ÍNDICE DE TABELAS.....	6
1. Introdução.....	7
1.1. Motivação	7
1.2. Objetivo	7
2. Revisão Bibliográfica	8
2.1. Ciclo Diesel e a Ignição por Compressão	8
2.1.1. Introdução	8
2.1.2. Atraso de Ignição	11
2.1.3. Número de cetano.....	12
2.2. Combustíveis.....	13
2.2.1. Etanol.....	13
2.2.2. Diesel.....	15
2.2.3. Biodiesel	17
2.3. Emissões	20
2.3.1. Óxidos de Nitrogênio (NO _x).....	22
2.3.2. Monóxido de Carbono (CO)	27
2.3.3. Hidrocarbonetos Não-Queimados (HC).....	28
2.3.4. Dióxido de Enxofre.....	30
2.3.5. Material Particulado	31
2.4. Misturas Ternárias	31
2.5. Otimização de Misturas	32
2.6. Interpoladores.....	32
2.6.1. Noções básicas.....	32
2.6.2. <i>Radial Basis Function</i>	33
2.7. Otimização	35
3. Metodologia Experimental	38
3.1. Aparato Experimental	38
3.1.1. Motor CFR Waukesha.....	38
3.1.2. Analisador de Gases TESTO 350XL	39
3.2. Planejamento Experimental	40
3.2.1. Ensaio de Número de Cetano	40
3.2.1.1. Rotação do Motor	40
3.2.1.2. Temperatura do Ar de Admissão	40
3.2.1.3. Temperatura do Bico Injetor	40
3.2.1.4. Temperatura do Óleo Lubrificante	40

3.2.1.5.	Tempo de consumo	40
3.2.1.6.	Posição da Cremalheira	40
3.2.1.7.	Posição do Avanço da Injeção.....	41
3.2.1.8.	Posição do Volante.....	41
3.2.1.9.	Atraso de Ignição.....	42
3.2.2.	Ensaio de Emissões.....	43
3.2.3.	Definição e Preparação das Amostras	43
4.	Resultados Experimentais e Discussão	50
4.1.	Número de Cetano	50
4.1.1.	Por Família de Etanol.....	50
4.1.2.	Por Família de Biodiesel	52
4.2.	Atraso de Ignição.....	54
4.2.1.	Por Família de Etanol.....	55
4.2.2.	Por Família de Biodiesel	57
4.3.	Correlação entre CO_{2i} e CO	59
4.4.	Correlação entre NO_x e NO	60
4.5.	Emissões de CO	61
4.5.1.	Por Família de Etanol.....	62
4.5.2.	Por Família de Biodiesel	64
4.6.	Emissões de CO_{2i}	66
4.6.1.	Por Família de Etanol.....	67
4.6.2.	Por Família de Biodiesel	69
4.7.	Emissões de NO_x	71
4.7.1.	Por Família de Etanol.....	72
4.7.2.	Por Família de Biodiesel	74
5.	Metodologia Computacional.....	77
5.1.	Geometria do problema	77
5.2.	Interpolação e Obtenção da Função Objetivo	77
5.2.1.	Escolha da implementação	77
5.2.1.1.	Escolha da <i>RBF</i>	78
5.2.1.2.	Escolha de <i>c</i>	78
5.2.1.3.	Desempenho e tempo computacional.....	78
5.3.	Otimização por Enxame de Partículas	79
5.3.1.	Cenários adotados	79
6.	Resultados Computacionais e Discussão	81
6.1.	Número de Cetano	84
6.2.	Atraso de Ignição.....	86

6.3.	Emissão de CO	90
6.4.	Emissão de CO ₂	92
6.5.	Emissão de NO _x	98
6.6.	Termo normalizado CO + NO _x	100
7.	Conclusão.....	102
8.	Referências Bibliográficas	103
9.	APÊNDICES.....	107
9.1.	Apêndice A – Número de Cetano Tabelado.....	107
9.2.	Apêndice B – Especificação TESTO 350XL.....	108
9.3.	Apêndice C – Tabela de Volume necessário de Diesel, Biodiesel e Etanol para cada amostra	109
9.4.	Apêndice D – Caracterização Biodiesel de Soja	110
9.5.	Apêndice E – Caracterização do Biodiesel de Palma	111
9.6.	Apêndice F – Dados dos Ensaio de Cetano.....	112
9.7.	Apêndice G – Dados dos Ensaio de Emissões	114
9.8.	Apêndice H – Dados dos Cenários de Otimização.....	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema dos 4 tempos típicos de um motor de ignição por compressão. [2]	8
Figura 2- Taxa de massa de combustível injetada ao longo da variação do ângulo do virabrequim. SOI (start of injection) marca o início da injeção, EOI (end of injection) marca o seu fim, TC (top center) estabelece o ponto morto superior e BC (bottom center) o ponto morto inferior. [3]	8
Figura 3 - Pressão ao longo da variação do ângulo do virabrequim. SOI (start of injection) marca o início da injeção, SOC (start of combustion) marca o início da combustão, EOC (end of combustion) marca o fim da combustão, IVC (intake valve closes) marca o fechamento da válvula de admissão e EVO (exhaust valve opens) marca a abertura da válvula de exaustão. TC (top center) marca o ponto morto superior e BC (bottom center) o ponto morto inferior. [3]	9
Figura 4 - Pré-câmara de combustão. [4]	10
Figura 5- Câmara de Turbulência. [4]	10
Figura 6 - Célula de Energia. [4]	10
Figura 7 - Número de cetano versus leitura do volante [mm].	13
Figura 8 - Oferta Interna de Energia no Brasil – 2014. [1]	14
Figura 9 - Veículos Leves, por Tipo (%). [1]	15
Figura 10 - Déficits e Superávits Comerciais de Derivados de Petróleo (% sobre a demanda interna) – 2014. [1]	15
Figura 11 - Fluxograma do processo de obtenção do Biodiesel. [13]	19
Figura 12 - Reação química de transesterificação. [14]	19
Figura 13 - Mecanismos de formação de poluentes em um motor de ignição por compressão com injeção direta durante as fases de combustão “premixed” e “mixing controlled”. [3]	21
Figura 14 - Em (a) temos a concentração de NO e NO ₂ para diferentes razões ar-combustível em um motor de ignição por centelha com aceleração no máximo. Em (b) temos a razão NO ₂ /NO em porcentagem para um motor de ignição por compressão utilizando diesel, com carga e rotação variável. [3]	23
Figura 15 - Razão da concentração média de NO no cilindro com a variação do ângulo da árvore de comando de manivelas em relação a concentração de NO na exaustão. Motor diesel de injeção direta, razão de equivalência de 0.6 e início de injeção 27° antes do ponto morto superior. [3]	24
Figura 16 - Concentrações na exaustão de NO e NO _x com a variação da razão de equivalência ou carga, para um motor de ignição por compressão diesel com injeção direta. Velocidade de 100 rpm e tempo de injeção em 27° antes do ponto morto superior. [3]	25
Figura 17 - Concentração de NO na exaustão com a variação da razão de equivalência em um motor de ignição por centelha. 1600, $\eta_V = 50\%$ rpm, MTB timing. [3]	25
Figura 18 - Em (a) temos a concentração de NO utilizando uma válvula de rápida atuação para diferentes distâncias da parede do cilindro. Em (b) temos a razão de equivalência calculada em diferentes distâncias da parede em um motor de ignição por compressão com câmara de turbulência e injeção indireta em função do ângulo da árvore de comando de manivelas. 100 rpm, injeção de combustível 13° antes do ponto morto superior, ignição 5° antes do ponto morto superior. [3]	26
Figura 19 - Efeitos da redução de concentração de oxigênio para diferentes diluentes (gás de exaustão, CO ₂ , N ₂) nas emissões de NO _x de um motor de injeção direta Diesel. Diâmetro = 140 mm, curso = 152mm, $r_c = 14.3$. Velocidade 1300 rpm, vazão de	

combustível = 142mm ³ /tempo motor, tempo de injeção 4° antes do ponto morto superior. [3].....	27
Figura 20 - Variação das emissões de CO com 11 amostras de combustíveis com diferentes razões de H/C em um motor de ignição por centelha. Em (a) temos a variação com relação à razão ar combustível. EM (b) temos a variação com relação à razão ar combustível relativa. [3]	28
Figura 21 - Representação esquemática dos mecanismos de formação de hidrocarbonetos em motores de ignição por compressão. (a) para combustível injetado durante o período de atraso de ignição. (b) para combustível injetado enquanto a combustão ocorre. [3]	30
Figura 22 - Esquema representativo da interpolação utilizando o método de <i>RBF's</i> . ..	35
Figura 23 - Processo iterativo para o método de Enxame de Partículas. [35]	37
Figura 24 - Bancada de Ensaios CFR Cetano	38
Figura 25 - Analisador de Gases Testo 350 XL.....	39
Figura 26 - <i>Probe</i> do analisador, conectado a uma derivação da exaustão do motor. 39	
Figura 27 - Sensores de SO ₂ (verde) e O ₂ (branco).....	39
Figura 28 - Ilustração da cremalheira atuando sobre o controle de débito de combustível. [36].....	41
Figura 29 - Micrômetro de controle do avanço de injeção. [37]	41
Figura 30 - Vista em corte do mecanismo de alteração da razão de compressão. [37]	42
Figura 31 - Leitores digitais para o avanço de injeção e atraso de ignição.....	43
Figura 32 - Bombonas contendo o diesel e biodiesel utilizados na preparação das amostras.....	45
Figura 33 - Balança de precisão, béquer e provetas.....	46
Figura 34 - Misturados utilizado.	46
Figura 35 - Separação de fases na amostra B10E15. Etanol se precipita na superfície.	47
Figura 36 - Amostra B7E5.....	48
Figura 37 - Amostra B10E5.....	48
Figura 38 - Amostra B20E5.....	48
Figura 39 - Amostra B60E5.....	48
Figura 40 - Amostra B7E8.....	48
Figura 41 - Amostra B10E8.....	48
Figura 42 - Amostra B20E8.....	48
Figura 43 - Amostra B60E8.....	48
Figura 44 - Amostra B10E15.....	48
Figura 45 - Amostra B20E15.....	49
Figura 46 - Amostra B60E15.....	49
Figura 47 - Amostra B100.....	49
Figura 48 - Amostra B7.....	49
Figura 49 - Amostras prontas devidamente armazenadas e identificadas.....	49
Figura 50 - Número de cetano em função da amostra de combustível ensaiada.	50
Figura 51 - Número de cetano para 0% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.	51
Figura 52 - Número de cetano para 5% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.	51
Figura 53 - Número de cetano para 8% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.	51
Figura 54 - Número de cetano para 15% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.	52

Figura 55 - Número de cetano para 7% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.....	53
Figura 56 - Número de cetano para 10% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.....	53
Figura 57 - Número de cetano para 20% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.....	53
Figura 58 - Número de cetano para 60% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.....	54
Figura 59 - Número de cetano para 100% de biodiesel de palma em volume.....	54
Figura 60 - Atraso de Ignição em função da amostra de combustível ensaiada.....	55
Figura 61 - Atraso de Ignição para 0% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.	56
Figura 62 - Atraso de Ignição para 5% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.	56
Figura 63 - Atraso de Ignição para 8% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.	56
Figura 64 - Atraso de Ignição para 15% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.	57
Figura 65 - Atraso de Ignição para 7% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.....	58
Figura 66 - Atraso de Ignição para 10% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.....	58
Figura 67 - Atraso de Ignição para 20% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.....	58
Figura 68 - Atraso de Ignição para 60% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.....	59
Figura 69 - Atraso de Ignição para 100% de biodiesel de palma em volume.	59
Figura 70 - Correlação entre CO ₂ e CO emitido e ajuste de curva linear.	60
Figura 71 - Correlação entre NO _x e NO emitidos e ajuste de curva linear.	61
Figura 72 - Correlação entre NO _x e NO ₂ emitidos e ajuste de curva linear.	61
Figura 73 - CO emitido em função da amostra de combustível ensaiada.....	62
Figura 74 - Emissão de CO para 0% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.	63
Figura 75 - Emissão de CO para 5% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.	63
Figura 76 - Emissão de CO para 8% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.	63
Figura 77 - Emissão de CO para 15% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.	64
Figura 78 - Emissão de CO para 7% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.....	65
Figura 79 - Emissão de CO para 10% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.....	65
Figura 80 - Emissão de CO para 20% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.....	65
Figura 81 - Emissão de CO para 60% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.....	66
Figura 82 - CO emitido para 100% de biodiesel de palma em volume.	66
Figura 83 - CO _{2i} emitido em função da amostra de combustível ensaiada.....	67
Figura 84 - Emissão de CO _{2i} para 0% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.	68

Figura 85 - Emissão de CO_{2i} para 5% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.	68
Figura 86 - Emissão de CO_{2i} para 8% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.	68
Figura 87 - Emissão de CO_{2i} para 15% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.	69
Figura 88 - Emissão de CO_{2i} para 7% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.	70
Figura 89 - Emissão de CO_{2i} para 10% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.	70
Figura 90 - Emissão de CO_{2i} para 20% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.	70
Figura 91 - Emissão de CO_{2i} para 60% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.	71
Figura 92 - Emissão de CO_{2i} para 100% de biodiesel de palma em volume.	71
Figura 93 – NO_x emitido em função da amostra de combustível ensaiada.	72
Figura 94 - Emissão de NO_x para 0% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.	73
Figura 95 - Emissão de NO_x para 5% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.	73
Figura 96 - Emissão de NO_x para 8% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.	73
Figura 97 - Emissão de NO_x para 15% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.	74
Figura 98 - Emissão de NO_x para 7% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.	75
Figura 99 - Emissão de NO_x para 10% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.	75
Figura 100 - Emissão de NO_x para 20% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.	75
Figura 101 - Emissão de NO_x para 60% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.	76
Figura 102 - Emissão de NO_x para 100% de biodiesel de palma em volume.	76
Figura 103 - Malha Computacional do problema.	77
Figura 104 – Superfície de Resposta obtida para número de cetano.	81
Figura 105 – Superfície de Resposta obtida para atraso de ignição.	81
Figura 106 - Superfície de Resposta obtida para CO emitido.	82
Figura 107 - Superfície de Resposta obtida para CO_2 emitido.	82
Figura 108 - Superfície de Resposta obtida para NO_x emitido.	83
Figura 109 - Superfície de Resposta obtida para o termo $\text{CO}_n + \text{NO}_{xn}$	83
Figura 110 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 1.	84
Figura 111 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 2.	85
Figura 112 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 3.	85
Figura 113 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 4.	86
Figura 114 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 5.	87

Figura 115 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 6.....	88
Figura 116 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 7.....	88
Figura 117 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 8.....	89
Figura 118 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 9.....	90
Figura 119 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 10.....	91
Figura 120 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 11.....	91
Figura 121 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 12.....	92
Figura 122 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 13.....	93
Figura 123 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 14.....	93
Figura 124 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 15.....	94
Figura 125 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 16.....	95
Figura 126 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 17.....	95
Figura 127 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 18.....	96
Figura 128 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função.....	97
Figura 129 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 20.....	97
Figura 130 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 21.....	98
Figura 131 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 22.....	99
Figura 132 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 23.....	99
Figura 133 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 24.....	100
Figura 134 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 25.....	101

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Especificação do Óleo Diesel comercial. [12].....	16
Tabela 2 - Produção de Biodiesel, por Estado (mil m ³). [1]	17
Tabela 3 - Especificação do Biodiesel. [16].....	20
Tabela 4 - Presença em peso de nitrogênio para petróleo bruto e destilados leves e pesados. [3].....	22
Tabela 5 - Percentual de Hidrocarbonetos não queimados divididos por tipo, em um motor de ignição por centelha funcionando com gasolina, com e sem a presença de catalisador. [3]	28
Tabela 6 - Reatividade de classes de hidrocarbonetos. [3]	29
Tabela 7 - Especificação do motor CFR Cetano.	39
Tabela 8 - Razão de compressão em função da posição do volante.	42
Tabela 9 - Amostras de combustível a serem ensaiadas.	44
Tabela 10 - Ordem de ensaio para as amostras adotadas.....	47
Tabela 11 - Cenários de otimização utilizados.	79
Tabela 12 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 1.	84
Tabela 13 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 2.	84
Tabela 14 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 3.	85
Tabela 15 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 4.	86
Tabela 16 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 5.	87
Tabela 17 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 6.	87
Tabela 18 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 7.	88
Tabela 19 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 8.	89
Tabela 20 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 9.	90
Tabela 21 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 10.	90
Tabela 22 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 11.	91
Tabela 23 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 12	92
Tabela 24 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 13.	92
Tabela 25 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 14.	93
Tabela 26 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 15.	94
Tabela 27 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 16.	94
Tabela 28 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 17.	95
Tabela 29 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 18.	96
Tabela 30 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 19.	96
Tabela 31 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 20.	97
Tabela 32 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 21.	98
Tabela 33 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 22.	98
Tabela 34 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 23.	99
Tabela 35 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 24.	100
Tabela 36 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 25.	100

1. Introdução

1.1. Motivação

Apesar da diminuição do crescimento econômico do país nos últimos anos, decorrência dos reflexos da crise internacional, o consumo de derivados de petróleo continua em crescimento [1]. Em especial o diesel e a gasolina mostram-se como grandes insumos da produção do país, uma vez que a frota de veículos leves utiliza a gasolina enquanto a frota pesada de transporte coletivo e de carga utiliza o óleo diesel. Devido a motivos históricos o Brasil apresenta-se como um país extremamente dependente do transporte rodoviário para cargas. Este fator em conjunto com o tamanho continental do país faz com que o entendimento do mercado, bem como dos efeitos de inovações no campo de combustíveis, seja extremamente importante do ponto de vista estratégico. Somado a isso temos ainda a capacidade ociosa de produção de biocombustíveis instalada no país e o grande expertise já utilizado na produção do álcool veicular, criando um grande fator motivacional para o estudo de misturas de diesel e biocombustíveis renováveis como biodiesel e etanol, auxiliando ainda no efeito da captura de carbono da atmosfera durante o processo de plantação das colheitas.

O PROCONVE (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores), criado em 1986 por resolução do CONAMA é o responsável pelas regulamentações de emissões de veículos no país. Seguindo a tendência mundial de preocupação com o ambiente bem como a saúde da população das grandes cidades, muito afetadas pelas emissões veiculares, o Brasil vem tornando mais rigorosas as regulamentações que estabelecem os limites de emissões veiculares no setor urbano e rural. Para ser possível atender essas novas regulamentações, bem como possibilitar regulamentações novas ainda mais exigentes, é de extrema importância o desenvolvimento de pesquisas que tratem das emissões, seja por mudanças em componentes com materiais novos, combustíveis de melhor qualidade ou princípios de operação diferentes.

1.2. Objetivo

Tratando especificamente do diesel comercial, alguns poluentes que desejamos diminuir a emissão são os óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono e óxidos de enxofre, causadores de diversos problemas de saúde, ambientais, etc. A proposta apresentada neste trabalho é a de otimizar misturas ternárias para motores de combustão interna por compressão, utilizando diesel comercial, biodiesel e etanol anidro, como forma de reduzir as emissões buscando manter a qualidade do combustível. Os dados utilizados para a otimização serão obtidos através de ensaios no Laboratório de Máquinas Térmicas da UFRJ em um motor de ignição por compressão Waukesha CFR devidamente instrumentado em acordo com a norma ASTM D-613 para determinação do número de cetano. Os dados de emissões para monóxido de carbono, dióxido de carbono, dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio serão obtidos através do analisador de gases portátil Testo 350XL. A otimização será realizada para diversos cenários diferentes através do método de enxame de partículas, com a utilização do método de interpolação de Funções de Base Radial (RBF) para determinação das funções objetivo.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Ciclo Diesel e a Ignição por Compressão

2.1.1. Introdução

Para entendermos melhor o funcionamento geral de um motor do ciclo Diesel, podemos ver na Figura 1 uma ilustração dos 4 tempos de um cilindro funcionando sob o regime de ciclo Diesel, ou, como chamaremos a partir de agora, de ignição por compressão:

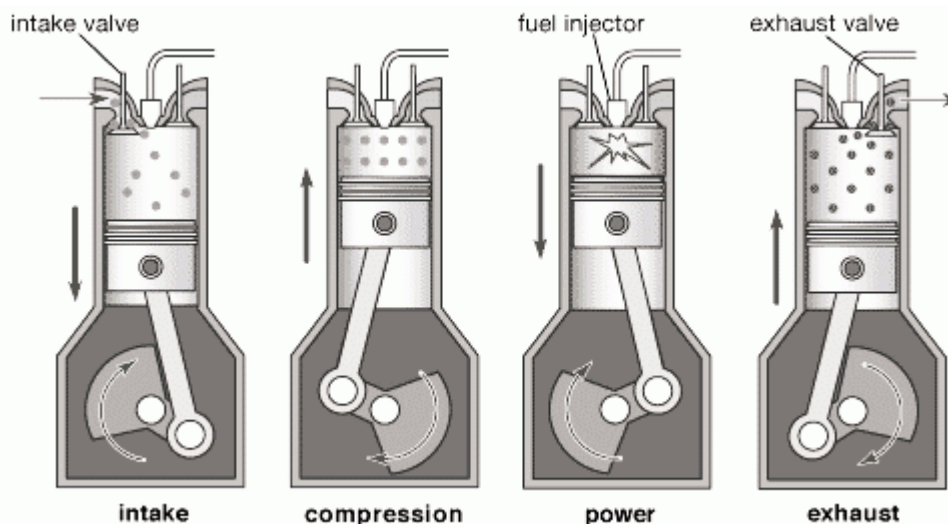


Figura 1 - Esquema dos 4 tempos típicos de um motor de ignição por compressão. [2]

No primeiro tempo o pistão se encontra no ponto morto superior e começa a sua descida, ao mesmo tempo a válvula de admissão se abre possibilitando a passagem da massa de ar (em motores que possuem sistema de turbo alimentação moderno esta massa é previamente comprimida pelo turbo e resfriada no *aftercooler*). A admissão ocorre até que o pistão alcança o ponto morto inferior, quando a válvula de admissão se fecha.

No segundo tempo começa o processo de compressão. Com todas as válvulas fechadas o ar começa a ser comprimido, elevando sua temperatura e pressão até o ponto de projeto do motor. Pouco antes do ponto morto superior o injetor de combustível se abre, injetando durante um curto espaço de tempo combustível à elevada pressão na massa de ar. Após um pequeno período de tempo conhecido como atraso de ignição a mistura entra em processo de autoignição, elevando ainda mais a temperatura e pressão, à medida que o pistão alcança o ponto morto superior.

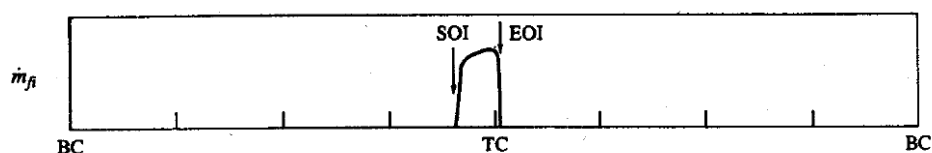


Figura 2- Taxa de massa de combustível injetada ao longo da variação do ângulo do virabrequim. SOI (start of injection) marca o início da injeção, EOI (end of injection) marca o seu fim, TC (top center) estabelece o ponto morto superior e BC (bottom center) o ponto morto inferior. [3]

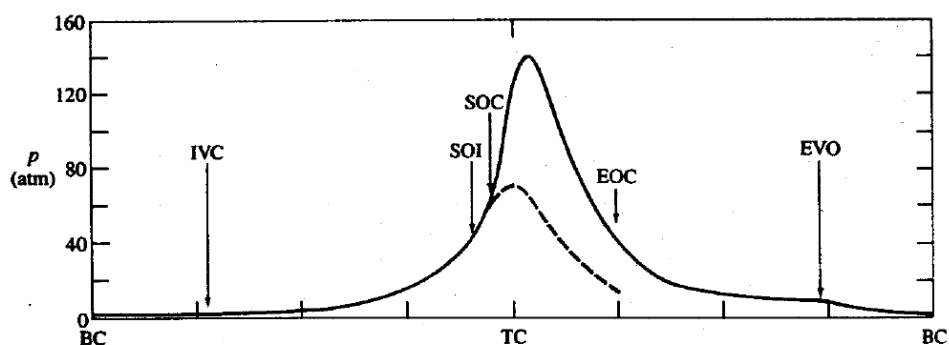


Figura 3 - Pressão ao longo da variação do ângulo do virabrequim. SOI (start of injection) marca o início da injeção, SOC (start of combustion) marca o início da combustão, EOC (end of combustion) marca o fim da combustão, IVC (intake valve closes) marca o fechamento da válvula de admissão e EVO (exhaust valve opens) marca a abertura da válvula de exaustão. TC (top center) marca o ponto morto superior e BC (bottom center) o ponto morto inferior. [3]

No terceiro tempo, temos a continuação do processo de combustão, à medida que o pistão se dirige ao ponto morto inferior, sendo este o tempo responsável pela geração de energia do motor.

No último tempo ocorre a exaustão, o pistão se movimenta em direção ao ponto superior novamente, a válvula de exaustão se abre e os gases resultantes da combustão são coletados pelo sistema de exaustão. Após esse processo retornamos à situação descrita no primeiro tempo, iniciando-se o processo todo novamente.

Os motores de combustão interna por compressão possuem funcionamento semelhante aos motores de ignição por centelha que podemos encontrar em nossos respectivos carros. Ainda assim é importante explicar quais são as diferenças entre esses dois ciclos, onde o uso do diesel se sobressai e o porquê.

Primeiramente, apesar de não abordado neste trabalho, os motores de 2 tempos que utilizam o princípio de ignição por compressão são competitivos com aqueles de 4 tempos, a menos do caso de motores de pequeno porte. Isso se contrapõe ao comportamento típico que encontramos nos motores de ignição por centelha e que vem do fato de no ciclo de ignição por compressão com 2 tempos apenas ar ser perdido durante o processo de exaustão/admissão.

Isto nos leva a próxima diferença entre a ignição por compressão e centelha. No último caso, temos no primeiro tempo a admissão de uma mistura previamente misturada de ar e combustível, seja por um carburador ou injeção eletrônica. No caso da ignição por compressão durante o processo de admissão apenas o ar entra no cilindro, sendo a adição do combustível feita durante o fim do tempo de compressão. Ainda sobre o ar admitido, o mesmo alcança temperaturas e pressões da ordem de 800 K e 4 MPa [3], respectivamente, durante o processo de compressão. O processo de injeção do combustível ocorre a cerca de 20° antes do ponto morto superior, com o combustível sendo injetado a elevada pressão. Nos motores mais antigos a pressão de injeção era próxima aos 200 bar, porém com a evolução tecnológica e a invenção do sistema *Common Rail* pela Bosch essas pressões puderam alcançar uma ordem de grandeza acima, alcançando até cerca de 2100 bar.

No ciclo de ignição por compressão, como o nome indica, a ignição não é comandada por uma centelha, mas sim pelo processo de autoignição do combustível com a massa de ar no cilindro. Nesse ciclo as razões de compressão são muito maiores do que nos motores de ignição por centelha, variando de 12 a 24 [3]. Esta

variação ocorre, entre outros fatores, pela presença ou não de um sistema de sobre alimentação, comum a grande parte dos motores deste tipo de ciclo, em especial aqueles que trabalham com potências muito elevadas em casos como indústria naval e geração de energia, sendo uma forma de reduzir o tamanho e peso dos motores utilizados. Para isso temos um turbo compressor responsável por comprimir o ar admitido da atmosfera, este ar aquece devido ao processo de compressão e normalmente passa por um trocador de calor conhecido como *aftercooler* que é responsável por diminuir sua temperatura, aumentando ainda mais a massa específica do mesmo e, portanto, aumentando a potência possível de ser extraída durante a combustão. Após o processo de combustão os gases quentes são normalmente enviados a uma parte diferente do turbo compressor, com o objetivo de ceder energia ao mesmo para o processo de compressão do ar admitido e aumento da eficiência do motor.

A mistura costuma ser pobre, sempre contando com excesso de ar e a razão ar-combustível é regulada apenas pela diferença no tempo de injeção de combustível, com a massa de ar admitida mantendo-se a mesma.

Uma vez que o combustível só entra em contato com a massa de ar pouco antes da combustão, no passado criaram-se formas alternativas de injeção do combustível, onde a injeção ocorre de forma indireta, normalmente em uma espécie de pré-câmara, localizada antes da câmara de combustão. Normalmente estas soluções possuem rendimento térmico menor e maior consumo de combustível, porém são mais flexíveis, uma vez que o processo de atomização não precisa ser tão rigoroso quanto na injeção direta. A seguir podemos ver algumas das soluções criadas para este fim em Figura 4, Figura 5 e Figura 6:

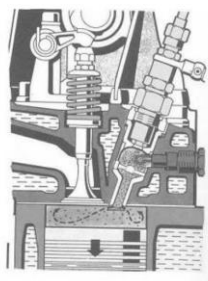


Figura 4 - Pré-câmara de combustão. [4]

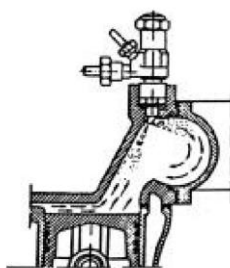


Figura 5- Câmara de Turbulência. [4]

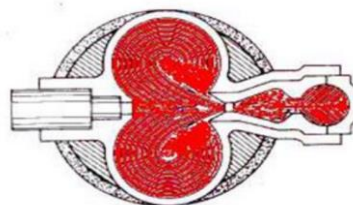


Figura 6 - Célula de Energia. [4]

Pensando novamente sobre o aspecto da qualidade da combustão da mistura um dos parâmetros mais importantes que um combustível utilizado neste ciclo deve possuir é um número de cetano elevado. O número de cetano é responsável por nos informar quão facilmente um combustível entrará em autoignição e pode ser pensado como o oposto ao número de octano (que mede o quanto o combustível resiste ser comprimido e não entrar em combustão) importante nos motores de combustão por centelha. Quão maior é esse número mais rapidamente ocorre a combustão após o processo de injeção e, portanto, menor é o atraso de ignição, outro parâmetro de grande importância. Com isso a combustão será mais completa, a eficiência e potência do motor aumentam e menores são as quantidades de hidrocarbonetos não queimados e monóxido de carbono emitidos.

Apesar de o número de cetano ser o fator mais importante quando pensamos a cerca de um combustível para utilização em um motor de ignição por compressão, existem outros fatores de elevada importância. Por exemplo, em motores de injeção direta é necessário garantir que o combustível utilizado seja limpo e livre de sujeiras, uma vez que os injetores para este tipo de motor possuem furos muito menores do que aqueles utilizados na injeção indireta, logo sujeiras causariam facilmente o entupimento do mesmo. Além disso, o combustível tem o papel de refrigerar e lubrificar uma série de componentes do motor, como bicos injetores, portanto valores de viscosidade são extremamente importantes.

2.1.2. Atraso de Ignição

O atraso de ignição em um motor de ignição por compressão é definido como o tempo (em graus) entre o início da injeção de combustível na câmara de combustão e o início da queima do combustível. O início da injeção é de fácil determinação e normalmente é dado pelo momento no qual a agulha do bico injetor se levanta da sede e começa a injetar combustível. O início da combustão é de muito mais difícil determinação sendo normalmente utilizado como referência o ponto no qual a curva de liberação de calor muda sua inclinação, sendo esta curva obtida a partir dos dados de pressão na câmara de combustão. Em alguns casos, porém, a curva de pressão sozinha pode ser suficiente para determinar o ponto no qual a combustão é iniciada. Em motores de injeção direta sob condições normais de operação este ponto é bem definido e de fácil detecção, mas, em motores de injeção indireta esta determinação é mais difícil. Outras técnicas também podem ser utilizadas como por exemplo o uso de sensores de detecção de luminosidade, com o objetivo de detectar o início da chama. Contudo através de experimentação foi percebido que a aparição da chama ocorre de forma atrasada com relação ao aumento súbito de pressão, e acaba resultando em um resultado com maior incerteza ou mesmo erro na determinação do ponto de ignição [3].

Uma série de processos físicos e químicos precisam ocorrer antes que uma parte significativa da energia química do combustível seja liberada. Os processos físicos que devem ser considerados são: a atomização do combustível líquido injetado; a evaporação das gotículas de combustível e finalmente a mistura do combustível com o ar. Os processos químicos são as reações de pré-combustão entre o combustível, ar e a mistura de gases residuais, que levaram ao processo de autoignição. Estes processos são afetados pelo projeto do motor em questão, além das variáveis de operação e características do combustível utilizado. Podemos então listar os fatores físicos e químicos que afetam o atraso de ignição nos motores:

- Tempo de injeção;
- Quantidade Injetada ou Carga;
- Temperatura e pressão do ar de admissão;
- Velocidade de rotação do motor;
- Efeitos das paredes da câmara de combustão;
- Concentração de oxigênio;
- Turbulência da mistura;
- Composição química do combustível.

Para o leitor que quiser se aprofundar na forma como cada parâmetro altera o atraso de ignição, o mesmo poderá encontrar resultados experimentais e uma maior discussão em [3].

Como as características do combustível afetam o atraso de ignição esta propriedade do combustível é muito importante na determinação de características de operação de motores de ignição por compressão, como eficiência da conversão de combustível, suavidade de operação, problemas de ignição, emissão de fumaça, ruídos e facilidade de partida. Por este motivo diversos trabalhos já foram realizados com o objetivo de estabelecer uma medição mais criteriosa do atraso de ignição a partir de dados experimentais, como em [5].

2.1.3. Número de cetano

Como dito anteriormente o número de cetano é um parâmetro fundamental na determinação da qualidade de queima de um combustível em um motor de ignição por compressão. O número de cetano é dependente do combustível e, portanto, de sua composição química. É sabido [3], por exemplo, que combustíveis com alto teor de parafinas apresentam um alto número de cetano, enquanto combustíveis ricos em hidrocarbonetos aromáticos, como são o etanol e gasolina, apresentam baixo número de cetano.

Como a operação de um motor de ignição pode variar tremendamente foi necessário estabelecer um padrão comum a ser seguido, uma referência comum. Este padrão que passou a ser adotado internacionalmente é aquele especificado em norma da ASTM, mais especificamente a ASTM D-613. Utilizando dois combustíveis de referência os hidrocarbonetos, e substâncias puras, cetano (n-hexadecano) e o heptametilnonano (HMN), a escala foi estabelecida com o resultado do cetano, um combustível com ótimo resultado em motores de ignição por compressão, como 100 e do heptametilnonano, que possui baixa qualidade para uso nesse tipo de motor, como 15 [3]. Mas como o método exige condições muito específicas para que o número de cetano seja determinado o ensaio deve ser realizado em um motor também determinado pela norma, denominado de *CFR (Cooperative Fuel Research Engine) Cetane*. Este motor é capaz de alterar diversos parâmetros como, por exemplo, a razão de compressão do motor enquanto o mesmo está em funcionamento e será apresentado mais profundamente no tópico de metodologia experimental.

Estes dois combustíveis de referência, porém, são muito caros e por este motivo não costumam ser usados normalmente. Em vez disso, são utilizados outros dois combustíveis que possuem os seus resultados de número de cetano amplamente conhecido e calibrados a partir das misturas acima, no caso do Laboratório de Máquinas Térmicas o T22 e U15 foram os combustíveis escolhidos. Estes combustíveis apresentam resultado de número de cetano de 74,8 e 18, respectivamente, e são então utilizados para obter misturas intermediárias com número de cetano variável. Com o resultado das misturas ensaiadas segundo a norma é então traçada uma curva do número de cetano do combustível que é testado *versus* a posição do volante que determina a posição do êmbolo da pré-câmara de combustão (efetivamente levando a variação da razão de compressão). Na Figura 7 a seguir podemos ver a curva do número de cetano com a posição do volante, além de seu comportamento genérico, além disso, os valores de cada ponto experimental da curva pode ser encontrado na seção 9.1.

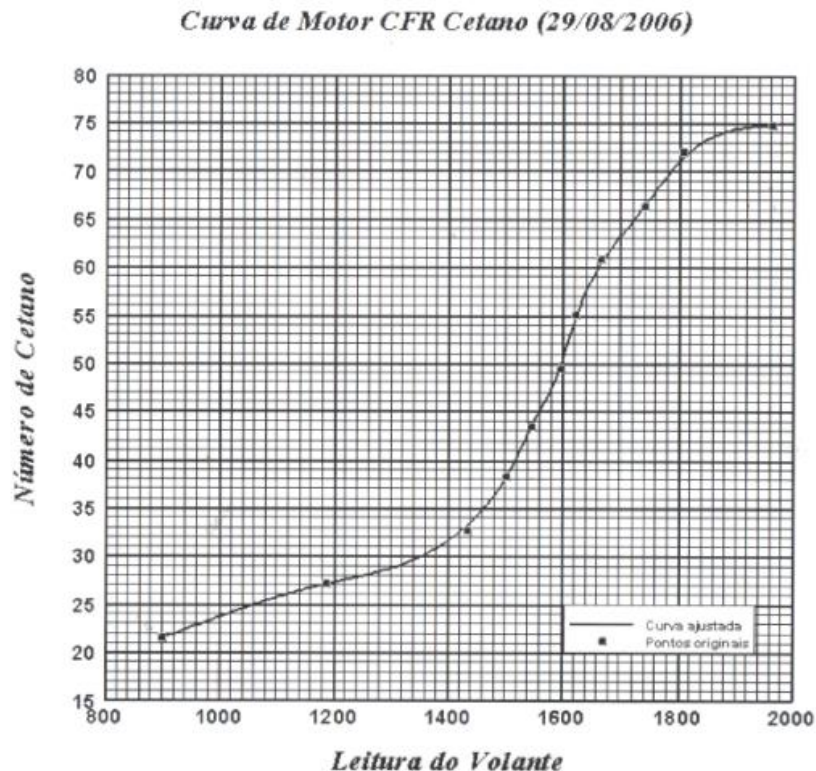


Figura 7 - Número de cetano versus leitura do volante [mm]. (LMT/UFRJ)

2.2. Combustíveis

É essencial para a compreensão do trabalho realizado uma pequena descrição dos combustíveis utilizados, suas características físico-químicas e comportamentos esperados. Além disso, tão importante quanto, é a contextualização de tais combustíveis na matriz energética brasileira.

2.2.1. Etanol

Historicamente o Brasil possui uma grande expertise na produção de etanol. Isto ocorre principalmente devido ao programa PROALCOOL ocorrido na década de 70, fomentado pelo governo como uma forma de buscar alternativas ao petróleo após sua primeira grande crise. Nossa produção se baseia primariamente na destilação da cana-de-açúcar, concentrada na região do estado de São Paulo. Segundo dados da Resenha Energética Brasileira de 2015 [1] a produção de etanol sofreu um crescimento de cerca de 3% com relação ao ano anterior (2013), com um aumento de 9,3% no consumo rodoviário. Além disso, o etanol e o bagaço de cana foram responsáveis por cerca de 15,7% da matriz energética brasileira, com participações de 4,9% e 10,9% respectivamente, respondendo por cerca 39,7% de toda a energia gerada por fontes renováveis no país.

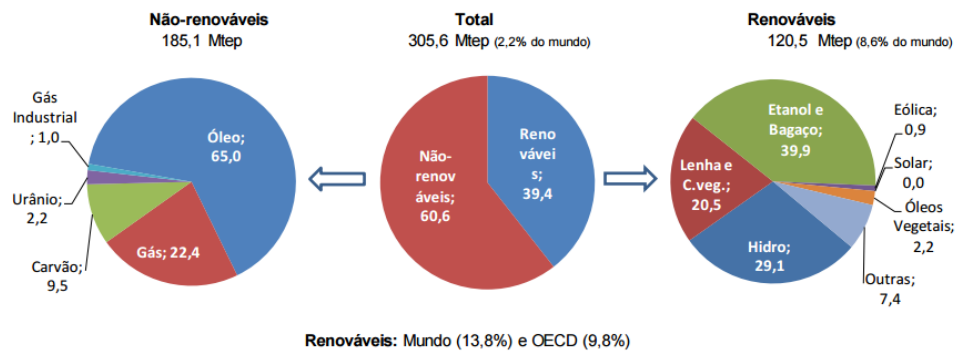


Figura 8 - Oferta Interna de Energia no Brasil – 2014. [1]

Atualmente o álcool desempenha dois papéis importantes no cenário energético nacional. Primeiramente ele pode ser consumido como combustível final na grande maioria dos carros vendidos nos país desde o início da década passada, quando a tecnologia *flex* foi desenvolvida, permitindo o consumo do mesmo em conjunto com a gasolina em qualquer quantidade. Porém, além disso, após o abandono do uso do chumbo tetraetila a nível internacional para uso em veículos terrestres (ainda é utilizado em aviação) o etanol assumiu o papel de aumentar a resistência à compressão na gasolina comercial, conhecida hoje como Gasolina C. Atualmente por regulamentação da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis [6], órgão responsável por regular a caracterização dos combustíveis derivados de petróleo e de origem renovável, a gasolina encontrada nos postos possui 27% de etanol em sua composição. É importante notar que o etanol vendido nos postos do país é hidratado com uma pequena porcentagem de água (cerca de 5%) [7], enquanto o etanol adicionado na gasolina é o etanol anidro, ou seja, sem a presença de água.

Utilizando como base os trabalhos de [8], [9], [10] e [11], podemos estabelecer um comparativo entre o comportamento do etanol frente ao óleo diesel comercial:

- baixa viscosidade quando comparado ao diesel;
- baixa resistência a compressão, implicando em baixo Número de Cetano;
- cadeia carbônica razoavelmente curta, portanto, contendo menor quantidade de carbono e implicando em menores emissões de monóxido de carbono;
- diminuição da emissão de particulados devido a maior presença de oxigênio em reação ao diesel;
- redução da emissão de óxidos de nitrogênio;
- tem sua origem em fontes renováveis.

Como podemos ver o etanol não se mostra com um grande candidato a ser utilizado em motores de ignição por compressão. Primeiro porque sua baixa viscosidade pode afetar o trabalho de lubrificação que o combustível possui nesses motores, porém, ainda mais preocupante é seu baixo número de cetano que faria com que o processo de combustão fosse muito prejudicado, o consumo aumentaria, haveria perda de potência e certos tipos de emissões (como hidrocarbonetos não queimados) poderiam se elevar. Porém, as características benéficas citadas podem

justificar seu uso em uma pequena quantidade, onde não seria tão prejudicial ao desempenho do motor.

2.2.2. Diesel

O diesel que conhecemos hoje é um nome comercial dado a uma certa mistura de diversos hidrocarbonetos diferentes, de origem advinda do petróleo e que segue uma série de características bem determinadas. Trata-se de um combustível de extrema importância em diversas partes do mundo. No Brasil ele desempenha papel estratégico no setor de transporte de cargas e de massa, seja rodoviário ou metroviário. Também possui expressividade nas soluções para geração de energia, tanto em plantas termoelétricas quanto em grupo geradores para uso em hospitais, locais remotos, etc. Nos veículos terrestres leves seu uso é bastante restrito por normas regulamentadoras que impedem a venda e fabricação indiscriminada de modelos com motores à ignição por compressão no país, correspondendo à apenas cerca de 10% dos veículos leves e motos em 2014:

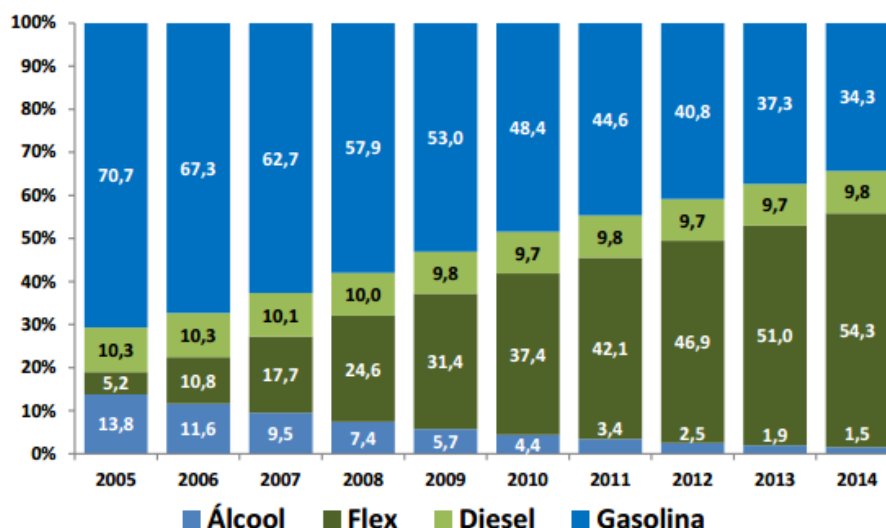


Figura 9 - Veículos Leves, por Tipo (%). [1]

Considerando novamente a Resenha Nacional Brasileira de 2015 podemos ver um Déficit comercial de cerca de 16,5% sobre a demanda de 2014. A exceção entre os derivados sendo apenas o óleo combustível, que apresenta Superávit de cerca de 99,9%. Os demais derivados podem ser visualizados abaixo:

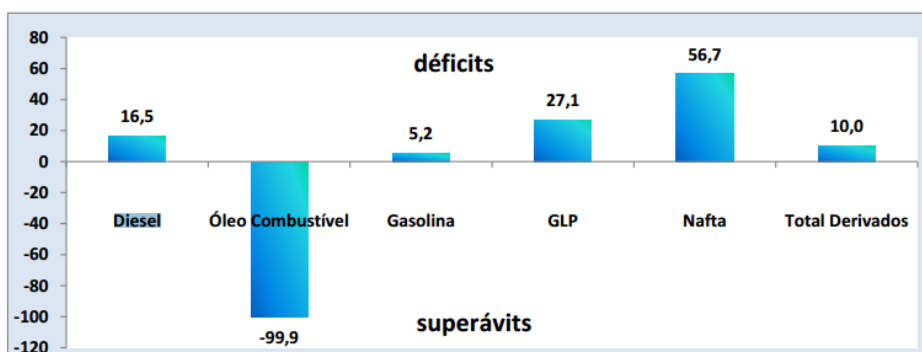


Figura 10 - Déficits e Superávits Comerciais de Derivados de Petróleo (% sobre a demanda interna) – 2014. [1]

Por ser um combustível derivado de petróleo o diesel possui emissões de poluentes que podem causar diversos problemas de saúde e ambientais, que serão discutidas mais a fundo no capítulo sobre emissões. Devido a esta característica, no Brasil atualmente possuímos duas formulações de diesel regulamentadas pela ANP: o diesel S10, que possui 7% em volume de biodiesel e máximo de 10ppm de enxofre e o diesel S500, que como o nome sugere possui a mesma quantidade em volume de biodiesel, porém apresentando 500ppm de enxofre como máximo. O uso do primeiro diesel é mandatório em ambientes urbanos, onde a presença concentrada de emissões de enxofre poderia causar um dano maior a população e ao ambiente. O diesel S500 possui uso liberado em ambientes fora dos centros metropolitanos, onde a densidade populacional e de veículos é menor, diminuindo o impacto de seu uso.

Abaixo podemos ver na Tabela 1 as especificações do óleo diesel rodoviário segundo a ANP, deve-se atentar que esta tabela está sujeita a alteração, especialmente quanto ao teor de biodiesel na mistura, e deve ser consultada novamente em sua fonte original sempre que necessário:

Tabela 1 - Especificação do Óleo Diesel comercial. [12]

CARACTERÍSTICA (1)	UNIDADE	LIMITE
		TIPO A e B
		S10
Aspecto (2) (22) (23)	-	Límpido e isento de impurezas
<u>(Nota)</u>		
Cor	-	(3)
Cor ASTM, máx. (5)	-	3,0
Teor de biodiesel (6)	% volume	(7)
Enxofre total, máx. (21)	mg/kg	10,0 (8)
		-
<u>(Nota)</u>		
Destilação		
10% vol., recuperados, mín.	°C	180,0
50% vol., recuperados		245,0 a 295,0
85% vol., recuperados, máx.		-
90% vol., recuperados		-
95% vol., recuperados, máx		370,0
Massa específica a 20°C	kg/m ³	815,0 a 850,0 (10)
Ponto de fulgor, mín.	°C	38,0
<u>(Nota)</u>		
Viscosidade Cinemática a 40°C	mm ² /s	2,0 a 4,5
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	(11)
Número de cetano, mín. ou Número de cetano derivado (NCD), mín.	-	48
Resíduo de carbono Ramsbot-tom no resíduo dos 10% finais da destilação, máx.	% massa	0,25
Cinzas, máx.	% massa	0,010
Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, máx	-	1

Teor de Água (13), máx.	mg/kg	200
Contaminação total (14), máx.	mg/kg	24
Água e sedimentos, máx. (14)	% volume	-
(Nota)		
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (9) (15), máx.	% massa	11
(Nota)		
Estabilidade à oxidação (15), máx.	mg/100mL	2,5
Índice de Acidez (24)	mg KOH/g	Anotar
(Nota)		
Lubricidade, máx.	µm	(18)
Condutividade elétrica, mín. (19)	pS/m	25

2.2.3. Biodiesel

O biodiesel é um combustível utilizado puro ou misturado ao óleo diesel mineral, em motores de ignição por compressão. Por regulamentação possui presença em volume de 7% no diesel comercial, porém seu uso em até 100% já foi realizado em alguns casos, como em locomotivas da mineradora Vale. Mais uma vez utilizando como referência a Resenha Energética Brasileira de 2015, no Brasil o biodiesel responde por cerca de 0,95% da matriz energética brasileira, com um aumento de produção de cerca de 17,4% entre 2013 e 2014. Levando-se em conta o etanol e o biodiesel a matriz de transportes brasileira possui cerca de 17,6% da matriz em fontes renováveis, frente a 3,6% quando consideramos a OCDE (influenciada pelo consumo de etanol dos EUA) e 0,4% para os demais. Porém ainda assim, a produção de cerca de 3.420 mil m³ no ano de 2014 mostra que ainda há uma grande ociosidade nas 54 unidades produtoras de biodiesel existentes, que podem produzir até 7.502 mil m³/ano, o que nos dá condições em termos de infraestrutura instalada de aumentar ainda mais o teor do biodiesel no diesel comercial. Na Tabela 2 podemos ver a distribuição da produção de biodiesel em diferentes estados do país:

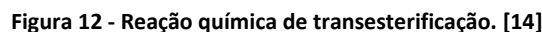
Tabela 2 - Produção de Biodiesel, por Estado (mil m³). [1]

Ano	BA	CE	GO	MT	MG	PR	SP	TO	RS	RO	MS	RJ	SC	Total
2013	194	84	576	419	88	211	165	49	883	14	189	9	38	2.918
2014	160	73	644	611	83	319	170	74	971	11	217	17	69	3.420
%n/n-1	-17,5	-13,3	11,8	46,0	-5,4	51,5	3,5	51,1	10,0	-19,1	15,0	94,4	78,4	17,2
%n	6,7	2,9	19,7	14,3	3,0	7,2	5,6	1,7	30,3	0,5	6,5	0,3	1,3	100,0

Voltando nossos olhos agora a uma caracterização mais precisa do biodiesel, podemos defini-lo como o éster obtido através do processo de transesterificação de óleos e gorduras de origem vegetal e animal, utilizando como catalisador uma base forte (como o hidróxido de potássio ou de sódio) e um álcool (normalmente metanol). Quando consideramos tanto sobre o ponto de vista de vegetais quanto globalmente o grande contribuinte é o óleo de soja, uma vez que diferente do caso do etanol, onde o açúcar e etanol disputam o destino final da cana-de-açúcar, o óleo de soja é um subproduto do processamento da soja, utilizada massivamente como farelo para alimentação animal. Porém outras culturas também contribuem de forma significativa ou já foram testadas, como o algodão, palma, mamona, babaçu, milho, dendê, etc. e mesmo processos com a utilização de algas já foram pensados. A gordura animal vem

de bovinos, suínos e frangos, com o sebo bovino sendo atualmente o segundo maior contribuinte para a produção nacional. Também podem ser utilizadas gorduras que tem como destino o lixo, como óleo de fritura e mesmo esgoto, apesar de seu uso ser um desafio ainda maior devido à grande variação de composição e heterogeneidade.

De forma geral o que queremos no processo de transesterificação são ácidos graxos e triglicerídeos, que serão reagidos a uma mistura de uma base forte e um álcool. Como resultado obtemos o éster que chamamos de biodiesel, além de glicerina, como um subproduto da reação. A reação pode ser feita em pressão ambiente, requerendo apenas um pequeno grau de aquecimento durante parte do processo. Além disso, a reação é reversível fazendo com que normalmente seja adicionado álcool em excesso para garantir que a mesma ocorra em apenas uma direção. Devido a isto, após a obtenção do biodiesel, é necessário que o mesmo passe por um processo de lavagem, onde é retirado o álcool que ainda se encontra diluído no mesmo. Porém, isto também faz com que o teor de água aumente, tornando-se necessário também um processo de desidratação do biodiesel, até que o mesmo finalmente alcance as especificações desejadas. O álcool a ser utilizado pode ser o metanol ou o etanol, com o uso do metanol sendo favorecido do ponto de vista do custo e facilidade da reação, porém, com o fator negativo de se utilizar um composto não renovável e altamente tóxico. Mesmo assim em termos gerais o metanol é o álcool utilizado em quase todos os processos de transesterificação no mundo, o que faz com que devamos ter cautela ao nomear o biodiesel como um combustível completamente renovável. Abaixo podemos ver o esquema do processo de transesterificação, retirado de [13] bem como a reação de transesterificação:



19

desempenha um papel importante nas características de lubrificação do mesmo. Felizmente o biodiesel possui ótimas características como lubrificante e a ausência do enxofre não se torna prejudicial.

Do ponto de vista do desempenho do motor, como descrito por [8] seu número de cetano é superior ao do diesel, resultando em menor atraso de ignição e combustão mais completa, contudo, existem dificuldades quanto a cristalização do biodiesel em baixas temperaturas, entupimento de bicos injetores e o ressecamento de borrachas de vedação. Além disso, é importante notar que o biodiesel está mais suscetível a variações de composição química, possuindo limites menores do que o diesel para a estabilidade a oxidação como podemos ver abaixo na Tabela 3:

Tabela 3 - Especificação do Biodiesel. [16]

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE
Aspecto	-	LII (1) (2)
Massa específica a 20° C	kg/m ³	850 a 900
Viscosidade Cinemática a 40°C	mm ² /s	3,0 a 6,0
Teor de água, máx.	mg/kg	200,0 (3)
Contaminação Total, máx. (13)	mg/kg	24
<u>(Nota)</u>		
Ponto de fulgor, mín. (4)	°C	100,0
Teor de éster, mín	% massa	96,5
Cinzas sulfatadas, máx. (6)	% massa	0,020
Enxofre total, máx.	mg/kg	10
Sódio + Potássio, máx.	mg/kg	5
Cálcio + Magnésio, máx.	mg/kg	5
Fósforo, máx. (7)	mg/kg	10
Corrosividade ao cobre, 3h a 50 °C, máx. (6)	-	1
Número Cetano (6)	-	Anotar
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	-9
Índice de acidez, máx.	mg KOH/g	0,50
Glicerol livre, máx.	% massa	0,02
Glicerol total, máx. (10)	% massa	0,25
Monoacilglicerol, máx.	% massa	0,7
Diacilglicerol, máx.	% massa	0,20
Triacilglicerol, máx.	% massa	0,20
Metanol e/ou Etanol, máx.	% massa	0,20
Índice de Iodo	g/100g	Anotar
Estabilidade à oxidação a 110°C, mín. (11)	h	6 (12)

2.3. Emissões

A formação e o controle da emissão de poluentes em motores de combustão interna por compressão e outras diversas máquinas térmicas (como, por exemplo,

turbinas a gás) é extremamente importante, uma vez que tais máquinas são responsáveis por parte considerável das emissões de poluentes, especialmente em ambientes urbanos. Estas emissões causam danos à população, provocando doenças, piora da qualidade de vida e alterações do micro clima da região. Dito isto é importante entendermos quais são as principais fontes de formação de poluentes no funcionamento de tais motores, seus efeitos e como podemos atuar sobre a operação do motor para reduzir a sua emissão.

Em termos gerais os tipos de emissões significativas nos motores de combustão interna por compressão são: as emissões de óxidos de nitrogênio, coletivamente conhecidos por NO_x , as emissões de monóxido de carbono (CO), as emissões de hidrocarbonetos não queimados (HC), as emissões de material particulado e finalmente as emissões de óxidos de enxofre (SO_x). Outras fontes responsáveis pela emissão de HC são gases que escapam através da interface entre cilindro e pistão, conhecidos como gases de *Blow-by*, assim como gases presentes no tanque de combustível, porém nestes casos o uso de sistemas de ventilação e recirculação utilizados nos motores mais modernos são suficientes para exercer o controle sobre tais fontes. Pensando em termos comparativos em relação aos motores de ignição por centelha, os motores de ignição por compressão possuem níveis de NO_x comparáveis, emissão de hidrocarbonetos significativa, porém com concentrações nos gases de exaustão menor por um fator de até 5 vezes.

Devido à injeção do combustível ocorrer apenas pouco antes do processo de combustão nos motores de ignição por compressão durante as partes mais críticas do seu funcionamento a distribuição da mistura presente no cilindro é não uniforme. A formação de poluentes então é altamente afetada pela distribuição do combustível no ar e como essa distribuição varia com o tempo devido aos efeitos de mistura. Abaixo na Figura 13 podemos ver como o jato de combustível assim como a chama influenciam a formação de NO, HC e fuligem (ou material particulado) durante diferentes fases de combustão em um motor de injeção direta com presença de turbilhonamento.

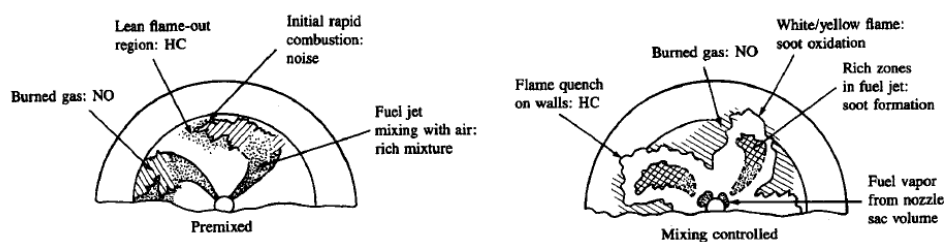


Figura 13 - Mecanismos de formação de poluentes em um motor de ignição por compressão com injeção direta durante as fases de combustão “premixed” e “mixing controlled”. [3]

Primeiramente temos a fase chamada “*premixed*” onde durante o período inicial de injeção de combustível devido ao atraso de ignição houve tempo para que se formasse uma massa de combustível e ar em mistura. Esta massa entra em combustão e é consumida rapidamente gerando uma taxa de liberação de calor muito elevada e é responsável pela maior parte do ruído gerado pelo motor. Após este período temos a fase chamada “*mixing controlled phase*” onde a combustão é controlada pela capacidade do combustível injetado se misturar ao restante de ar que existe na câmara de combustão.

A formação dos óxidos de nitrogênio ocorre nas regiões de alta temperatura onde estão os gases pós-queima, porém como a temperatura e a razão ar/combustível não são mais homogêneas nos gases pós-queima a taxa de formação se torna maior nas regiões que se encontram próximas da razão estequiométrica. A formação de fuligem ocorre na região rica em combustível não queimado, normalmente próximo a região central do jato de combustível, dentro da região de chama, onde o combustível é aquecido pela mistura com gases pós-queima à elevada temperatura. A fuligem então oxida na região de chama ao entrar em contato com o oxigênio, dando origem ao aspecto luminoso amarelo presente na chama. A formação de hidrocarbonetos não queimados e aldeídos ocorre em regiões onde a chama se extingue, como nas paredes ou em regiões onde a diluição excessiva do combustível previne a continuação do processo de combustão até o fim ou impede seu início. O combustível que vaporiza próximo aos bicos injetores durante estágio tardios do processo de combustão também são fontes de hidrocarbonetos não queimados [3].

2.3.1. Óxidos de Nitrogênio (NO_x)

Apesar de os óxidos de nitrogênio serem normalmente agrupados deve se notar que a presença do óxido nítrico (NO) é predominante dentro do cilindro dos motores, a produção de NO_2 aumenta à medida que parte do NO é oxidado ao chegar a atmosfera. Existem duas fontes para a presença de nitrogênio no processo de combustão, uma sendo o nitrogênio presente no combustível utilizado (normalmente sob a forma de aminas e compostos anelares) e a outra o nitrogênio contido no ar atmosférico [3]. Na Tabela 4 podemos ver a quantidade típica de nitrogênio que pode ser encontrada para destilados o petróleo em estado bruto e destilados leves e pesados:

Tabela 4 - Presença em peso de nitrogênio para petróleo bruto e destilados leves e pesados. [3]

Fraction	Average nitrogen, wt%	Range, wt%
Crude	0.65	-
Heavy distillates	1.40	0.60-2.15
Light distillates	0.07	0-0.60

Porém, mesmo em combustíveis onde o teor de nitrogênio é significante a maior parte da formação de óxidos de nitrogênio tem como fonte o nitrogênio advindo do ar atmosférico (a título de curiosidade as quantidades no diesel são maiores do que na gasolina, porém, em ambos os casos são negligenciáveis).

A formação de NO ocorre tanto na frente de chama quanto nos gases pós-queima. Porém devido à combustão ocorrer sob elevada pressão o que faz com que a zona onde ocorre a reação de formação da chama seja muito fina ($\sim 0.1\text{mm}$), fazendo com que o tempo de residência nesta região seja muito curto. Além disso, como a pressão aumenta durante a maior parte do processo de combustão a massa de gases pós-queima aumenta ainda mais de temperatura o que resulta na formação de NO ser dominante nos gases após a zona de chama, tornando possível desacoplar o processo de formação de NO do processo de combustão [3].

Quando consideramos a formação de NO_2 , utilizando o equilíbrio químico chegamos à conclusão de que a razão NO_2/NO é muito pequena, algo que se mostra verdadeiro para motores de ignição por centelha, porém no caso de motores de ignição por compressão as emissões de NO_2 podem ser responsáveis por cerca de 10 a 30 % das emissões de óxidos de nitrogênio segundo dados experimentais [3].

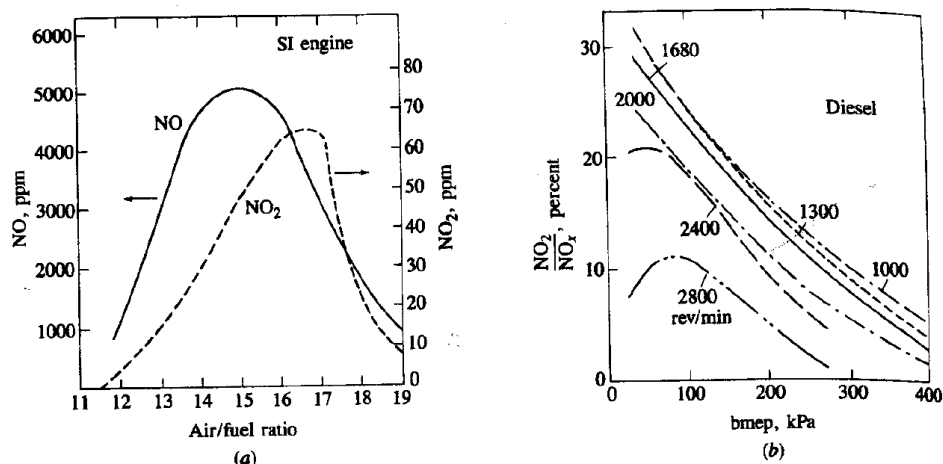


Figura 14 - Em (a) temos a concentração de NO e NO₂ para diferentes razões ar-combustível em um motor de ignição por centelha com aceleração no máximo. Em (b) temos a razão NO₂/NO em porcentagem para um motor de ignição por compressão utilizando diesel, com carga e rotação variável. [3]

Quando tratamos especificamente de motores de combustão por compressão a diferença crítica ocorre devido a injeção do combustível ser feita apenas pouco antes da combustão, resultando em uma distribuição não uniforme de composição e temperatura dos gases de queima. Durante a fase de combustão “*premixed*” logo após o atraso de ignição a mistura ar-combustível possui uma composição variada em torno do ponto estequiométrico e queima devido à ignição espontânea e propagação de chama. Já durante a fase posterior “*mixing controlled*”, a combustão encontra-se mais próxima do valor estequiométrico e a estrutura da chama é aquela de uma chama difusiva, turbulenta e não estacionária. Porém, após o processo de combustão a mistura dos gases de queima com partes ricas e pobres da mistura ar-combustível ocorre, alterando a composição dos gases com relação a quando foram queimados [3]. Além desta variação de composição, e consequentemente temperatura, outra variação de temperatura é causada pela variação de pressão durante o processo de compressão e expansão do pistão.

O período crítico para a formação de NO_x como já explicado ocorre quando a temperatura máxima é alcançada, algo que ocorre no espaço de tempo entre o início da combustão e pouco depois do ponto máximo de pressão no cilindro. A parte da mistura que queima durante o início do processo é especialmente importante uma vez que é comprimida até uma temperatura mais elevada, aumentando a formação de NO_x à medida que a combustão continua e a pressão se eleva. Após o ponto de pressão máxima a temperatura dos gases diminui uma vez que o pistão começa o processo de expansão no interior do cilindro. A queda de temperatura decorrente deste efeito além da queda provocada pela mistura de gases em alta temperatura com ar ou gases de queima resfriados traz um fim às condições de cinética química necessárias à formação do NO_x. Este efeito secundário ocorre apenas nos motores de ignição por compressão causando um resfriamento mais rápido dos gases em relação aos motores de ignição por centelha, ocorrendo muito menos decomposição do NO [3].

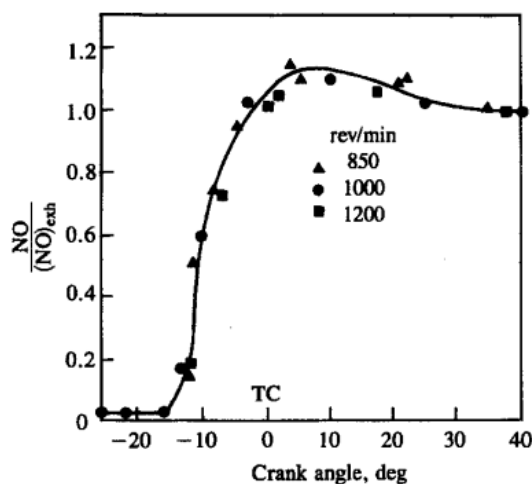


Figura 15 - Razão da concentração média de NO no cilindro com a variação do ângulo da árvore de comando de manivelas em relação a concentração de NO na exaustão. Motor diesel de injeção direta, razão de equivalência de 0.6 e início de injeção 27° antes do ponto morto superior. [3]

A concentração de NO aumenta a partir do valor residual no início da combustão até o ponto de máximo cerca 20° após o início da combustão onde a razão de equivalência dos gases de queima alterna de rica para pobre (também é o ponto onde temos a concentração máxima de CO₂). À medida que a razão de equivalência dos gases de queima se torna ainda mais pobre devido à mistura com o ar em excesso a concentração de NO diminui uma vez que a formação do mesmo se torna mais lenta com o aumento da diluição. Podemos ver ainda uma decomposição modesta do NO. A variação da velocidade de rotação do motor exerce pouca influência sobre a forma geral da curva e o período de 20° após o início da combustão se mostram como o período crítico para a formação [3].

Outros experimentos similares [3] com variação de carga e tempo de injeção mostraram que praticamente todo o NO é formado durante este período de 20° após o início da combustão. À medida que o tempo de injeção é atrasado, o processo de combustão se atrasa, a formação de NO começa a ocorrer mais tarde e as concentrações se tornam menores uma vez que a temperatura máxima alcançada também é menor. O efeito da mudança da razão de equivalência no experimento pode ser observado na figura a seguir:

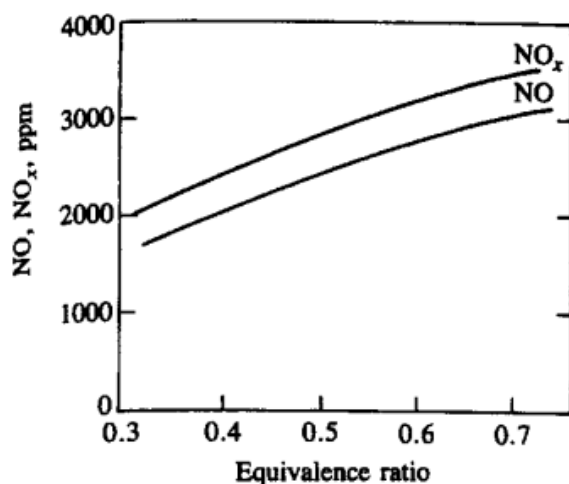


Figura 16 - Concentrações na exaustão de NO e NO_x com a variação da razão de equivalência ou carga, para um motor de ignição por compressão diesel com injeção direta. Velocidade de 100 rpm e tempo de injeção em 27° antes do ponto morto superior. [3]

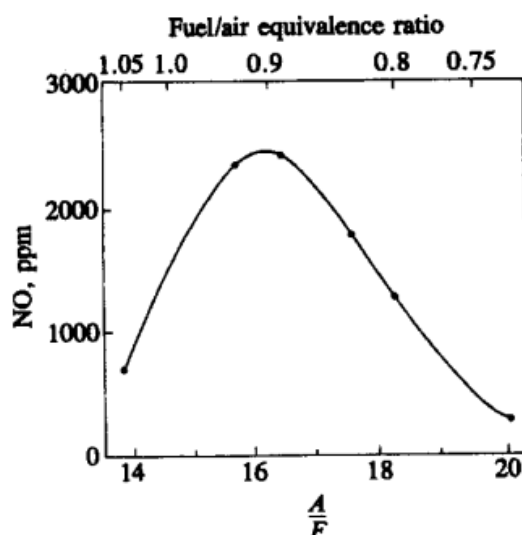


Figura 17 - Concentração de NO na exaustão com a variação da razão de equivalência em um motor de ignição por centelha. 1600, $\eta_v = 50\%$ rpm, MTB timing. [3]

Em cargas mais elevadas, com uma pressão máxima maior, e, portanto, temperaturas maiores, e uma maior quantidade de regiões próximas da razão estequiométrica o nível de NO aumenta. Foram medidos NO e NO_x [17], permitindo chegar a conclusão de que o NO₂ é responsável por cerca de 10 a 20% do total de NO_x. Apesar de os níveis de NO de uma forma geral diminuírem conforme a razão de equivalência é diminuída essa queda ocorre de uma forma muito mais suave do que em motores de combustão por centelha devido à distribuição não uniforme de combustível no caso de motores de ignição por compressão.

Estudos similares [18] foram realizados para motores de ignição por compressão com injeção indireta. Para estes casos foi percebido que a maior parte da formação de NO ocorre dentro da pré-câmara de combustão com a reação de formação terminando quando ocorre o transporte dos gases para a câmara principal, devido à mistura com o ar frio. Porém, a pré-câmara trabalha, a exceção de cargas leves, com uma mistura rica, então NO adicional ainda pode ser formado à medida

que os produtos de combustão são diluídos para uma composição estequiométrica. Abaixo podemos ver a concentração local de NO e a razão de equivalência como uma função do ângulo da árvore de comando de manivelas com a utilização de uma válvula de amostragem de rápida atuação em diferentes localizações no interior da pré-câmara de um motor de injeção indireta Comet com câmara de turbulência:

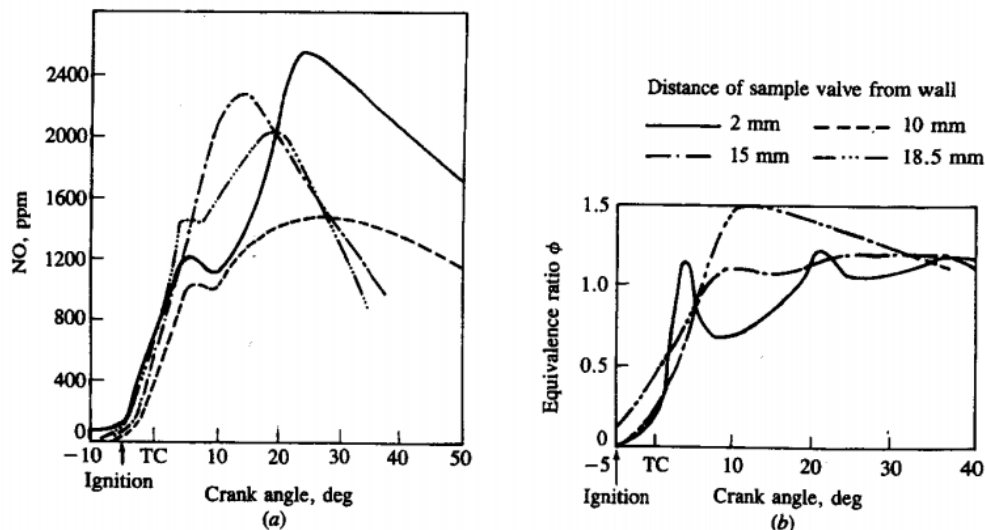


Figura 18 - Em (a) temos a concentração de NO utilizando uma válvula de rápida atuação para diferentes distâncias da parede do cilindro. Em (b) temos a razão de equivalência calculada em diferentes distâncias da parede em um motor de ignição por compressão com câmara de turbulência e injeção indireta em função do ângulo da árvore de comando de manivelas. 100 rpm, injeção de combustível 13° antes do ponto morto superior, ignição 5° antes do ponto morto superior. [3]

A mistura de gases torna-se rapidamente estequiométrica ou rica em combustível. Com a variação da distância até a parede do cilindro podemos ver que ocorre uma grande não uniformidade ao longo da pré-câmara. Os picos de concentração de NO ocorrem, como esperado, quando o ponto estequiométrico local é alcançado. Como a mistura permanece rica na pré-câmara durante o processo de expansão dos gases de queima (após o ponto onde temos o máximo de pressão, que ocorre entre 6 a 10° após o ponto morto superior) a decomposição de NO pode ocorrer de forma substancial. Porém neste instante a maior parte dos gases foi transferida para a câmara principal onde ocorre o congelamento do processo químico de formação do NO. Experimentos [19] utilizando técnica de *dumping* do gás do cilindro na câmara principal e pré-câmara confirmam isto. A concentração média de NO no cilindro é determinada através da abertura de um diafragma permitindo a análise do gás. A concentração aumenta rapidamente assim que a combustão se inicia até que a formação é efetivamente parada próxima dos 15° após o ponto morto superior, além disso, no fim a decomposição líquida de NO é pequena. Diagramas da taxa de liberação de calor deste mesmo motor podem ser obtidos a partir dos dados de pressão, indicando que apenas metade da combustão ocorreu até o ponto onde a formação de NO para.

A adição de diluentes ao ar de entrada, como, por exemplo, gases de exaustão, são medidas efetivas para diminuir a formação de NO e, portanto, sua emissão. Como no caso de motores de combustão por centelha o princípio de funcionamento desta técnica é o de diminuir a temperatura dos gases de queima para uma dada massa de combustível e ar queimados.

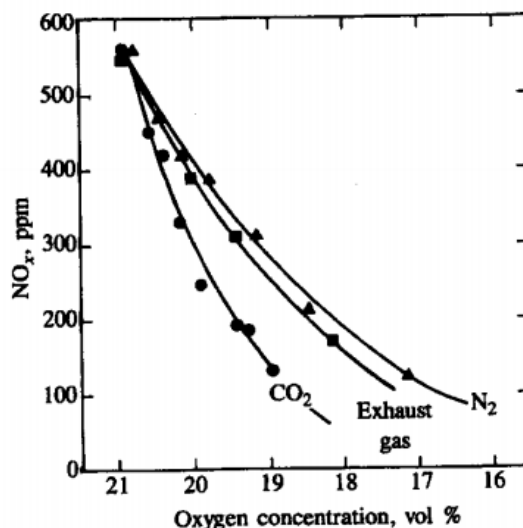


Figura 19 - Efeitos da redução de concentração de oxigênio para diferentes diluentes (gás de exaustão, CO₂, N₂) nas emissões de NO_x de um motor de injeção direta Diesel. Diâmetro = 140 mm, curso = 152 mm, $r_c = 14.3$. Velocidade 1300 rpm, vazão de combustível = 142 mm³/tempo motor, tempo de injeção 4° antes do ponto morto superior. [3]

Na Figura 19 acima podemos ver os efeitos da diluição do ar de admissão com N₂, CO₂ e gases de exaustão recirculados sobre a emissão final de NO_x. A capacidade térmica do CO₂, por mol, na faixa de temperatura relevante para o processo de combustão considerado é cerca de duas vezes maior do que aquela do N₂. Para os gases de exaustão a capacidade térmica é um pouco superior aquela do N₂. Os dados nos mostram então que o efeito de diminuição da temperatura dos gases de queima é obtido. É importante notar que em cargas baixas existe pouca presença de CO₂ e H₂O nos gases de exaustão, não ocorrendo grande variação com relação ao ar atmosférico. Mas quando estamos em cargas elevadas a concentração de CO₂ e H₂O nos gases de exaustão são mais elevadas, fazendo a capacidade térmica aumentar tornando os gases de exaustão mais efetivos no controle da temperatura, caso sejam recirculados. Por último a adição de oxigênio à entrada, como esperado, causa aumento na temperatura de chama e também das emissões de NO_x [20].

[21] mostraram que os efeitos das mudanças na composição do gás de admissão e sua temperatura podem ser correlacionados matematicamente à emissão de NO_x. Esta abordagem não será discutida aqui, mas o leitor poderá procurar mais informações na bibliografia citada.

2.3.2. Monóxido de Carbono (CO)

As emissões de monóxido de carbono em motores de combustão interna são controladas primariamente pela razão de equivalência/razão ar-combustível. O gráfico a baixo nos mostra a concentração volumétrica do monóxido de carbono para um motor de ignição por centelha com diferentes combustíveis. Para misturas ricas em combustível, as concentrações de CO na exaustão aumentam rapidamente à medida que a razão de equivalência aumenta, uma vez que a quantidade em excesso de combustível aumenta. Para misturas pobres, a concentração varia pouco com a razão de equivalência e é da ordem de 10⁻³ da fração molar.

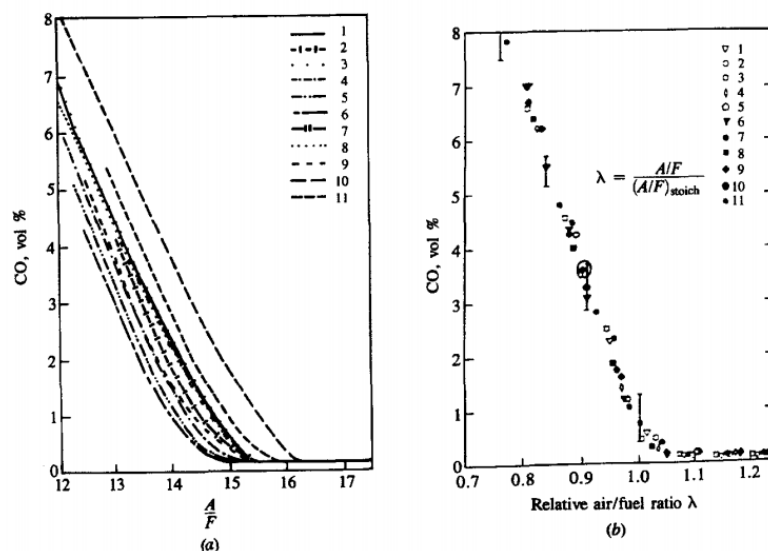


Figura 20 - Variação das emissões de CO com 11 amostras de combustíveis com diferentes razões de H/C em um motor de ignição por centelha. Em (a) temos a variação com relação à razão ar combustível. EM (b) temos a variação com relação à razão ar combustível relativa. [3]

Como motores de ignição por centelha trabalham quase sempre próximos à razão estequiométrica quando em carga parcial e com mistura rica em carga total, as emissões de monóxido de carbono são significantes e precisam ser controladas. Motores de ignição por compressão, porém, trabalham de forma geral com misturas pobres e as emissões são baixas o suficiente para não serem importantes.

2.3.3. Hidrocarbonetos Não-Queimados (HC)

Hidrocarbonetos não queimados, ou, mais apropriadamente emissões de compostos orgânicos são consequência de um processo de combustão incompleta. A sua medição é normalmente dada em partes por milhão (ppm) de átomos de carbono (C_1), algo proveniente da forma como o detector de chama ionizante (FID), o tipo de medidor mais comumente utilizado, trabalha. É importante entender que a concentração de emissões de hidrocarbonetos é importante na determinação de um processo de combustão eficiente ou não, porém não é tão significativa como um índice de poluição. Isto porque na exaustão são liberados diversos tipos de compostos orgânicos.

Tabela 5 - Percentual de Hidrocarbonetos não queimados divididos por tipo, em um motor de ignição por centelha funcionando com gasolina, com e sem a presença de catalisador. [3]

	Carbon, percent of total HC			
	Paraffins	Olefins	Acetylene	Aromatics
Without catalyst	33	27	8	32
With catalyst	57	15	2	26

A tabela acima mostra valores típicos para diferentes tipos de compostos. Alguns destes hidrocarbonetos são praticamente inertes fisiologicamente e são

virtualmente não-reativos do ponto de vista da *smog* fotoquímica. Outros, porém, são altamente reativos na presença da química produzida no processo de *smog*. De acordo com o potencial de oxidação apresentado pelo composto na química da *smog* fotoquímica os hidrocarbonetos são divididos em reativos e não reativos. A Tabela 6 a seguir indica o potencial de reatividade para diferentes compostos utilizados para estimar a reatividade geral de misturas de hidrocarbonetos na exaustão:

Tabela 6 - Reatividade de classes de hidrocarbonetos. [3]

Hydrocarbons	Relative reactivity†
C ₁ –C ₄ paraffins Acetylene Benzene	0
C ₄ and higher molecular weight paraffins Monoalkyl benzenes <i>Ortho</i> - and <i>para</i> -dialkyl benzenes Cyclic paraffins	2
Ethylene <i>Meta</i> -dialkyl benzenes Aldehydes	5
1-Olefins (except ethylene) Diolefins Tri- and tetraalkyl benzenes	10
Internally bonded olefins	30
Internally bonded olefins with substitution at the double bond Cycloolefins	100

† General Motors Reactivity Scale (0–100). Based on the NO₂ formation rate for the hydrocarbon relative to the NO₂ formation rate for 2,3-dimethyl-2-benzene.³⁴

Compostos oxigenados estão presentes na exaustão do motor e são conhecidos por tomar parte na formação de *smog* fotoquímica. Alguns desses compostos são também irritantes ao sistema respiratório humano e outros são odorizadores. Estes compostos oxigenados são geralmente classificados como carbonilos, fenóis e outros não carbonilos. Os carbonilos de nosso interesse são os aldeídos de peso molecular baixo e cetonas alifáticas. Os aldeídos voláteis são agentes que causam irritação nos sistemas oculares e do trato respiratório. Formaldeído é um dos principais compostos, respondendo por cerca de 20% do total de carbonilos. Em veículos de passageiros com motores de ignição por compressão os carbonilos são responsáveis por cerca de 10% das emissões de hidrocarbonetos não queimados, contando por poucos % em veículos de ignição por centelha. Fenóis são odorizadores e agentes irritantes, com níveis muito menores do que aqueles presentes nos aldeídos [3]. Outros compostos não-carbonilos incluem metanol, etanol, nitrometano e formato de metilo. O uso de combustíveis com base em álcool aumenta as emissões de compostos oxigenados nas emissões. Tanto níveis de metanol quanto aldeídos aumentam substancialmente com relação aos níveis apresentados por emissões de gasolina em motores de ignição por centelha funcionando com metanol.

Quando tratamos especificamente de motores de ignição por compressão o combustível utilizado possui ponto de evaporação maior e um peso molecular maior do que o da gasolina. Além disso, o efeito de pirólise ocorre sobre parte substancial dos compostos do spray de combustível durante o processo de combustão. Logo, a composição de compostos não queimados ou parcialmente oxidados em motores de ignição por compressão é muito mais complexa do que em motores de ignição por centelha e se estende por uma escala maior de tamanhos moleculares. As emissões gasosas de hidrocarbonetos nos motores de ignição por compressão é feita utilizando um filtro de particulado quente (próxima a 190°C [3]) e um detector de chama ionizante. Portanto, os constituintes variam de metano até o hidrocarboneto mais pesado que ainda permaneça na fase de vapor na linha aquecida (que também é mantida próxima a 190°C [3]).

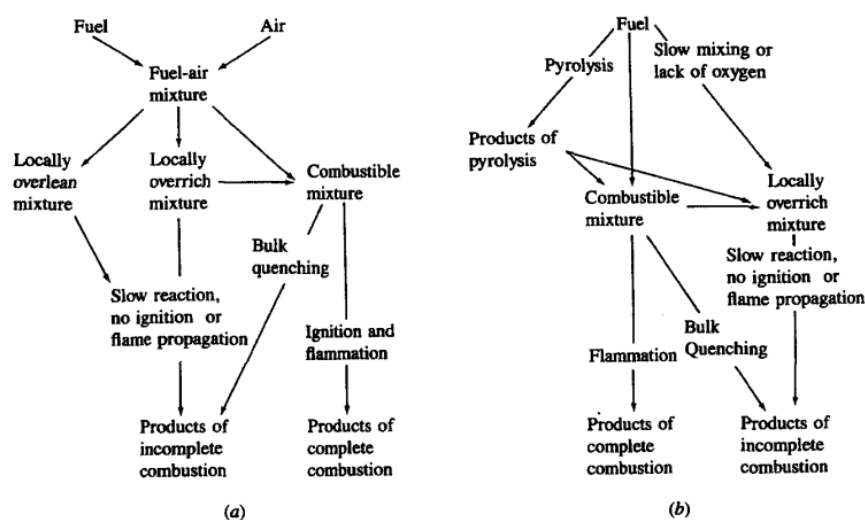


Figura 21 - Representação esquemática dos mecanismos de formação de hidrocarbonetos em motores de ignição por compressão. (a) para combustível injetado durante o período de atraso de ignição. (b) para combustível injetado enquanto a combustão ocorre. [3]

Durante todo o processo de combustão existem dois caminhos primários por onde o combustível pode escapar ao processo normal de queima. A mistura ar-combustível pode se tornar muito pobre para entrar em auto ignição ou para suportar a propagação da chama nas condições que prevalecem dentro da câmara de combustão, ou, durante o processo primário de combustão a mistura pode estar muito rica para entrar em ignição ou suportar a chama. O combustível então pode apenas ser consumido em reações de oxidações mais lentas, durante o processo de expansão após misturar com uma quantidade adicional de ar. Logo, os hidrocarbonetos permanecem sem serem consumidos, devido ao processo de mistura estar incompleto ou a extinção do processo de oxidação.

2.3.4. Dióxido de Enxofre

O dióxido de enxofre é um poluente comumente encontrado nas emissões de motores que funcionam com combustíveis de origem fóssil, isto porque o enxofre está presente em diferentes quantidades nos diversos destilados obtidos a partir do petróleo bruto. Como já foi dito estas emissões são controladas através da especificação do máximo de enxofre permitido nos combustíveis utilizados no país. O enxofre presente no combustível se transforma no dióxido de enxofre durante o

processo de combustão, o mesmo é oxidado pelo oxigênio presente na mistura, liberando uma pequena quantidade de energia no processo.

É interessante notar que o enxofre desempenha um papel importante no diesel mineral, uma vez que sua presença garante ao mesmo boa lubricidade, permitindo lubrificar o interior de válvulas, injetores, etc. Isto sempre foi um problema na redução do teor máximo de enxofre, uma vez que sua redução poderia causar problemas de desgaste acentuado nos motores atuais, diminuindo sua performance, aumentando emissões de outros poluentes, etc. A diminuição do enxofre no diesel mineral é, portanto, um desafio tanto do ponto de vista econômico quanto tecnológico. O uso de biocombustíveis como o biodiesel que possuem naturalmente boa lubricidade sem a presença de enxofre pode ser adotado como forma de reduzir tais emissões.

Os efeitos indesejados do dióxido de enxofre são bem conhecidos e o mesmo é um dos principais causadores da chuva ácida, pois ao atingir a atmosfera reage com a água e forma o ácido sulfúrico, afetando corpos d'água, solos, florestas e agricultura. Além disso, o mesmo pode causar desconforto, irritação e aumento da produção de muco nas vias respiratórias do trato aéreo superior, por ser absorvido pelas regiões mucosas desta parte do corpo, acarretando em piora generalizada da saúde da população, aumento de internações hospitalares e gastos com saúde pública.

2.3.5. Material Particulado

O estudo da emissão de material particulado é especialmente complexo nos motores de ignição por compressão, pelos mesmos motivos citados em outros casos (mistura do ar e combustível apenas pouco antes da combustão, ponto de ignição variável, etc.). No passado já foram realizados diversos estudos sobre a solubilidade das frações dos componentes, composição química e estrutura, técnicas de medição, distribuição do material dentro do cilindro, etc. Além disso, um estudo da formação, crescimento e oxidação da fuligem, parte importante do material particulado emitido, também deve ser realizado para a melhor compreensão deste tipo de poluente. Por fim também devem ser considerados processos de condensação e adsorção presentes nos motores. Por este motivo, visto que este não é um poluente analisado neste trabalho, será deixada a cargo do leitor interessado a leitura de estudos mais completos, como os disponíveis em [3].

2.4. Misturas Ternárias

Como o nome indica estas se tratam de misturas que possuem em sua composição três tipos diferentes de combustíveis, misturados de forma homogênea de forma a compor uma nova formulação, que procura unir os benefícios de cada componente. Em nosso caso os combustíveis utilizados como base são o etanol anidro, o biodiesel e o diesel comercial.

Através dos trabalhos de [10] e LAPUERTA [22] foi possível determinar um limite para a mistura entre o diesel e o etanol em uma mistura binária. A composição não podia ultrapassar os 3% de etanol, uma vez que ocorria a separação de fases e a característica de uma mistura homogênea era perdida. Isto ocorria devido ao caráter polar do álcool frente ao caráter apolar do diesel comercial. O aumento de temperatura permite maiores concentrações mas não se mostra como algo prático, além disso, devido a sua alta instabilidade, seria problemático manter o armazenamento deste combustível de forma estável por longos períodos de tempo, podendo ainda causar danos ao motor.

Com isso foram pensadas em formas de resolver a questão da solubilidade do etanol no diesel, e foi tentado o uso de certos aditivos tenso ativos que permitiriam aumentar o teor de etanol da mistura. Alguns desses aditivos possuem patentes atreladas ao seu uso, enquanto outros tornam possível a utilização livre. O uso de emulsificadores e elevadores do número de cetano permitiam até 5% da adição de etanol, com valores de 8% sendo teoricamente possíveis. Apesar de valores acima destes serem considerados muito elevados, segundo ABU-QUDAIS, HADDAD e QUDAISAT [23] o melhor compromisso em termos de redução de emissões se encontraria próximo a 15% de etanol. O uso do biodiesel então se torna uma ideia interessante, pensando em sua utilização como aditivo que permita concentrações superiores de etanol na mistura devido a sua molécula possuir partes polares e apolares e aproveitando ainda alguns dos benefícios que o biodiesel pode trazer, logo é esperado das misturas os seguintes benefícios indicados por LOBIANCO [8]:

- Redução da emissão dos principais poluentes em motores de ignição por compressão (óxidos de nitrogênio, material particulado, monóxido de carbono, etc.), como foi observado por KOIKE [24]:

- Apesar do momento atual de baixos preços do barril, é esperado um aumento médio até 2035, de acordo com [25], e o uso de etanol e biodiesel contribui para a redução dos custos associados a importação do diesel mineral.

- Apelo ambiental quanto ao aspecto da busca por menor dependência de fontes agressivas ao ambiente e não-renováveis

2.5. Otimização de Misturas

Realizando a revisão bibliográfica sobre o que já foi feito em termos de uso de processos de otimização para determinação de amostras de combustível ternárias de diesel etanol e biodiesel foram encontrados dois trabalhos publicados que se aproximavam da temática aqui abordada. O trabalho realizado por [26] trata de um modelo de otimização não linear desenvolvido para avaliar o lucro possível e indicar políticas de adoção para o governo ao se considerar custos de produção, demanda de mercado, preço dos combustíveis, enquanto se consideravam diversos critérios como viscosidade cinemática, massa específica, número de cetano, etc.

O trabalho apresentado por [27] utiliza uma metodologia de otimização baseada em superfícies de resposta para otimizar o desempenho de um motor e suas características de emissão na exaustão ao utilizar misturas de diesel, n-butanol e óleo de algodão. Foram utilizados dados experimentais de 7 concentrações diferentes tomados em situação de carga máxima e velocidade constante (2200 rpm) Os resultados retirados do modelo de otimização foram então testados para verificação em novos ensaios, que mostraram grande concordância com os dados estimados. A concentração ótima encontrada foi de 65,5% de diesel, 23,1% de n-butanol e 11,4% de óleo de algodão.

2.6. Interpoladores

2.6.1. Noções básicas

Para alcançar nosso objetivo final do trabalho nos necessitamos de realizar o processo de otimização da mistura e posteriormente ensaiá-la. Porém, temos um problema à nossa frente, o ensaio de misturas de combustível é dispendioso e, portanto, temos apenas os valores para 13 pontos distribuídos ao longo do nosso

domínio. Logo, é necessário de alguma forma estimar o valor das características que nos interessam (como emissão de NO_x, por exemplo) em outros locais do domínio para que o otimizador possa ser alimentado.

Pensando nisso foi decidido a utilização da técnica de interpolação multidimensional por *RBF* (função de base radial / *radial basis function*).

Segundo [28] quando falamos de uma forma geral sobre interpoladores existem algumas características em comum, que estarão presentes independente do método de interpolação adotado, em especial:

- Se a localização dos pontos é razoavelmente densa e bem distribuída ao longo da área de interesse, o resultado obtido pela interpolação será satisfatório, independente do método utilizado.

- Se os pontos se encontram concentrados em poucos clusters com grandes distâncias entre si, serão obtidos resultados pouco confiáveis, independente do método utilizado.

- Quase a totalidade dos métodos de interpolação irá subestimar máximos e superestimar os mínimos. Isto é algo inerente do processo de mediação feito pelos métodos e caso o método não o realizasse não o consideraríamos razoável.

2.6.2. *Radial Basis Function*

Este método de interpolação tem origem no trabalho de [29] com o estudo de funções de interpolação baseada em funções de base radial. Posteriormente ele foi estendido por [30] e utilizado para a resolução de sistemas de equações diferenciais parciais. Este método conhecido como método assimétrico foi então complementado pelo trabalho de [31], gerando o método simétrico(ou método de Hermite).

Esta técnica possui uma velocidade de construção de modelo muito boa e demonstra uma grande escalabilidade com o aumento de dimensões como foi mostrado por [32], sendo utilizada então como interpolador para métodos de otimização multidimensional. Além disso, hoje em dia esta técnica já se encontra bem estabelecida, e seu uso em problemas de engenharia mecânica pode ser facilmente percebido [33].

Quanto a sua natureza, as funções de base radial podem ser globais (multiquádricas, *thinplate splines*, etc.) ou locais(família Wendland, etc.) [32]. Neste trabalho abordaremos apenas aquelas de natureza global.

O princípio de funcionamento deste método de interpolação consiste no processo do cálculo de uma matriz de coeficientes Φ_{ij} , a serem obtidos a partir de uma série de pontos de treino. Aqui os pontos de treino devem ser entendidos como os pontos do domínio para onde conhecemos o valor da nossa função $f(x)$, referida como função objetivo a partir de agora. A partir destes pontos dados é montando um sistema de equações lineares, onde a matriz de coeficientes multiplica um vetor de coeficientes α_j , obtendo como resultado a função objetivo. Sendo assim, partindo de N pontos de treino para o método, a função de interpolação gerada $s(x)$ pode ser representada da seguinte forma:

$$f(x) \approx s(x) = \sum_{j=1}^N \alpha_j \Phi ||x - x_j|| \quad (1)$$

A escolha de Φ determina aspectos como a suavidade da função de interpolação encontrada, característica também controlável pelo parâmetro de forma c em certos casos. Os termos da matriz são então calculados para cada tipo de função de base radial, conforme apresentado nas equações (2)-(8):

A escolha de uma métrica de distância Φ determina aspectos como suavidade da função de interpolação encontrada. Esta característica também pode ser controlada através do uso de um parâmetro de forma c , para determinados casos. Nas equações (2)-(8), que seguem podemos ver a forma da métrica Φ para diversos casos. A partir de uma definição de métrica de distância podemos então calcular os termos da matriz de coeficientes, possibilitando então resolver o sistema de equações e obter o valor dos termos do vetor de α_j .

$$\textbf{Multiquadrics: } \Phi(|x_i - x_j|) = \sqrt[2]{(x_i - x_j)^2 + c^2} \quad (2)$$

$$\textbf{Inverse Multiquadrics: } \Phi(|x_i - x_j|) = \frac{1}{\sqrt[2]{(x_i - x_j)^2 + c^2}} \quad (3)$$

$$\textbf{Linear: } \Phi(|x_i - x_j|) = ||x_i - x_j|| \quad (4)$$

$$\textbf{Cubic: } \Phi(|x_i - x_j|) = ||x_i - x_j||^3 \quad (5)$$

$$\textbf{Quintic: } \Phi(|x_i - x_j|) = ||x_i - x_j||^5 \quad (6)$$

$$\textbf{Gaussian: } \Phi(|x_i - x_j|) = e^{-(c^2||x_i - x_j||)} \quad (7)$$

$$\textbf{Thin Plate Spline: } \Phi(|x_i - x_j|) = ||x_i - x_j||^2 \ln(||x_i - x_j||) \quad (8)$$

Assim que o sistema é resolvido por uma das técnicas disponíveis (eliminação Gaussiana, decomposição LU, etc.) é possível então obter um valor aproximado da nossa função objetivo $f(x)$, calculando para os pontos objetivo o valor da matriz de coeficientes e então realizando a multiplicação dessa nova matriz pelo vetor de α_j ,..

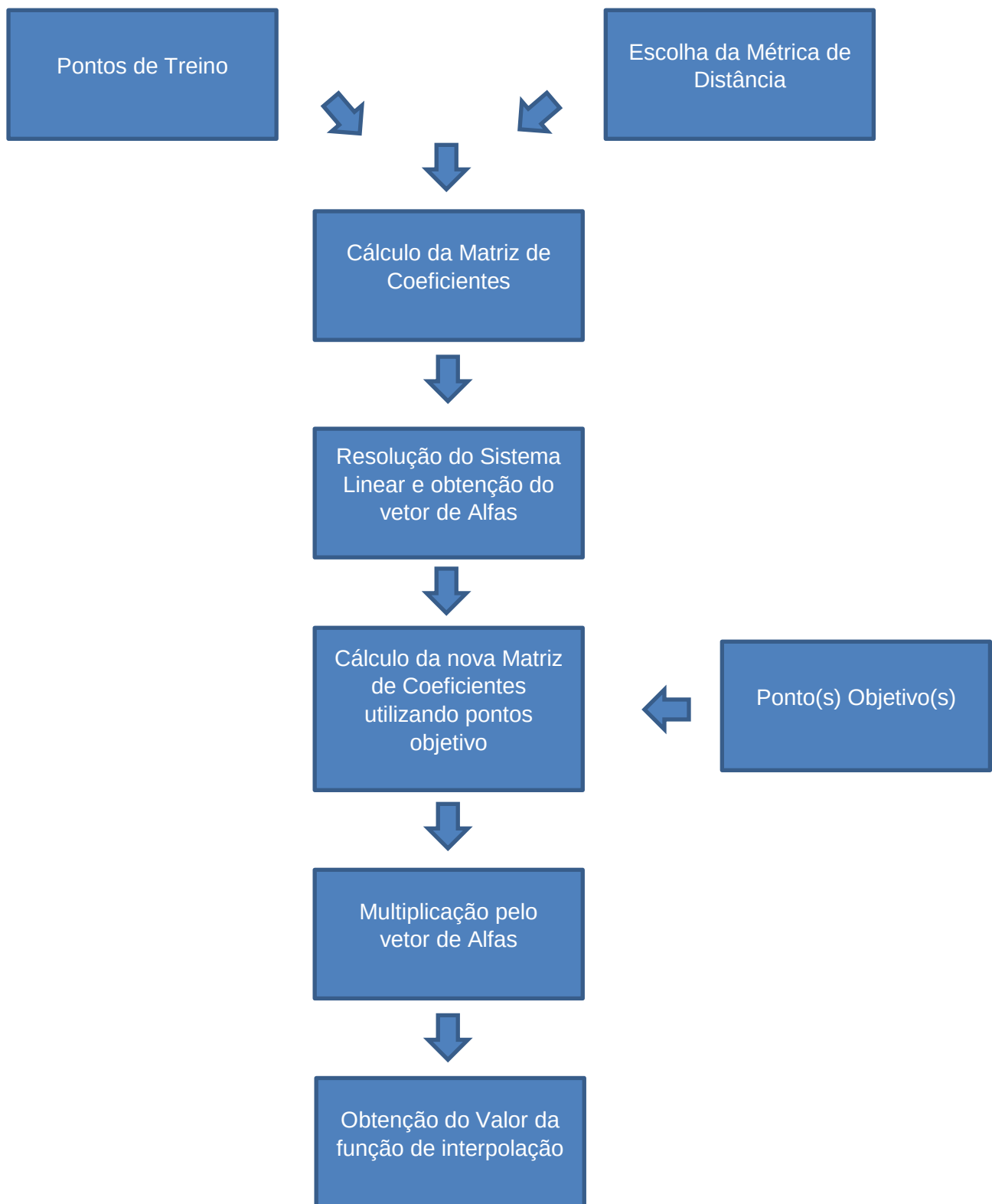


Figura 22 - Esquema representativo da interpolação utilizando o método de *RBF*'s.

2.7. Otimização

Uma das questões mais comuns em problemas de engenharia é a necessidade de otimizar algum processo ou operação com um certo objetivo. Porém, primeiramente

precisamos entender o que aqui tratamos como otimização. Essencialmente aqui nos referimos à otimização como o processo de minimizar uma certa função objetivo que nos interessa. Podemos, por exemplo, minimizar a temperatura de uma peça ou componente, através da alteração de sua geometria ou minimizar o tempo despendido no processo de fabricação de uma peça alterando parâmetros de operação, entre outros.

Dito isto, o campo de otimização, apesar de em constante evolução, já possui uma série de métodos bem estabelecidos e comumente utilizados. Dentre estes diversos métodos podemos traçar uma divisão entre aqueles chamados de métodos determinísticos e aqueles chamados de evolutivos/estocásticos. No primeiro caso a maior parte dos métodos se fundamenta em um processo iterativo, onde após certo número de iterações é esperado que o método obtenha o mínimo esperado e convirja. Este tipo de método costuma depender da determinação de uma direção para onde o algoritmo deve evoluir e tem um apelo matemático mais forte, se baseando no conceito de gradiente da função objetivo, entre outros. Os métodos mais comuns deste grupo são os seguintes: Método do Gradiente, Método do Gradiente Conjugado, Método de Newton-Raphson e Método de Quasi-Newton (David Fletcher-Powell, Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno). Por outro lado o grupo estocástico não costuma possuir forte base matemática e não utilizam o conceito de gradiente da função objetivo. Tais métodos vão basear seu funcionamento no uso de conceitos da natureza, mimetizando certos processos e buscando o mínimo desta forma. Neste grupo podemos encontrar os seguintes métodos, dentre outros: Algoritmos Genéticos, Evolução Diferencial, Enxame de Partículas, Arrefecimento Simulado, etc. Ainda é possível a criação de técnicas híbridas que combinam as vantagens de ambos os métodos. Este tipo de hibridização normalmente inicia seu processo com o uso de um método evolutivo, reduzindo a área de busca e então trocando para um método determinístico para encontrar o valor final.

Neste trabalho foi escolhida a utilização do método conhecido como Enxame de Partículas (*Particle Swarm*). Este método evolutivo foi concebido pelo engenheiro eletricista Russel Eberhart e pelo psicólogo James Kennedy em 1995 [34] como uma alternativa ao método de algoritmo genético (*Genetic Algorithm Method*). Ele se baseia no comportamento de algumas espécies (originalmente da observação de pássaros à procura de locais para ninhos) na natureza e a relação do indivíduo com o meio social no seu entorno. Se aumentarmos a individualidade de um membro o mesmo poderá procurar por uma quantidade maior de locais, porém isto pode fazer com que o processo de convergência seja mais complicado, uma vez que os indivíduos compartilham pouco conhecimento entre si. Caso o aspecto social seja muito elevado a convergência será alcançada rapidamente, mas isto fará com que a solução tenha maior chance de ser apenas um mínimo local da função objetivo.

O processo iterativo é dado pela seguinte equação:

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (9)$$

$$v_i^{k+1} = \alpha v_i^k + \beta r_{1i}(p_i - x_i^k) + \beta r_{2i}(p_g - x_i^k) \quad (10)$$

onde,

$\mathbf{x}_i$ é o i-ésimo vetor de parâmetros individual.

$\mathbf{v}_i = 0$ para $k=0$

$\mathbf{r}_{1i}$ e $\mathbf{r}_{2i}$ são vetores aleatórios com distribuição uniforme entre 0 e 1 e com mesmo tamanho que o vetor $\mathbf{x}_i$.

$\mathbf{p}_i$ é o melhor valor encontrado para o vetor individual $\mathbf{x}_i$

$\mathbf{p}_g$ é o melhor valor encontrado em toda a população

$0 < \alpha < 1$; $1 < \beta < 2$

Na equação acima o segundo termo no lado direito representa o termo de individualidade enquanto o terceiro termo a sociabilidade. O primeiro termo representa a inércia das partículas e, em geral, deve ser diminuído à medida que o processo iterativo evolui. Como dito o termo $\mathbf{p}_i$ representa o melhor valor já encontrado para o i-ésimo vetor de parâmetros $\mathbf{x}_i$ durante o processo. Portanto, o termo individualidade compara o valor atual de $\mathbf{x}_i$ com o seu melhor valor histórico. De forma análoga o vetor $\mathbf{p}_g$ é o melhor valor encontrado em toda a população historicamente e no termo de sociabilidade é comparado frente ao valor atual de $\mathbf{x}_i$. Abaixo na Figura 23 podemos ver um fluxograma do processo iterativo do método

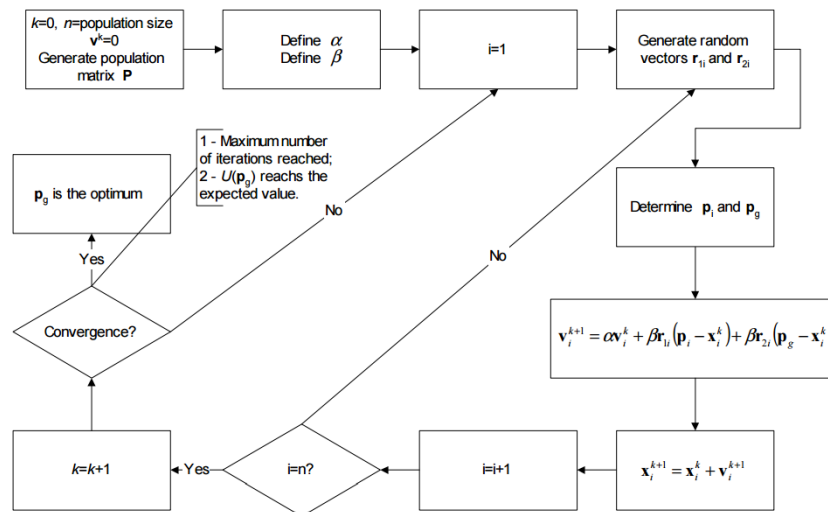


Figura 23 - Processo iterativo para o método de Enxame de Partículas. [35]

3. Metodologia Experimental

3.1. Aparato Experimental

3.1.1. Motor CFR Waukesha

O motor de ignição por compressão que será utilizado neste trabalho é o motor ASTM Cetano CFR (Cooperative Fuel Research Engine) fabricado pela empresa Waukesha Motor Co. Este motor é fabricado de acordo com as especificações presentes na norma da ASTM D-613 e tem por objetivo a determinação do número de cetano de amostras de combustíveis utilizadas em motores de ignição por compressão. Por este motivo o motor possui diversos parâmetros ajustáveis que normalmente não seriam encontrados em motores comerciais convencionais, como por exemplo a possibilidade de alterar durante o seu funcionamento a razão de compressão. Na Figura 24 podemos ver o motor utilizado que se encontra instalado nas dependências do Laboratório de Máquinas Térmicas da UFRJ:



Figura 24 - Bancada de Ensaio CFR Cetano

Trata-se de um motor monocilíndrico, quatro tempos, injeção indireta de combustível feita através de um bico injetor conectado a uma bomba de alta pressão da fabricante Bosch. O motor funciona de forma síncrona a um motor elétrico, conectado ao mesmo por meio de uma correia ligada a duas polias. O motor elétrico serve como motor de partida e também é responsável por regular a velocidade do motor de combustão interna em 900 rpm independente da condição de funcionamento e combustível utilizado, atuando hora como freio, hora como um auxílio. Sua fabricação segue as especificações da norma ASTM D-613, e devido a seguir esses padrões estabelecidos por uma organização dos EUA utiliza como unidade de medição muitas vezes unidades fora do sistema internacional, como o grau Fahrenheit. Na Tabela 7 temos algumas de suas dimensões básicas, como diâmetro do cilindro, e curso do pistão, é interessante notar que devido a sua natureza, e como já foi previamente dito, a razão de compressão possui uma faixa e não um valor fixo.

Tabela 7 - Especificação do motor CFR Cetano.

ITEM	DESCRIÇÃO
Diâmetro do Cilindro	82,55 mm
Curso do Pistão	114,30 mm
Volume Deslocado	611,7 cm ³
Razão de Compressão	8:1 a 36:1

3.1.2. Analisador de Gases TESTO 350XL

Para realizar as medições de emissões de poluentes foi utilizado um analisador de gases portátil da fabricante TESTO, modelo 350XL, visto na Figura 25. O analisador possui um *probe* de entrada que pode ser conectado à tubulação que se deseja medir as emissões, como podemos ver na Figura 26. O analisador possui diversos sensores com diferentes princípios de funcionamento, como eletroquímicos, análise de infravermelho, etc., na Figura 27 podem ser vistos os sensores de SO₂ e O₂ que foram trocados antes da realização dos experimentos deste trabalho. O equipamento tem capacidade de detectar quantidades de NO_x, CO, CO₂, O₂ e SO₂ sendo possível ver sua especificação completa na seção 9.2.



Figura 25 - Analisador de Gases Testo 350 XL.

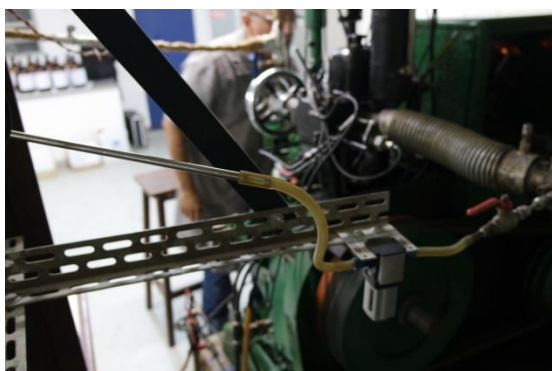


Figura 26 - *Probe* do analisador, conectado a uma derivação da exaustão do motor.



Figura 27 - Sensores de SO₂ (verde) e O₂ (branco).

3.2. Planejamento Experimental

3.2.1. Ensaio de Número de Cetano

Como já foi explicado o ensaio para determinação do número de cetano é estabelecido pela norma ASTM D-613, segundo esta norma o ensaio deve ser realizado de forma que as seguintes especificações sejam alcançadas.

3.2.1.1. Rotação do Motor

Controlada pelo motor elétrico acoplado ao motor de ensaio, deve permanecer em 900 ± 9 rpm.

3.2.1.2. Temperatura do Ar de Admissão

Dada em graus Fahrenheit a temperatura do ar de admissão pode ser controlada através de uma resistência elétrica que troca calor com o ar admitido durante a parte inicial do duto de admissão, um sistema automático é responsável por ligar e desligar a resistência de forma a manter a temperatura no alvo desejado. Durante a realização dos experimentos ocorreram casos onde o controle da temperatura não era realizado corretamente cabendo aos operadores a tarefa de ligar e desligar a resistência manualmente. Pela norma a temperatura do ar de admissão deve ser mantida em 150 ± 1 °F.

3.2.1.3. Temperatura do Bico Injetor

Por especificação da norma sua temperatura deve ser mantida a 100 ± 3 °F, uma vez que essa é a especificação atribuída à água responsável por refrigerá-lo. O controle do fluxo de água para alcançar tal temperatura é realizado através do acionamento de uma válvula.

3.2.1.4. Temperatura do Óleo Lubrificante

Apesar de não possuir controle de temperatura e nem valor especificado é um importante parâmetro de operação, já que fornece uma ideia das condições de aquecimento do motor conforme sua operação contínua. Valores típicos encontram-se na faixa de 110 a 150 °F.

3.2.1.5. Tempo de consumo

Por especificação o consumo volumétrico de combustível deve ser igual a 13 ml a cada 60 ± 1 s., ou seja, 13 ml/min. A variação da quantidade de combustível consumida pelo motor é feita através do uso de uma cremalheira que esta conectada a bomba de combustível do motor.

3.2.1.6. Posição da Cremalheira

Com o uso de uma válvula seletora parte do combustível é direcionado da cuba que se encontra alimentando o motor para uma proveta transparente, onde é possível medir o consumo de combustível para cada 1ml. Modificando a posição da válvula seletora para neutro o combustível passa a ser consumido apenas da proveta transparente, possibilitando a medição do tempo de consumo acima descrito com o uso de um cronômetro.

Quando se torna necessário alterar o volume de combustível injetado no motor para se adequar a norma basta operar a cremalheira que se encontra conectada ao movimento rotativo do pistão da bomba injetora. Na Figura 28 é possível visualizar a influência da cremalheira sobre a hélice da bomba injetora, em situações de débito nulo parcial, ou total.

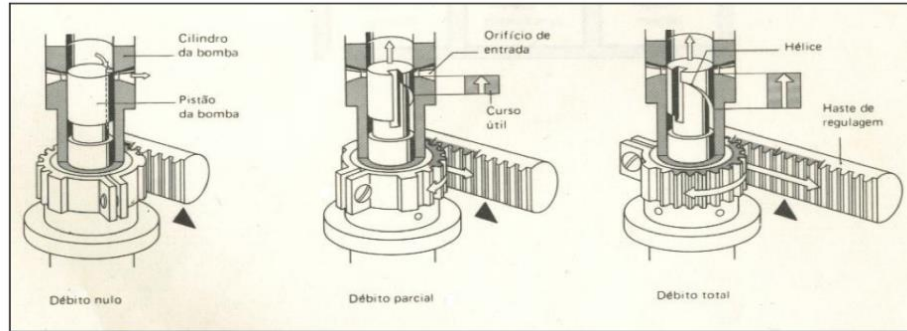


Figura 28 - Ilustração da cremalheira atuando sobre o controle de débito de combustível. [36]

3.2.1.7. Posição do Avanço da Injeção

O avanço de injeção é medido utilizando um sensor de posição instalado no volante do motor, que em conjunto com outro sensor instalado no bico injetor determina o instante onde ocorre a injeção de combustível com relação ao ponto morto superior. O avanço pode ser alterado através do acionamento de um micrômetro que controla a deflexão da bomba injetora. Segundo a norma o avanço de injeção deve ser de 13° antes do ponto morto superior, uma ilustração do mecanismo de acionamento pode ser visto na Figura 29.

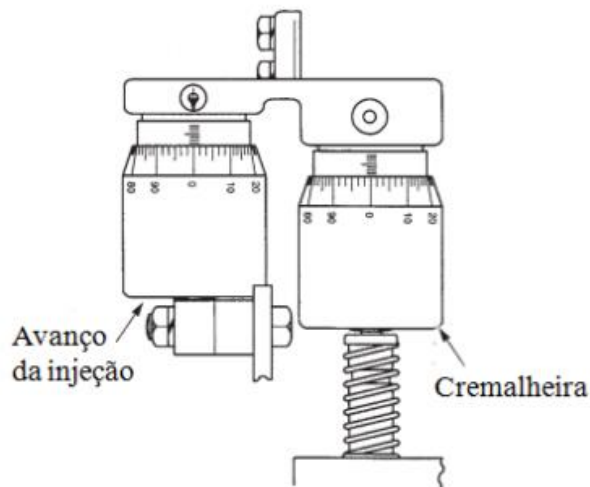


Figura 29 - Micrômetro de controle do avanço de injeção. [37]

3.2.1.8. Posição do Volante

Esta regulação é responsável por alterar a razão de compressão do motor durante seu funcionamento. Através deste mecanismo é possível alterar o atraso de ignição que é medido, uma vez que uma maior compressão facilita que o processo de combustão ocorra, diminuindo o atraso de ignição. Uma ilustração do mecanismo do volante pode ser vista na Figura 30.

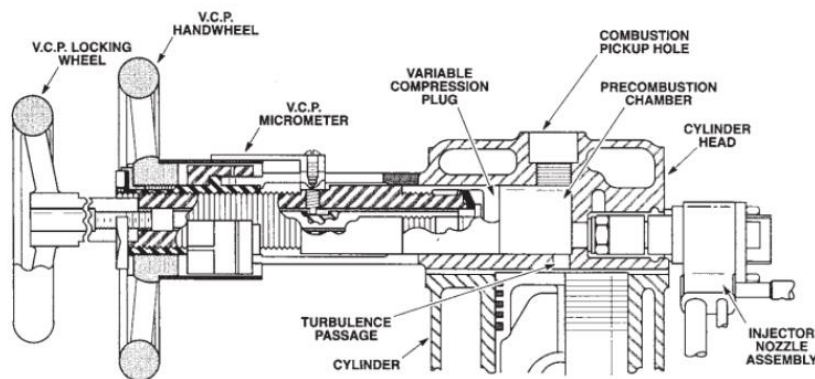


Figura 30 - Vista em corte do mecanismo de alteração da razão de compressão. [37]

Caso seja necessário é possível obter a razão de compressão empregada durante o ensaio utilizando uma pequena normalização especificada na equação abaixo e comparando o resultado com a Tabela 8 fornecida pelo fabricante do motor e que acompanha sua documentação.

$$\text{razão de compressão} = \frac{18 + \text{posição do volante}}{\text{posição do volante}} \quad (11)$$

Tabela 8 - Razão de compressão em função da posição do volante.(LMT/UFRJ)

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
	COMPRESSION RATIO										
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

3.2.1.9. Atraso de Ignição

Como já explicado é um parâmetro de extrema importância para determinação da qualidade de um combustível e por esta razão possui valor fixado para a determinação do número de cetano, devendo permanecer igual a 13° durante o ensaio. Na Figura 31 podemos ver os mostradores digitais que indicam os valores do avanço de ignição e do atraso de ignição.



Figura 31 - Leitores digitais para o avanço de injeção e atraso de ignição.

3.2.2. Ensaio de Emissões

Como foi percebido por [8], é necessário escolher uma configuração fixa de motor para realizar os testes de emissões de poluentes, isto porque caso assumíssemos as configurações presentes durante o ensaio de cetano de cada amostra estaríamos na verdade testando motores completamente diferentes. Dito isto, foi adotado como configuração geral aquela presente no ensaio de cetano da amostra comercial, ou seja, do diesel B7.

Como os ensaios ocupam grande quantidade de tempo não foi possível realizar os ensaios de emissão no mesmo dia que os ensaios de número de cetano, portanto o ensaio de cetano do diesel B7 foi repetido logo antes dos ensaios de emissões de poluentes e as configurações do motor não foram alteradas após este momento.

Apesar de como dito anteriormente o analisador ser capaz de medir SO_2 , CO , CO_2 , NO_x e O_2 foram detectados problemas nos sensores de O_2 e de SO_2 . Para a célula de medição de O_2 o aparelho acusou um sensor já completamente utilizado, requerendo a troca do mesmo, o sensor de SO_2 não recebeu nenhum alerta, porém ao fazer testes iniciais utilizando o diesel B7 comercial que possui até 10ppm de SO_2 as leituras permaneciam em zero de forma contínua. Foi realizada a troca de ambos os sensores por sensores novos, mas o problema persistiu, devido a isto as leituras de O_2 , SO_2 não puderam ser realizadas, além disso, as leituras de CO_2 se limitaram ao CO_2 indicado, denotado por CO_{2i} a partir deste momento. Como o enxofre não está presente nos combustíveis misturados ao diesel comercial seria esperado uma redução em sua emissão. As leituras foram realizadas após espera de cerca de 4 minutos para estabilização dos valores no analisador de gases.

3.2.3. Definição e Preparação das Amostras

Os ensaios de determinação de número de cetano e emissões, como já foi dito anteriormente, exigem um tempo grande e atenção constante da máquina pelos operadores. Por este motivo a quantidade de amostras que poderiam ser ensaiadas em tempo hábil foi limitada. Escolheu-se por seguir a mesma divisão utilizada por [8]

em seu trabalho. Em termos de nomenclatura é bastante comum o uso da letra **B** seguido de um número de 0 a 100 como forma de especificar o teor percentual em volume de biodiesel que um combustível contém, por exemplo, o diesel B7 possui 7% em volume, o diesel B20, 20%, e assim por diante. Como no trabalho presente há também a utilização de etanol na mistura é interessante manter uma nomenclatura similar, onde o teor de etanol de uma mistura, quando existe, pode ser especificado pela letra E seguido do percentual em volume. Portanto, a partir de agora as amostras podem ser identificadas facilmente através da simbologia **B α E γ** , onde o termo **α** indica o percentual em volume de biodiesel e o termo **γ** o percentual de etanol.

Como a proposta de uso do biodiesel se sustenta sob a ótica de emulsificador da mistura, além de possível elevador do número de cetano, exercendo papel secundário o foco será primariamente para a quantidade de etanol que desejamos inserir nas misturas. Como foi visto anteriormente na seção 2.4 foram realizadas misturas de até 5% em volume de etanol, com máximo teórico de 8%. Além disso, foi proposto que um teor de 15% seria o valor com maior compromisso em termos de redução de emissões de poluentes. Considerando estes resultados é adotada então uma variação para cada família de amostras de 5, 8 e 15% de etanol. As exceções se encontram nos ensaios realizados para as amostras sem a presença de etanol, o diesel comercial B7 puro e o biodiesel B100 puro.

Para determinação do teor de biodiesel é levado em conta primeiramente o teor inicial do diesel comercial, fixado atualmente em 7%. Outro valor de grande interesse é o percentual de 20%, amplamente utilizado e citado em diversos trabalhos por oferecer um ponto ótimo considerando-se compatibilidade de motores, materiais, desempenho em tempo frio e emissões de poluente [38]. Para avaliar melhor a evolução com o aumento do percentual de biodiesel é também adotado o percentual de 10%. Finalmente procurando-se utilizar um valor mais elevado de biodiesel, onde o mesmo responde-se pela maior parte da amostra foi adotado o valor de 60%.

Apesar de partir do mesmo ponto do trabalho de [8] algumas alterações foram realizadas considerando seus resultados e a situação atual do cenário de combustíveis no país. Primeiramente o diesel comercial atualmente contém não 5 mas 7% de percentual de biodiesel em volume. Devido a isto as amostras B5 não podem ser ensaiadas sendo, portanto, substituídas por equivalentes com B7. Além disso, a amostra com a menor quantidade de biodiesel e maior quantidade de etanol possível se mostrou instável em seu trabalho, ocorrendo separação de fases e tornando o ensaio não realizável para a mesma, levando isto em consideração a amostra equivalente B7E15 não foi preparada, algo que se mostrará como uma decisão acertada ao avaliarmos a preparação das amostras mais a frente. Por fim dados os valores escolhidos para percentuais de etanol e biodiesel, temos na Tabela 9 a seguir as amostras que foram preparadas para os ensaios. Os dados em volume necessários para a criação de cada uma das amostras para um volume total de 3 litros podem ser visualizados na seção 9.3.

Tabela 9 - Amostras de combustível a serem ensaiadas.

B7	B10R5	B20R5	B60R5	B100
B7E5	B10E8	B20E8	B60E8	
B7E8	B10E15	B20E15	B60E15	

Avançando agora para a preparação efetiva das amostras a primeira preocupação é a obtenção de cada um dos componentes necessários a sua

preparação. O diesel comercial B7 foi obtido em um posto de gasolina urbano e o etanol utilizado fazia parte do estoque de etanol utilizado no Laboratório de Máquinas Térmicas da UFRJ.



Figura 32 - Bombonas contendo o diesel e biodiesel utilizados na preparação das amostras.

A obtenção do biodiesel, porém, é mais complicada uma vez que sua venda não é feita diretamente ao público final. A primeira solução adotada foi a fabricação da quantidade necessária de biodiesel utilizando as instalações do Laboratório de Biodiesel do IVIG/UFRJ. O biodiesel seria fabricado partindo de óleo de soja refinado, encontrado em qualquer mercado comum, uma vez que a soja responde pela maior parte do biodiesel utilizado hoje em dia no país. Mas, ao finalmente ser realizado todo o processo de fabricação e posterior preparação das amostras foi constatado que o número de cetano do biodiesel de soja encontrava-se extremamente baixo, encontrando-se ainda menor do que o diesel comercial, algo surpreendente visto que o mesmo após ensaio realizado no laboratório COPPEComb/UFRJ encontrava-se dentro de todas as especificações a menos do teor de água (pode ser verificado na seção 9.4). Por este motivo seu uso não poderia ser adotado para o trabalho em questão e foi realizada a busca por uma nova alternativa. Decidiu-se então por utilizar parte do biodiesel de palma que se encontrava estocado em uma grande bombona no Laboratório de Máquinas Térmicas. A utilização deste biodiesel não seria tão fiel quanto àquela de um biodiesel de origem do óleo de soja, porém, este combustível já havia sido ensaiado em trabalhos semelhantes por [39] para utilização em misturas de diesel marítimo e biodiesel e seu número de cetano encontrava-se dentro do valor esperado. Contudo, um risco da utilização deste combustível encontrava-se no fato de o mesmo já se encontrar estocado desde 2010, podendo ter sofrido alterações em sua composição química e degradações que afetassem seu desempenho como emulsificador das misturas ternárias, mesmo que seu número de cetano não tenha sido afetado. O ensaio de caracterização, também realizado no laboratório COPPEComb/UFRJ, feito em 2010 para o biodiesel de palma pode ser visto na seção 9.5.

Para realizar o processo de determinação das quantidades necessárias e efetivamente a mistura dos componentes foram utilizados alguns equipamentos e vidrarias do laboratório. Uma balança de precisão foi utilizada para ser possível determinar a quantidade em massa de cada componente. Por este motivo os valores em volume foram traduzidos para massa utilizando, primeiramente, como massa

específica os valores médios dados pela especificação do diesel e biodiesel segundo a ANP (835g/dm³ e 875g/dm³, respectivamente). Quando foi possível realizar a medição da massa específica utilizando uma proveta de alta precisão os valores encontrados (827g/dm³ e 866g/dm³, respectivamente) mostram que a aproximação utilizada inicialmente estava condizente. O etanol possui massa específica de 786,6g/dm³ informado pelo fornecedor. Além destes, um béquer foi utilizado como recipiente principal que receberia todos os componentes e algumas outras provetas foram utilizadas para adicionar o material aos poucos garantindo que se alcançasse o valor esperado. Por fim foi utilizado também um misturador, para o qual o béquer era levado quando todos os componentes já haviam sido adicionados.



Figura 33 - Balança de precisão, béquer e provetas.



Figura 34 - Misturados utilizado.

A ordem de preparação das misturadas adota como critério o menor valor de etanol da amostra, seguido do menor valor de biodiesel. Sendo assim começamos do

B7, B7E5, B10E5, ..., até finalmente o B100. Outro ponto importante é a ordem de inserção de cada componente no béquer, segundo [8], a melhor ordem possível é a adição do etanol seguido do biodiesel, uma vez que isto permite ao biodiesel se ligar ao etanol garantindo seu papel de emulsificador até que o diesel comercial seja finalmente incluído.

Durante o processo de confecção das amostras foi encontrado um problema durante a mistura dos componentes da amostra B10E15. Logo após deixar o misturador a amostra começou a exibir clara separação de fases, com parte do etanol formando uma fase separada na superfície da amostra. Devido a isto foi decidido por não ser realizado o ensaio desta amostra. Este problema pode ser decorrente do fato de o biodiesel utilizado, como já foi explicado anteriormente, ter sofrido degradação de sua composição e seu poder emulsificador ter sido reduzido, bem como de diferenças entre o biodiesel de soja e de palma que possam causar esta diferença (uma vez que esta amostra já foi ensaiada com sucesso em outros trabalhos [8]). Como a amostra com 10% de biodiesel foi incapaz de manter a estabilidade com 15% de etanol, percebemos que a decisão tomada de não se preparar uma amostra com apenas 7% de biodiesel e 15% de etanol foi acertada.



Figura 35 - Separação de fases na amostra B10E15. Etanol se precipita na superfície.

Finalmente era necessário determinar uma ordem de ensaios a ser seguida para determinação do número de cetano bem como da emissão de poluentes. Seguindo a recomendação do engenheiro responsável pela operação do equipamento foi pensada uma ordem de operação na qual se iniciam os ensaios com a amostra de maior número de cetano, decaindo até a de menor valor. Para isto foram utilizados como referência os valores obtidos por [8] em seus ensaios, levando a seguinte ordem de ensaios:

Tabela 10 - Ordem de ensaio para as amostras adotadas.

B100	B7	B60E5	B20E5	B10E5	B60E8	B7E5	B20E8	B10E8	B7E8	B60E15	B20E15
------	----	-------	-------	-------	-------	------	-------	-------	------	--------	--------



Figura 36 - Amostra B7E5.



Figura 37 - Amostra B10E5.



Figura 38 - Amostra B20E5.



Figura 39 - Amostra B60E5.



Figura 40 - Amostra B7E8.



Figura 41 - Amostra B10E8.

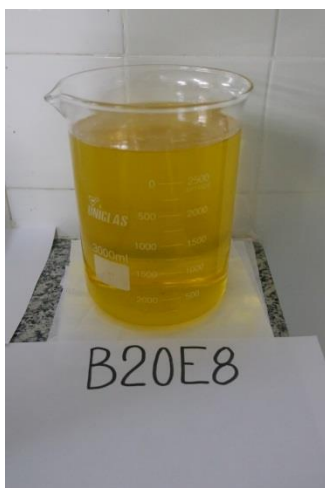


Figura 42 - Amostra B20E8.



Figura 43 - Amostra B60E8.



Figura 44 - Amostra B10E15.

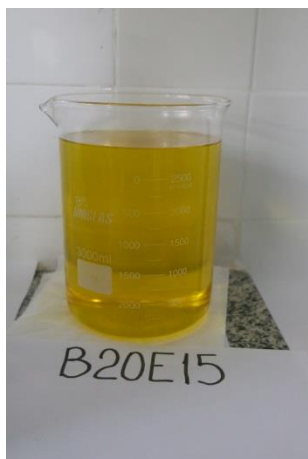


Figura 45 - Amostra B20E15.



Figura 46 - Amostra B60E15.



Figura 47 - Amostra B100.



Figura 48 - Amostra B7.



Figura 49 - Amostras prontas devidamente armazenadas e identificadas.

4. Resultados Experimentais e Discussão

Serão vistos agora os resultados coletados durante os experimentos descritos no capítulo anterior. Uma análise dos resultados será então realizada, comparando os resultados obtidos àqueles esperados com base na teoria. Como foi explicitado na seção 3.2.3 a amostra de combustível B10E15 não foi ensaiada uma vez que apresentou separação de fases imediatamente após a mistura dos componentes e uso do misturador.

4.1. Número de Cetano

Na Figura 50 seguinte é apresentado o resultado geral dos ensaios realizados para determinação do número de cetano segundo a normal ASTM D-613. Os dados operacionais como temperaturas e afins podem ser consultados na seção 9.6. Nas subseções seguintes será feita a análise quando fixamos o teor de etanol ou biodiesel.

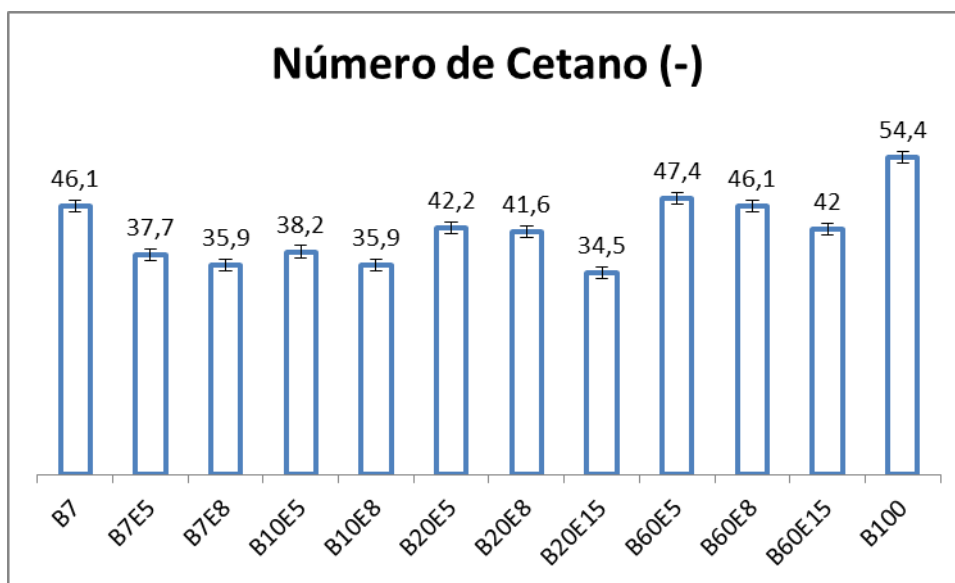


Figura 50 - Número de cetano em função da amostra de combustível ensaiada.

4.1.1. Por Família de Etanol

Para uma mesma quantidade de etanol é esperado que o aumento da quantidade de biodiesel de palma nas amostras ensaiadas cause uma elevação no número de cetano, uma vez que o número de cetano do biodiesel é superior ao do diesel. Os resultados seguem:

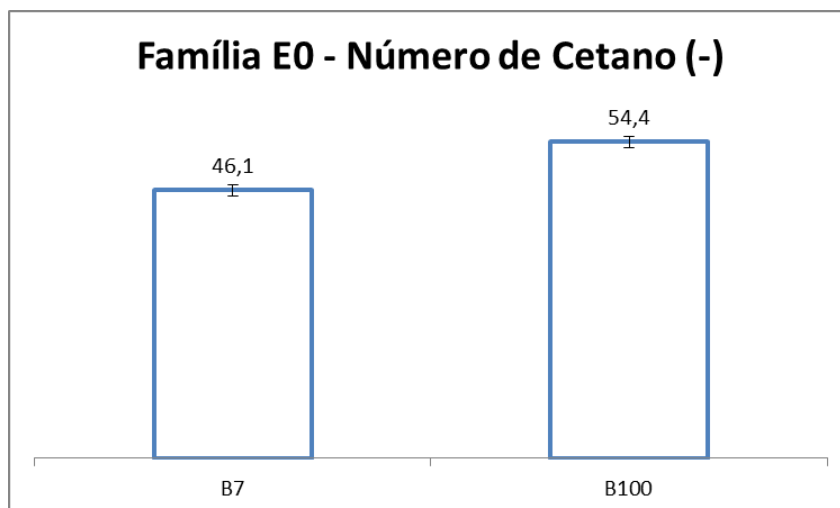


Figura 51 - Número de cetano para 0% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.

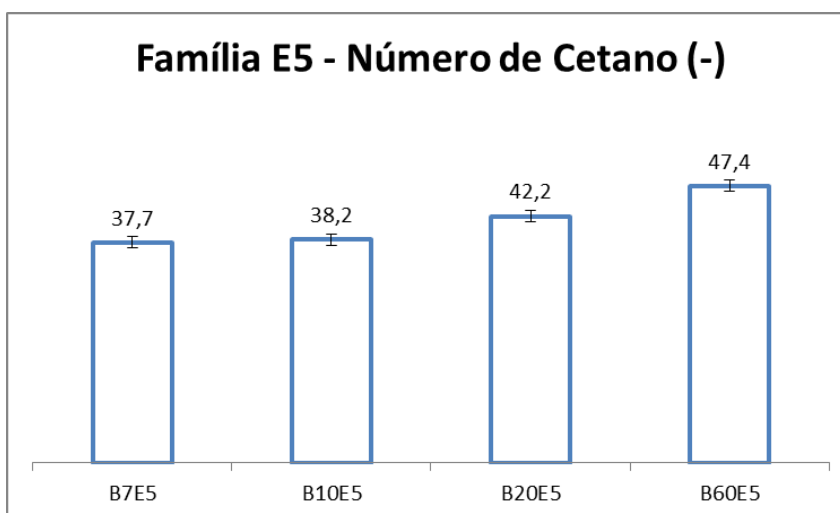


Figura 52 - Número de cetano para 5% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.

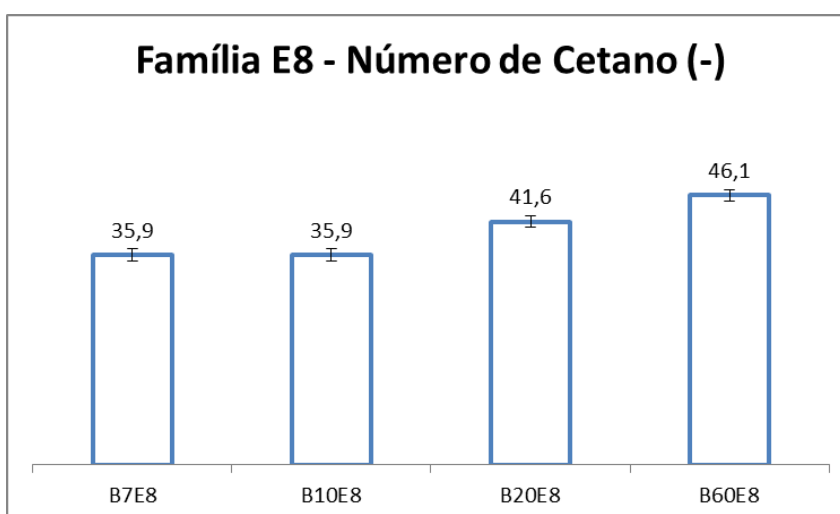


Figura 53 - Número de cetano para 8% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.

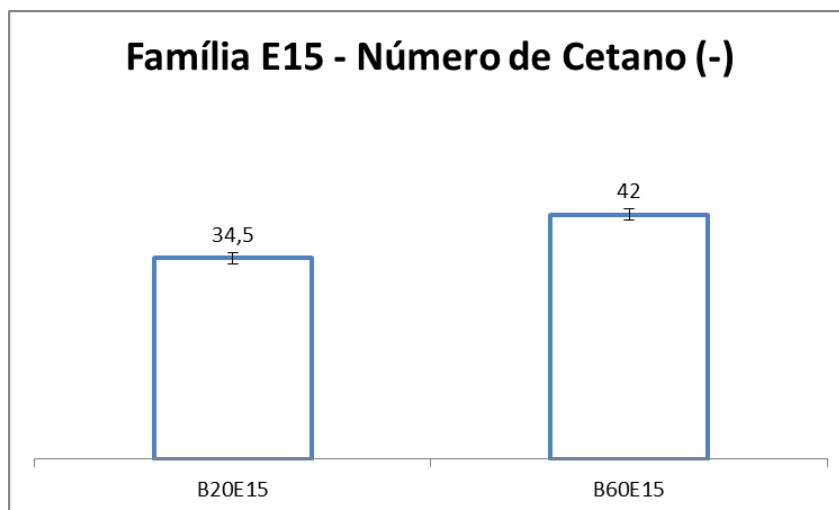


Figura 54 - Número de cetano para 15% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.

Como esperado quando consideramos as amostras sem a presença de etanol o resultado do número de cetano é superior para o biodiesel de palma puro, alcançando 54,4, bem acima dos 46,1 apresentados pelo diesel comercial B7. Para todas as famílias de etanol foi possível perceber o aumento do número de cetano com o aumento da porcentagem total de biodiesel de palma como era esperado. Isto demonstra que a utilização do biodiesel serve não apenas como emulsificador para a mistura contendo etanol, mas também auxilia a elevar o número de cetano da amostra, melhorando o processo de combustão nos motores de ignição por compressão. É interessante notar que o aumento de 3% de biodiesel para as amostras B7E8 e B10E8 não causou efeito sob o número de cetano, porém como a incerteza do método definido pela ASTM é de até 1 no valor obtido e as amostras são muito próximas este resultado não é fora do esperado. Além disso, considerando os valores obtidos temos que as amostras com teores de biodiesel acima de 20% são aquelas que parecem promissoras para uso em motores de ignição por compressão misturados a etanol, por apresentarem um resultado para o número de cetano bastante superior aquele das amostras com 7 e 10% de biodiesel e mais próximo do valor especificado em norma, garantindo um processo de combustão minimamente eficiente. Porém, para 15% de etanol apenas a amostra com 60% de biodiesel manteve um número de cetano acima de 40.

4.1.2. Por Família de Biodiesel

Para uma mesma quantidade de biodiesel de palma é esperado que o número de cetano caia com o aumento do teor de etanol encontrado nas diferentes amostras, uma vez que o etanol possui número de cetano extremamente baixo. Os resultados seguem:

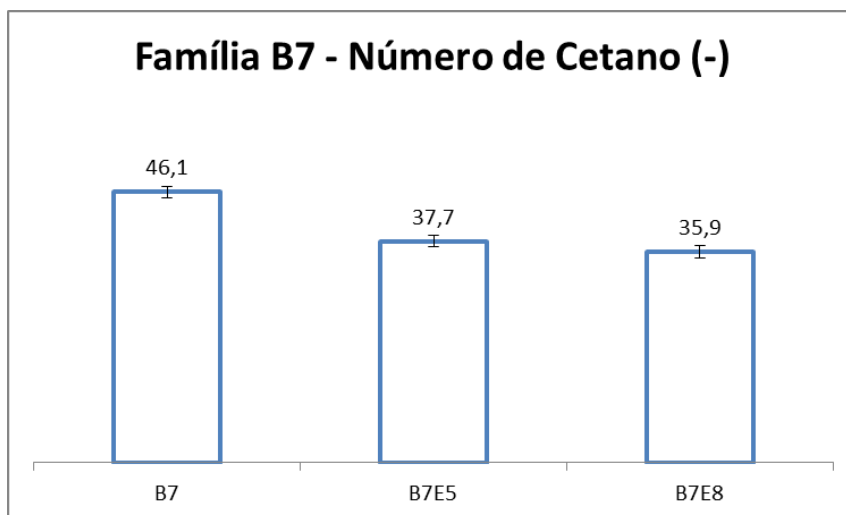


Figura 55 - Número de cetano para 7% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.

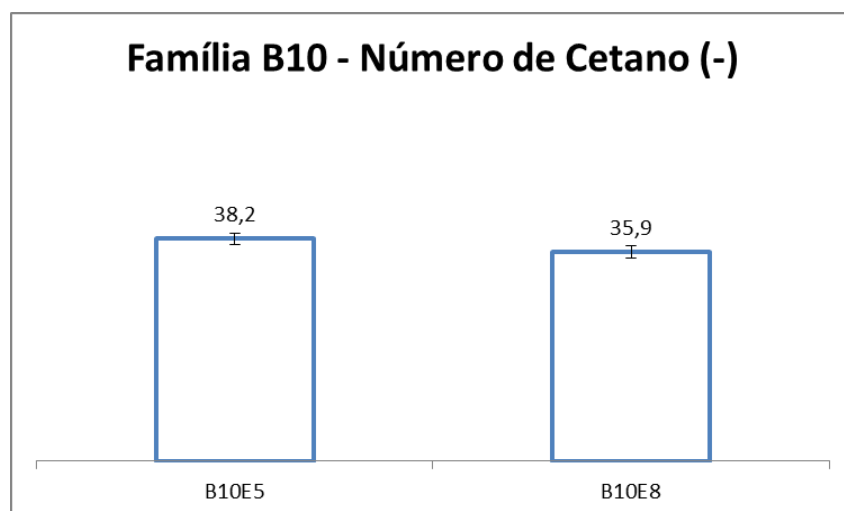


Figura 56 - Número de cetano para 10% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.

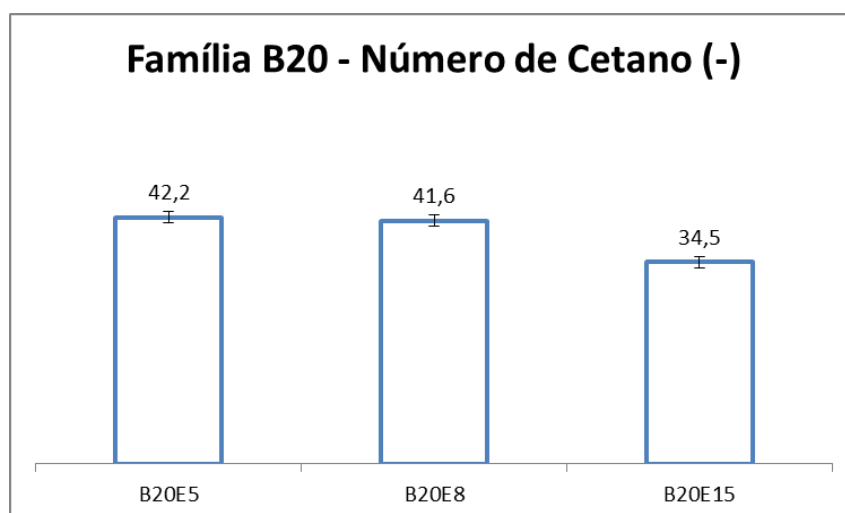


Figura 57 - Número de cetano para 20% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.

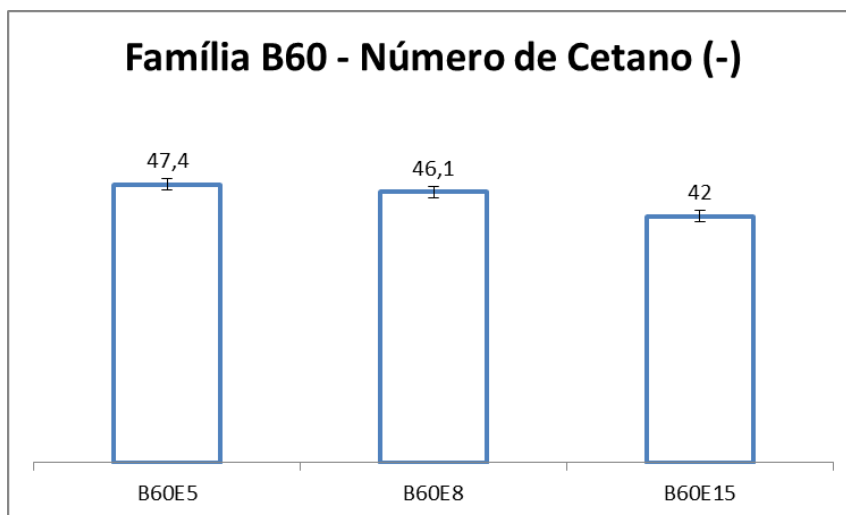


Figura 58 - Número de cetano para 60% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.

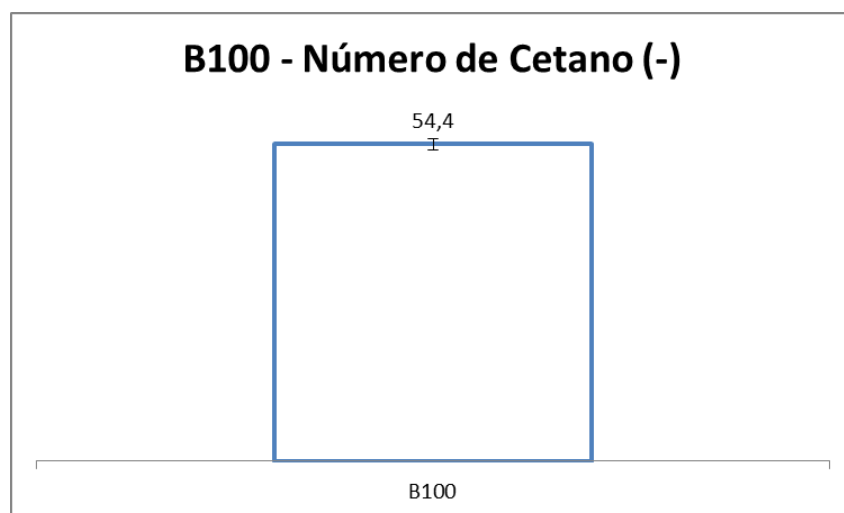


Figura 59 - Número de cetano para 100% de biodiesel de palma em volume.

Observando os resultados para a família B7 pode-se ver que uma pequena adição de 5% de etanol causa uma grande queda no resultado do número de cetano (46,1 para 37,7), o aumento subsequente de 3% para B7E8 também causa queda mas em menor magnitude. Para todas as famílias podemos ver o comportamento esperado da queda do número de cetano com o aumento da porcentagem de etanol da amostra. Avaliando o resultado para as famílias de B20 e B60 é importante perceber que o aumento de 5 para 8% de etanol causa apenas uma diminuta perda de número de cetano, ainda mais considerando a margem de erro do método, tornando estas duas famílias bastante interessantes do ponto de vista de garantir uma combustão eficiente mesmo com teores elevados de etanol.

4.2. Atraso de Ignição

Durante a realização dos ensaios de emissões o motor foi mantido em uma mesma configuração, portanto, devido à alteração no combustível foram percebidos diferentes valores para o atraso de ignição, o que nos dá uma ideia da qualidade da combustão de cada amostra em uma mesma configuração de motor. A seguir temos o resultado geral para o atraso de ignição:

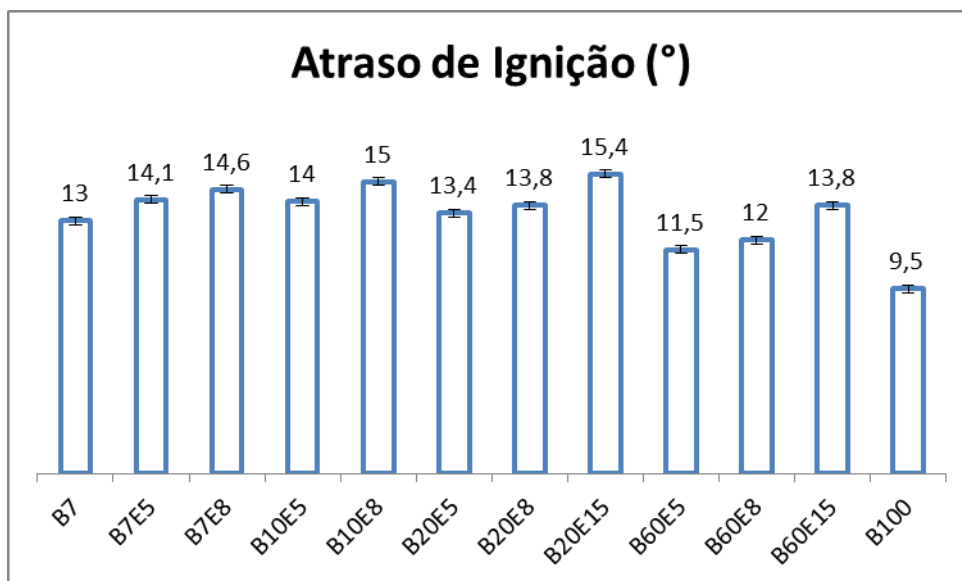


Figura 60 - Atraso de Ignição em função da amostra de combustível ensaiada.

4.2.1. Por Família de Etanol

O atraso de ignição assim como o número de cetano é um indicador da qualidade de combustão do combustível utilizado, e ,portanto, é esperado que seu comportamento seja semelhante ao resultado obtido para o número de cetano, porém, como o número de cetano foi obtido por um processo descrito em norma e em diferentes configurações do motor não deve-se esperar que o comportamento seja exatamente o mesmo. Considerando um valor fixo de etanol é esperado que o aumento do teor de biodiesel diminuísse o atraso de ignição, por apresentar melhor combustão, como constatado no número de cetano. Lembrando que como a configuração do motor está ajustada para as condições de determinação de cetano da amostra B7 esperasse que os valores flutuem em torno dos 13°.Os resultados seguem:

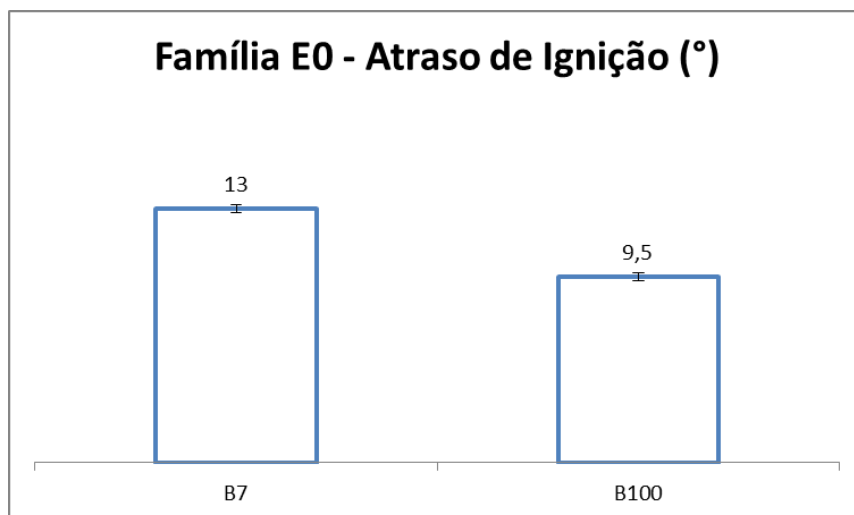


Figura 61 - Atraso de Ignição para 0% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.

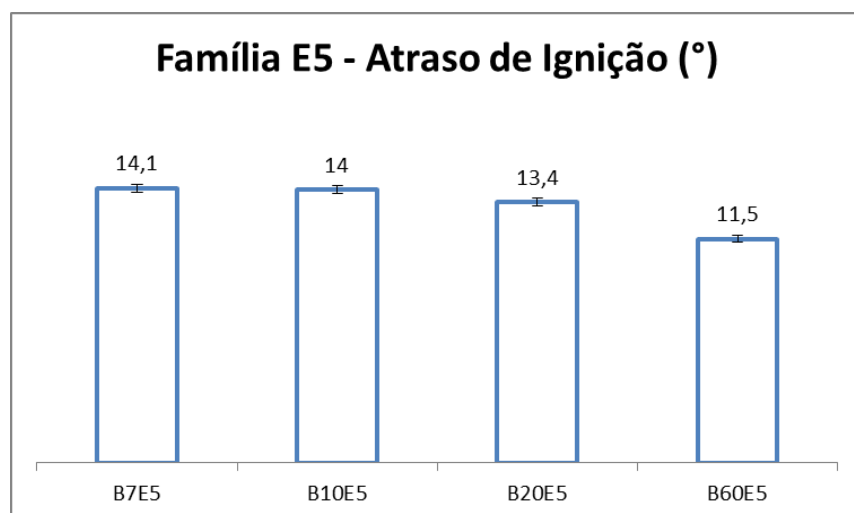


Figura 62 - Atraso de Ignição para 5% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.

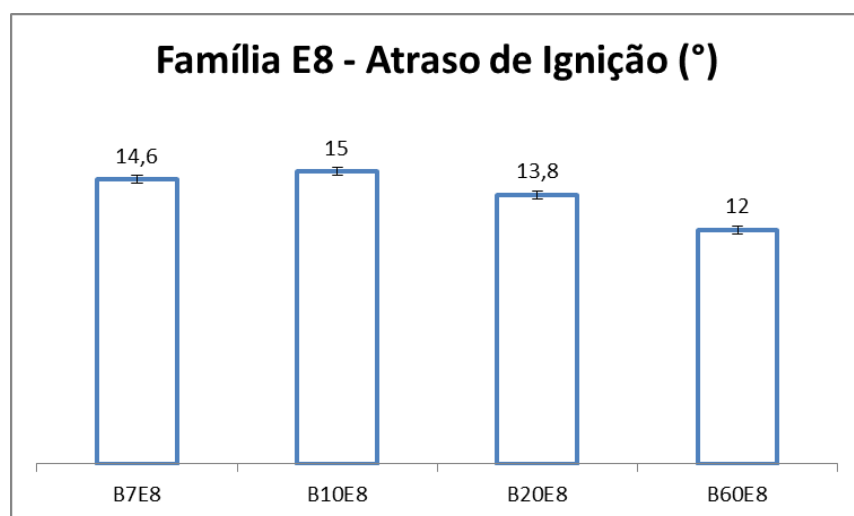


Figura 63 - Atraso de Ignição para 8% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.

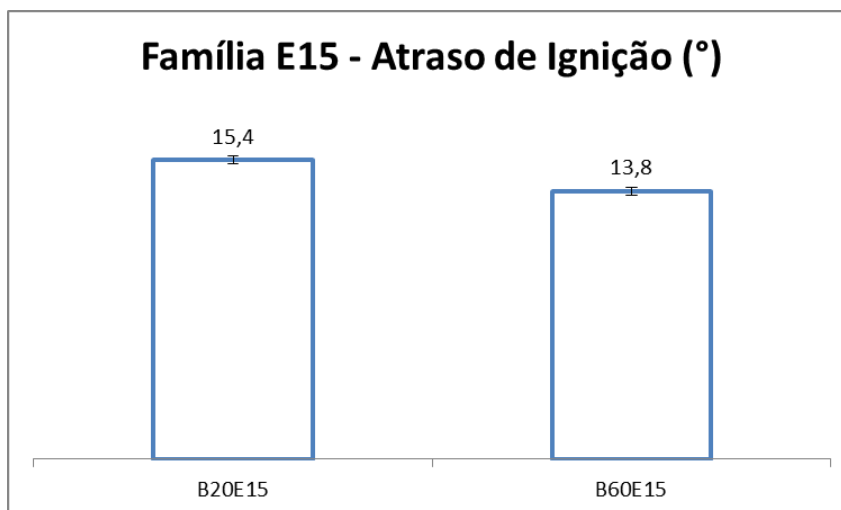


Figura 64 - Atraso de Ignição para 15% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.

De forma geral o comportamento esperado é visto em todas as famílias, à exceção dos valores obtidos na família E8 para 7 e 10% de biodiesel, onde a última apresentou um resultado próximo porém inferior a primeira. Nota-se que o ponto onde o combustível apresenta melhor resultado do que o diesel comercial encontra-se entre os teores de 20 e 60% de biodiesel, considerando que em todos os casos, a menos da família E15, o resultado para 20%biodiesel estava acima dos 13° enquanto para 60% mantinha-se abaixo. Mesmo considerando 15% de etanol na mistura vemos que o resultado para 60% de biodiesel não se distancia muito do 13°, concordando com o resultado do número de cetano que foi obtido anteriormente.

4.2.2. Por Família de Biodiesel

Assim como no caso anterior o comportamento esperado é aquele do número de cetano quando fixado o valor de biodiesel. Ou seja, espera-se que o aumento de etanol cause uma perda da eficiência da combustão, aumentando o atraso de ignição das amostras. Os resultados seguem:

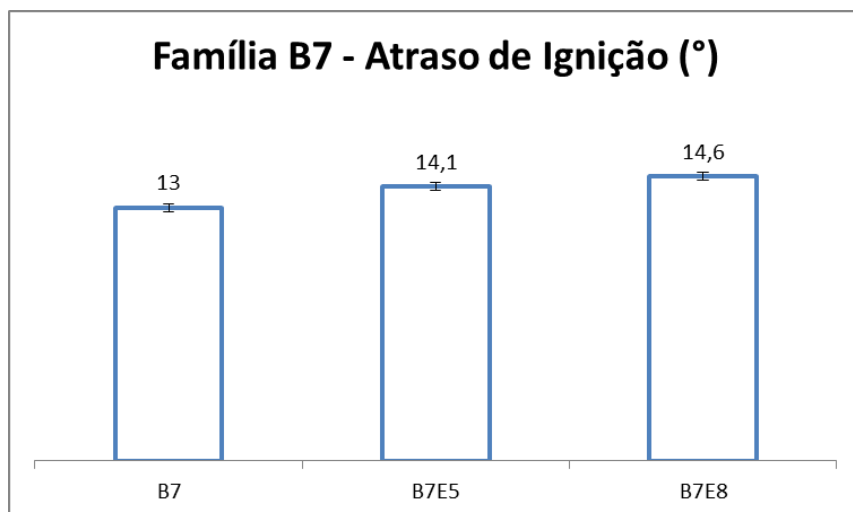


Figura 65 - Atraso de Ignição para 7% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.

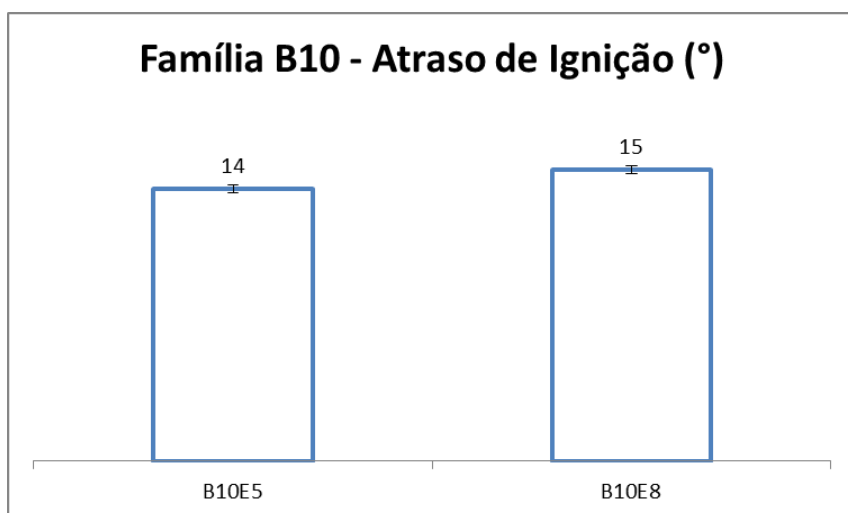


Figura 66 - Atraso de Ignição para 10% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.

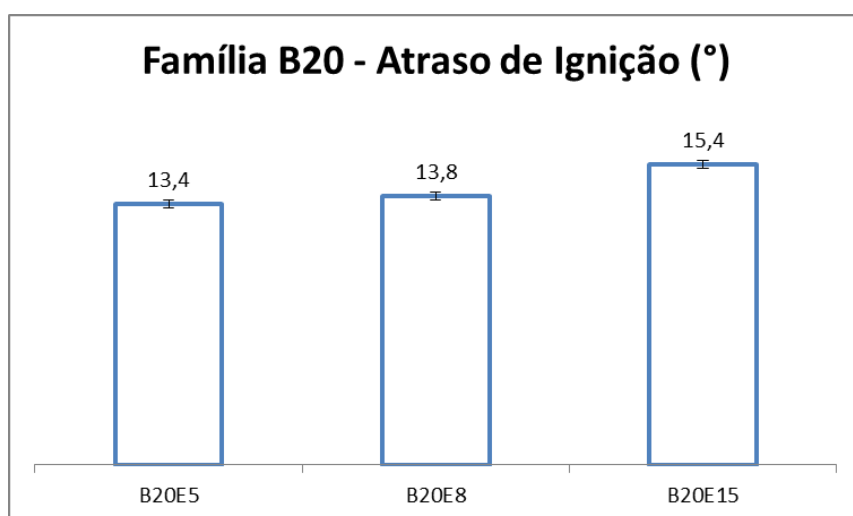


Figura 67 - Atraso de Ignição para 20% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.

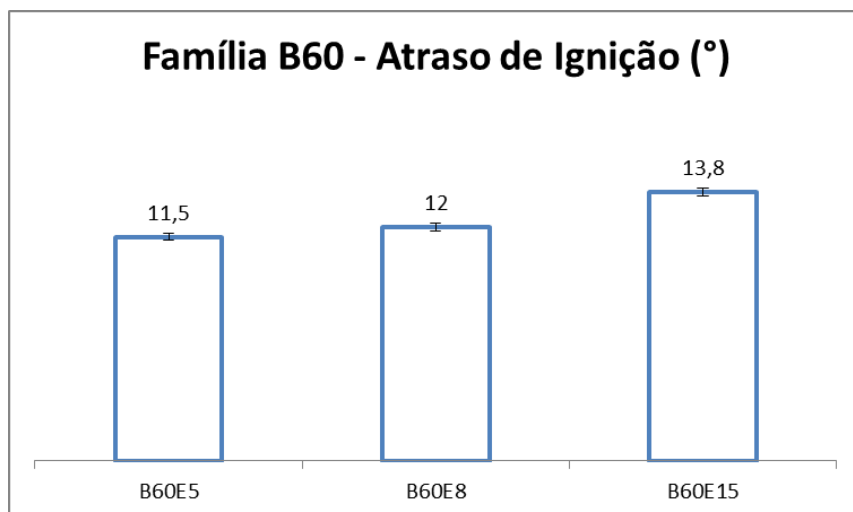


Figura 68 - Atraso de Ignição para 60% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.

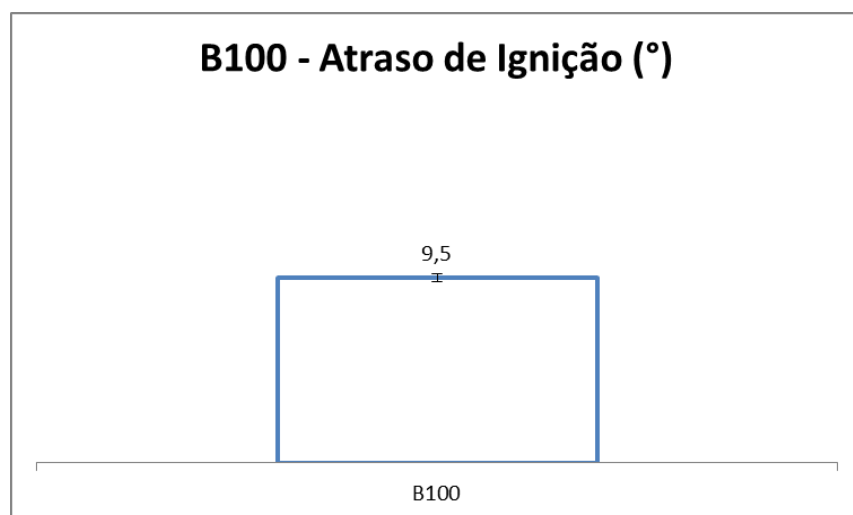


Figura 69 - Atraso de Ignição para 100% de biodiesel de palma em volume.

O comportamento demonstrado ao analisar os dados é aquele esperado em todos os casos. Na família B7 assim como vimos para o número de cetano podemos perceber que a inserção de 5% de etanol causa um grande impacto com relação ao diesel comercial puro, causando uma piora de 1 grau, havendo outra piora ao se elevar o teor para 8%, porém em menor escala. Porém quando vai-se à família B10 entre os valores de 5 a 8% de etanol a piora é maior também alcançando 1 grau. As famílias B20 e B60 possuem comportamento semelhante com pequeno aumento entre 5 e 8% e um aumento mais significativo quando elevamos o teor para 15% de etanol. A amostra B100 possui o melhor resultado entre todos, como esperado.

4.3. Correlação entre CO_{2i} e CO

A emissão de monóxido de carbono como explicado anteriormente ocorre devido a queima incompleta, portanto pode ser interessante avaliar como a quantidade de dióxido de carbono emitida varia com relação a quantidade de monóxido de carbono. Se estivéssemos considerando apenas um combustível o comportamento esperado seria de a queda de emissão de monóxido de carbono acompanhar o crescimento de emissões de dióxido de carbono (considerando, por exemplo, diferentes cargas aplicadas sobre o motor). Porém estamos lidando com diferentes amostras de combustível, o que afeta não apenas o quão completa a combustão que

ocorre no interior dos cilindros é, como também o fato de a composição química alterar a quantidade de oxigênio disponível na mistura que será queimada. Deve-se lembrar que os valores para o dióxido de carbono exibidos, CO_{2i} , são os valores de dióxido de carbono indicado pelo equipamento, como explicado durante a metodologia experimental. Os resultados seguem:

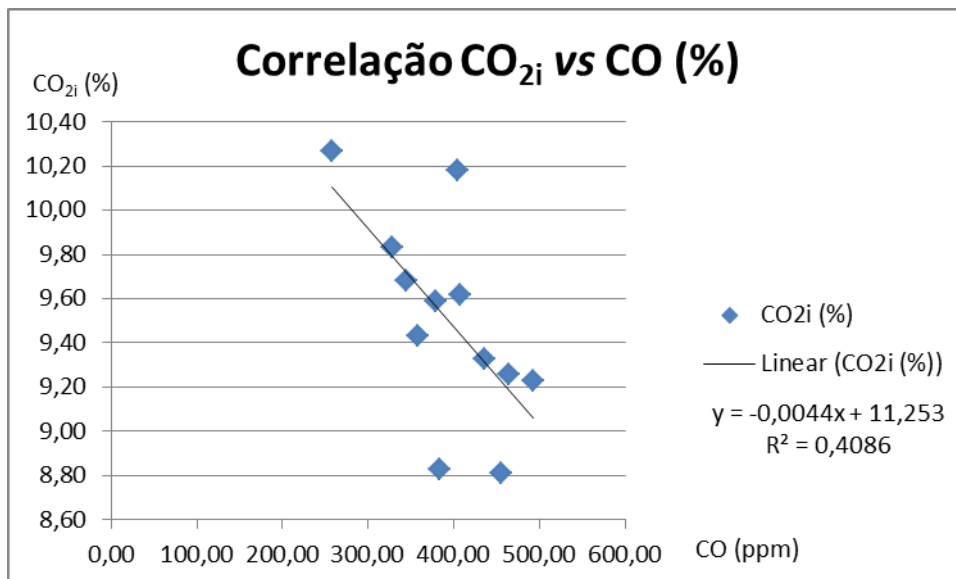


Figura 70 - Correlação entre CO_2 e CO emitido e ajuste de curva linear.

Ao se avaliar o resultado de um simples ajuste de curva linear nota-se que a correlação é muito fraca, apesar de acusar o comportamento descrito anteriormente de queda do monóxido de carbono acompanhar o crescimento de dióxido de carbono. A avaliação do ajuste pode ser feita através do parâmetro R^2 que determina o grau de confiança que os dados ajustados possam ser representados pela curva, quanto mais próximo de 1 melhor é o ajuste, enquanto quanto mais próximo de zero pior, como o resultado para este ajuste é de apenas 0,4086, vemos que não se trata de um ajuste satisfatório. A equação da curva ajustada encontra-se explicitada no gráfico.

4.4. Correlação entre NO_x e NO

Analogamente ao caso anterior a correlação entre o total de óxidos de nitrogênio emitido ($NO + NO_2$) e a emissão de NO pode ser interessante. Isto porque seguindo a teoria a emissão de NO_2 ocorre principalmente após as fases principais da combustão e não deve ser muito afetada com a mudança de combustível, uma vez que nenhum dos componentes utilizados possui quantidade apreciável de nitrogênio em sua composição. Além disso, poderá ser analisada a relação entre a quantidade de cada tipo de óxido emitido com relação aquilo que é esperado de um motor de ignição por compressão. Os resultados seguem:

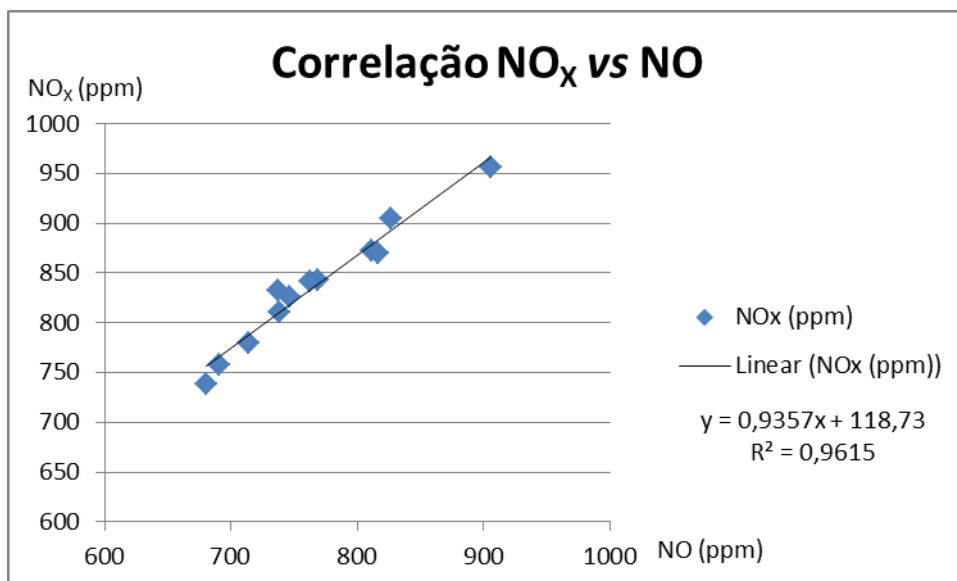


Figura 71 - Correlação entre NO_x e NO emitidos e ajuste de curva linear.

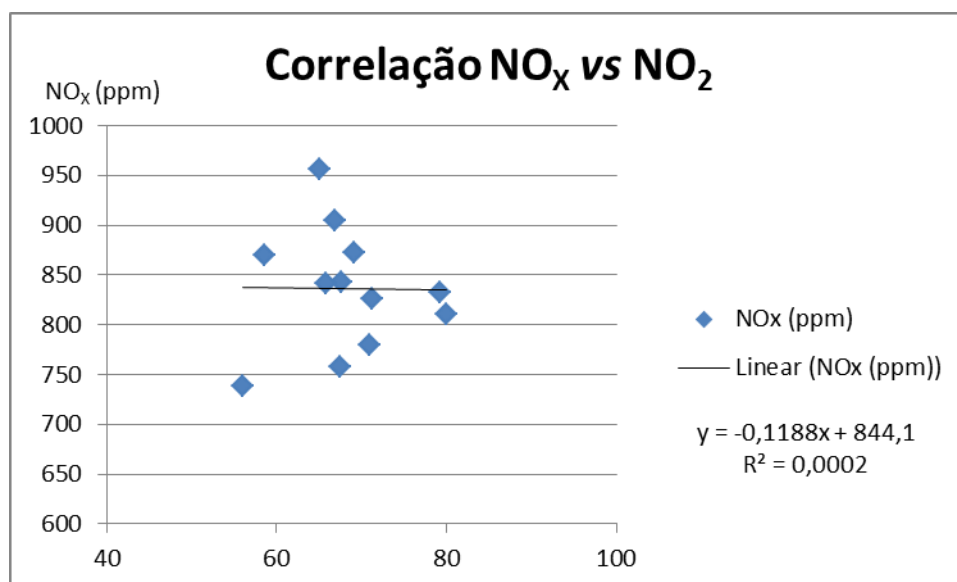


Figura 72 - Correlação entre NO_x e NO₂ emitidos e ajuste de curva linear.

Avaliando-se ambos os gráficos é fácil chegar a conclusão de que existe uma forte correlação entre as emissões de NO_x e de NO. Isto é evidenciado pelo alto valor obtido para o termo R², além disso, a reta ajustada mostra que a relação entre ambos é de quase 1:1, com um valor de offset pequeno (causado pela presença do NO₂). Observando a razão entre o maior valor de NO₂ e NO_x, pode-se ver que o NO₂ corresponde por pouco menos de 10% das emissões de óxidos, sendo superior àquela encontrada em motores de ignição por centelha, porém dentro dos padrões encontrados em motores de ignição por compressão. A correlação de NO₂ mostra-se completamente inútil assim como era esperado, confirmando que o valor de NO₂ pouco depende do combustível aplicado neste caso, como se pode ver pelo valor obtido de R² de apenas 0,0002.

4.5. Emissões de CO

As emissões de monóxido de carbono para as diferentes amostras ensaiadas encontram-se a seguir:

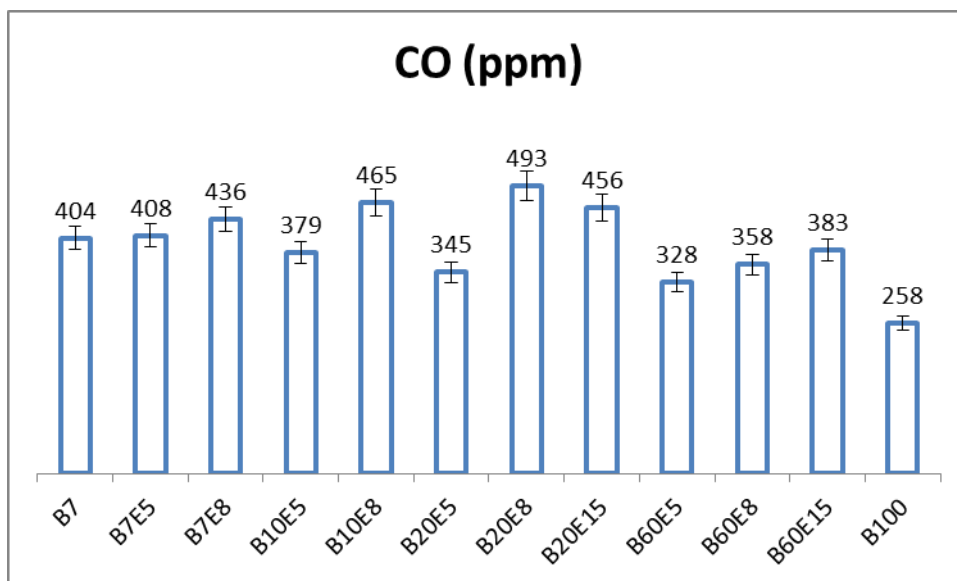


Figura 73 - CO emitido em função da amostra de combustível ensaiada.

4.5.1. Por Família de Etanol

O comportamento para diferentes quantidades em volume de biodiesel quando o valor de etanol é fixado é que a emissão de monóxido de carbono diminua, uma vez que a presença em maior quantidade de biodiesel tornará a combustão mais completa, além disso, o biodiesel possui oxigênio em sua composição, aumentando a quantidade de oxigênio disponível para oxidar o combustível durante o processo de combustão. Os resultados seguem:

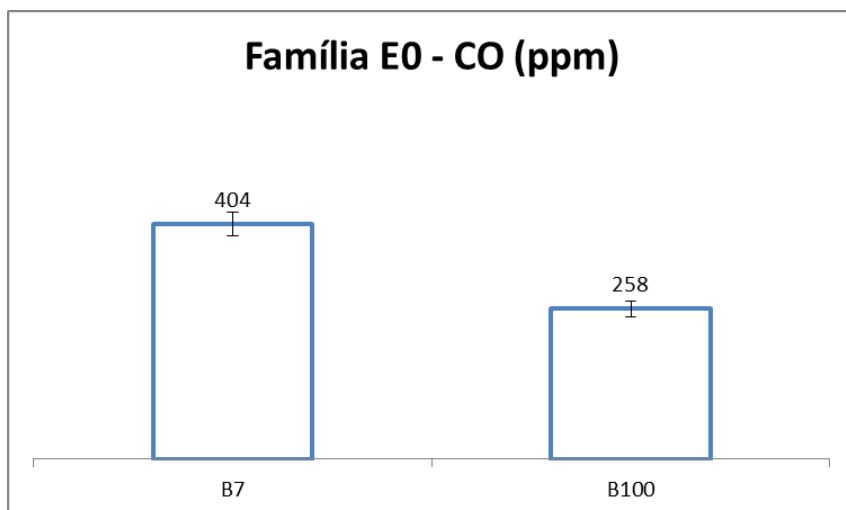


Figura 74 - Emissão de CO para 0% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.

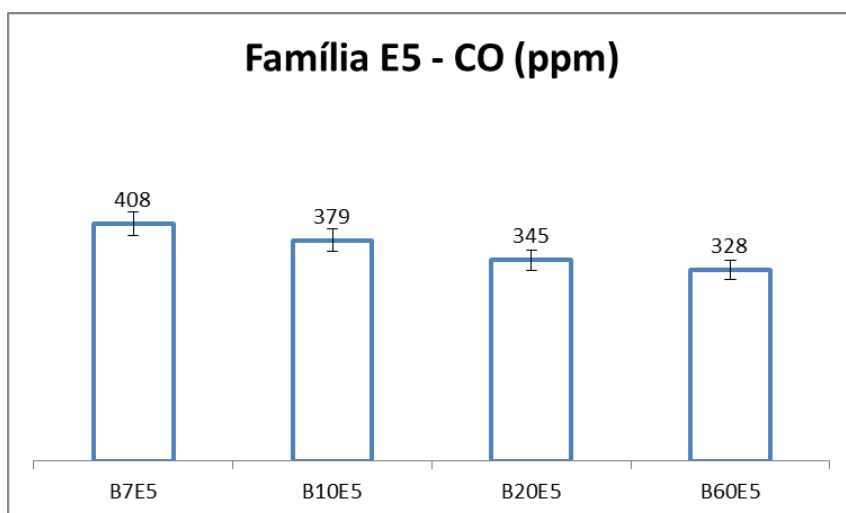


Figura 75 - Emissão de CO para 5% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.

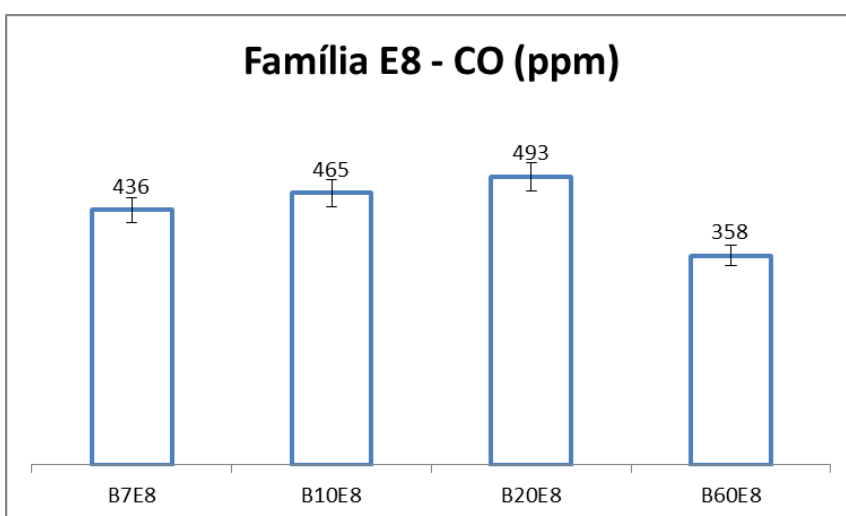


Figura 76 - Emissão de CO para 8% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.

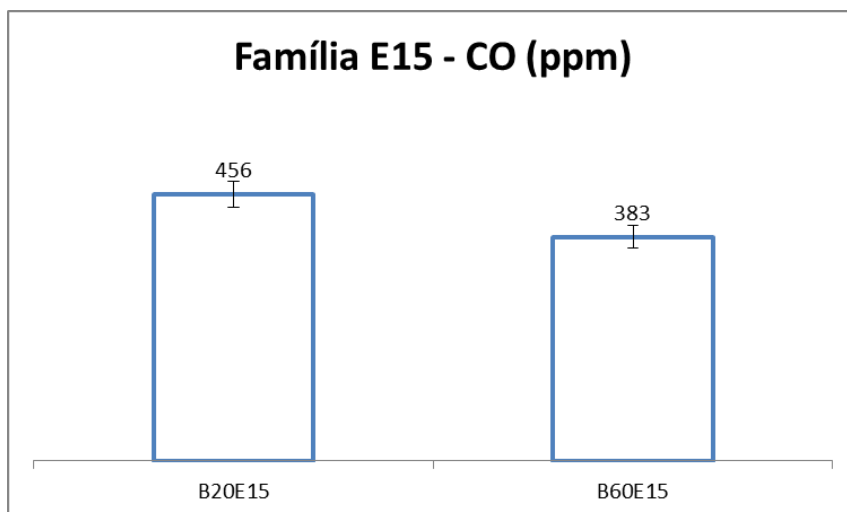


Figura 77 - Emissão de CO para 15% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.

O comportamento esperado é encontrado em todos os casos, à exceção da família E8 onde as três primeiras amostras testadas apresentaram o comportamento contrário ao previsto, aumentando o nível de CO emitido com o aumento do teor de biodiesel presente, diminuindo quando chegamos à quarta amostra que contém 60% de biodiesel, que possui o menor resultado entre as quatro.

4.5.2. Por Família de Biodiesel

Quando se considera o valor fixo de biodiesel e uma variação do teor de etanol o comportamento esperado torna-se de difícil determinação. Isto porque normalmente a presença do etanol em motores de ignição por centelha faz com que as emissões de monóxido de carbono caiam, já que por ser um combustível oxigenado e de maior número de octano a combustão torna-se mais completa e possui maior quantidade de oxigênio para oxidar o combustível. Porém em motores de ignição por compressão a presença do etanol faz com que a combustão seja prejudicada, o que pode tornar a queima mais incompleta podendo causar o aumento de tais emissões. Os resultados seguem:

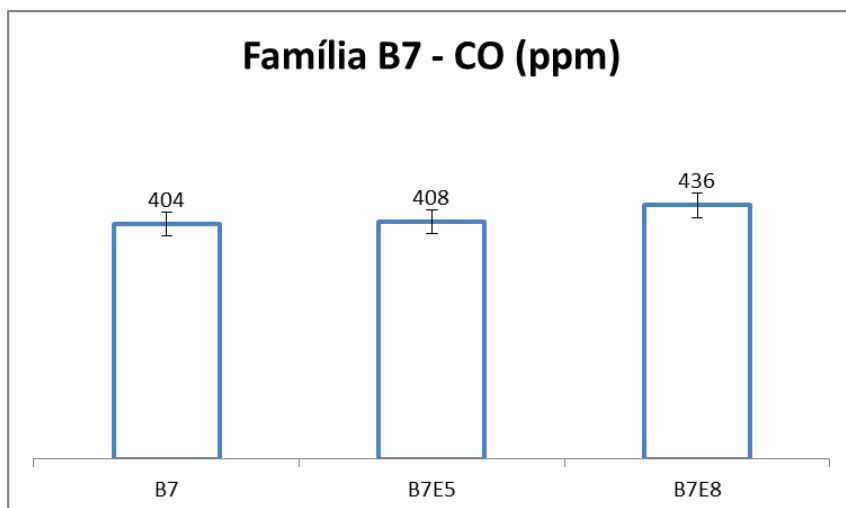


Figura 78 - Emissão de CO para 7% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.

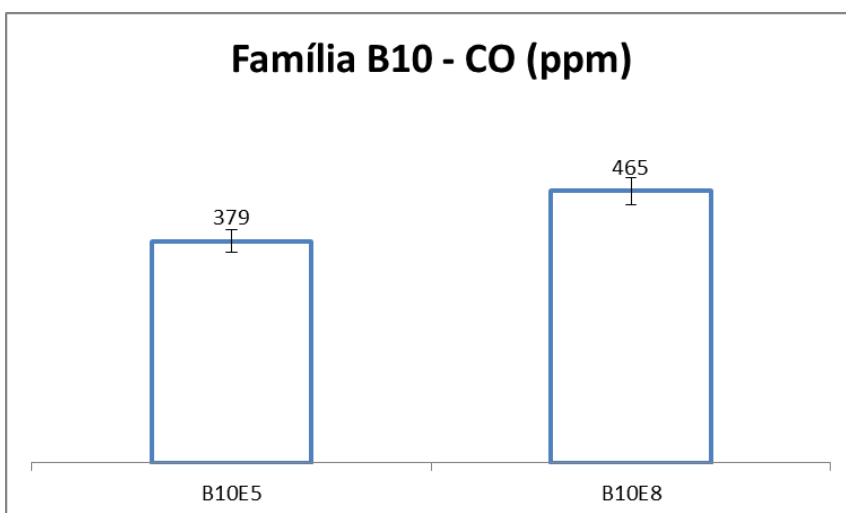


Figura 79 - Emissão de CO para 10% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.

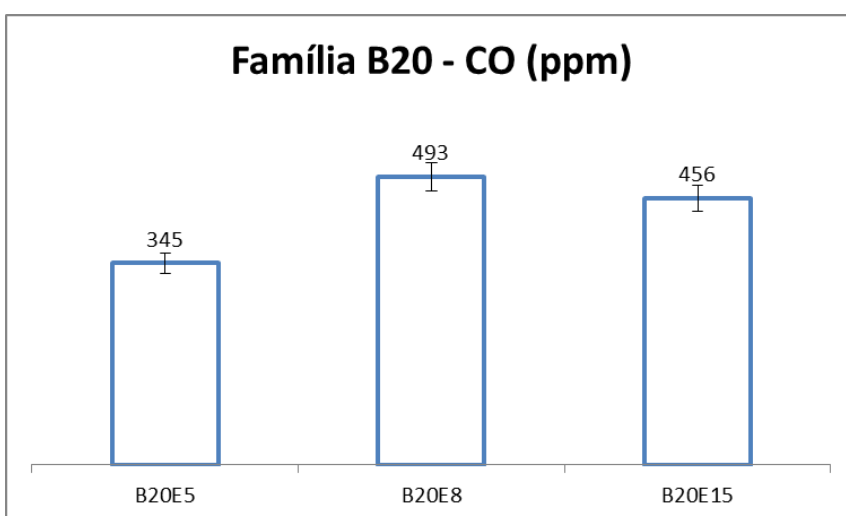


Figura 80 - Emissão de CO para 20% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.

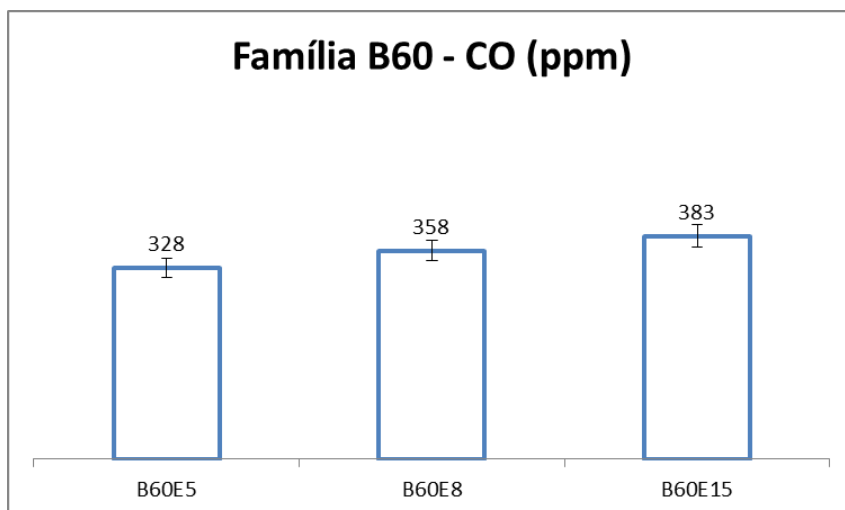


Figura 81 - Emissão de CO para 60% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.

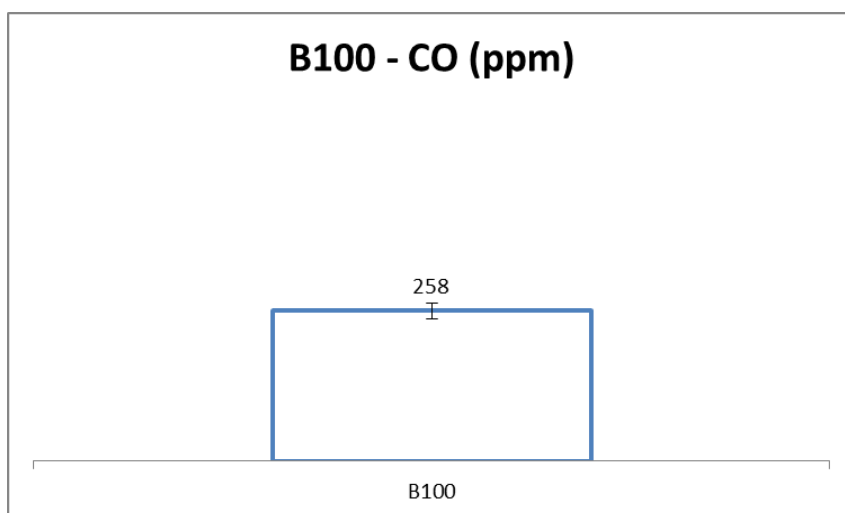


Figura 82 – CO emitido para 100% de biodiesel de palma em volume.

Analisando-se os gráficos notamos que na maior parte dos casos o aumento do teor de etanol causa um aumento na emissão de CO. A exceção encontra-se na família B20, onde o teor de etanol ao ser elevado de 8 para 15% faz com que as emissões de CO diminuam. De forma diferente do que vimos para o número de cetano e atraso de ignição a adição de 5% de etanol com relação ao diesel puro traz pouca diferença sobre o resultado obtido, com o aumento mais notável encontrando-se ao elevarmos de 5 para 8% o teor de etanol das amostras. Algo notável visto que o aumento de 8 para 15% de etanol é mais de 2x maior o que sugeriria um efeito maior.

4.6. Emissões de CO_{2i}

As emissões de dióxido de carbono indicado (CO_{2i}) para as diferentes amostras ensaiadas encontram-se a seguir

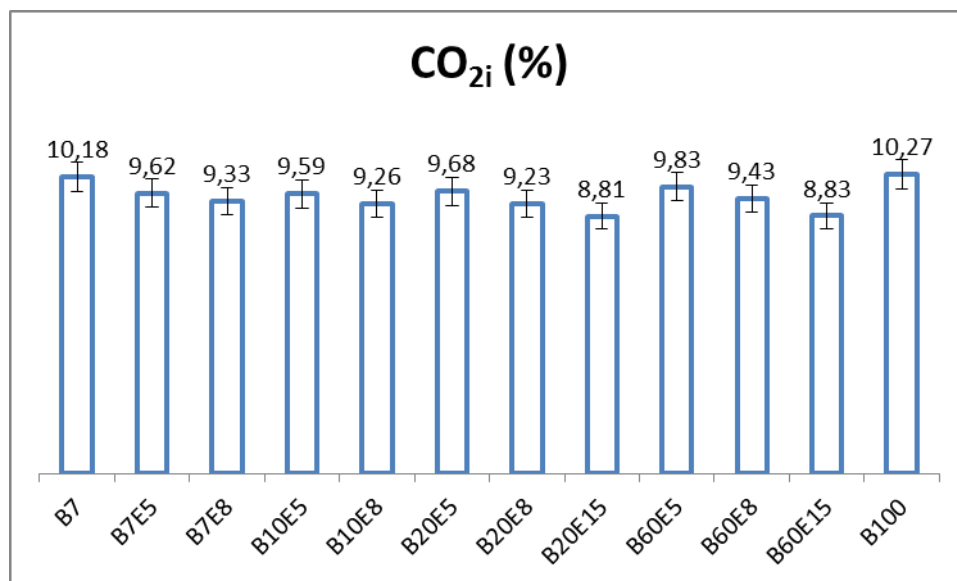


Figura 83 - CO_{2i} emitido em função da amostra de combustível ensaiada.

4.6.1. Por Família de Etanol

De forma contrária ao CO, é esperado que o aumento do teor de biodiesel para valores fixos de etanol cause um aumento das emissões de CO₂. Isto seria causado pela maior oxigenação da mistura devido ao oxigênio extra advindo do biodiesel que permite maior oxidação durante o processo de queima. Além disso, o biodiesel torna a queima mais completa o que facilitaria ainda mais a formação de CO₂. Os resultados seguem:

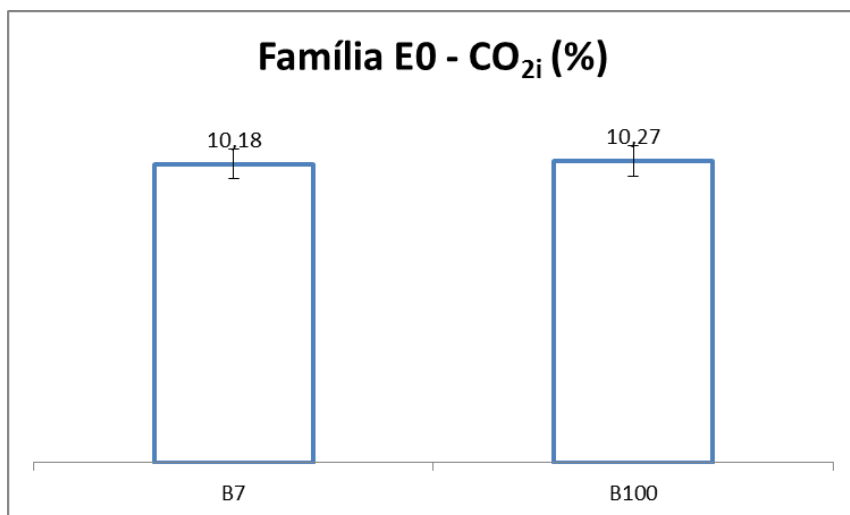


Figura 84 - Emissão de CO_{2i} para 0% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.

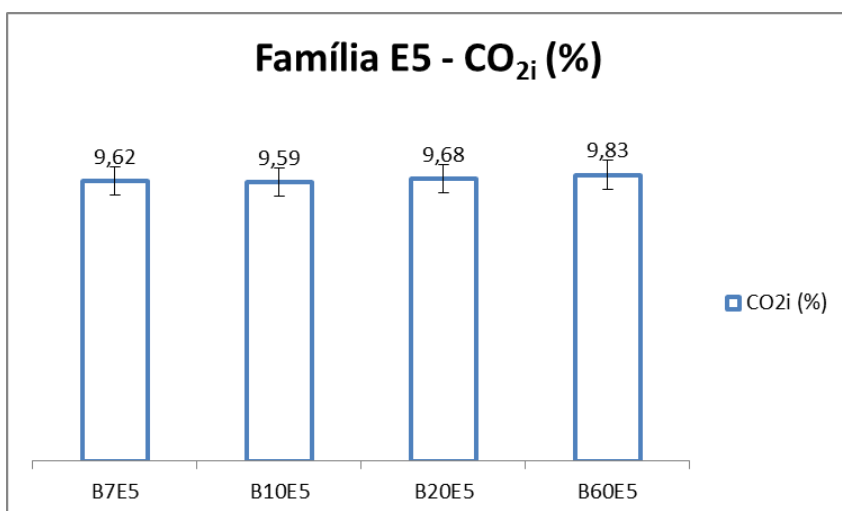


Figura 85 - Emissão de CO_{2i} para 5% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.

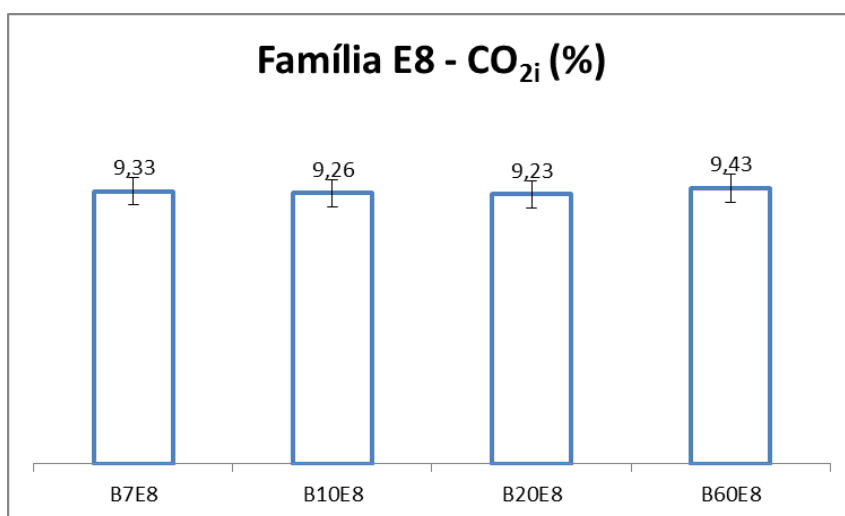


Figura 86 - Emissão de CO_{2i} para 8% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.

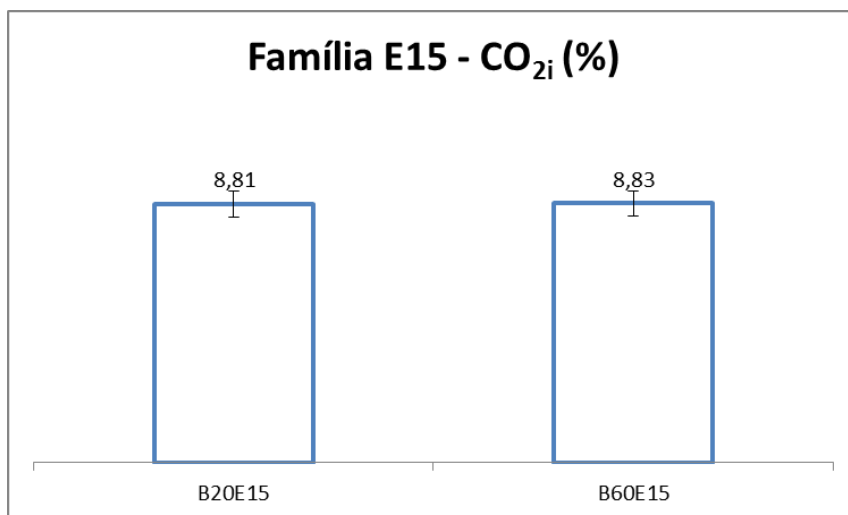


Figura 87 - Emissão de CO_{2i} para 15% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.

A primeira característica percebida é que a variação ocorrida entre diferentes amostras de uma mesma família é muito pequena, mantendo-se nos décimos. O comportamento geral não é muito claro visto que para a família E0 a presença de biodiesel faz com que as emissões diminuam levemente, porém quando avalia-se a família E5 temos um caso de diminuição entre as amostras B7E5 e B7E10, seguido de aumento contínuo nas duas amostras seguintes. Além disso, para a família E8 as três primeiras amostras seguem em declive contínuo até a última amostra, B60E8, onde ocorre o pico de emissão desta família. Para a família E15 é difícil estabelecer alguma conclusão visto que os valores são extremamente próximos, algo interessante dado que ocorre uma variação de 40% do teor de biodiesel na amostra.

4.6.2. Por Família de Biodiesel

Dado um mesmo teor de biodiesel é esperado que a variação no teor de etanol cause queda do desempenho da combustão que ocorre no motor, fazendo com que a quantidade de CO₂ emitido diminua, porém, assim como no caso do CO, a presença de oxigênio no etanol pode facilitar o processo de oxidação do combustível durante a queima, o que pode equilibrar, em parte, o efeito sobre a combustão. Os resultados seguem:

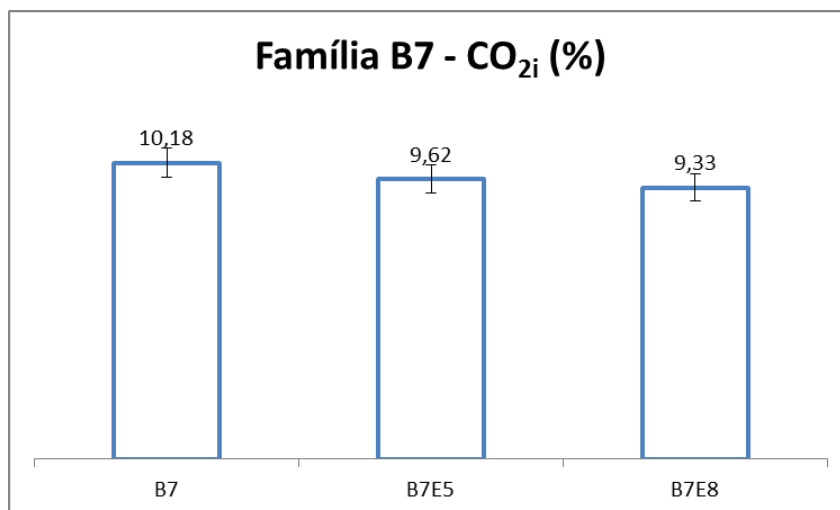


Figura 88 - Emissão de CO_{2i} para 7% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.

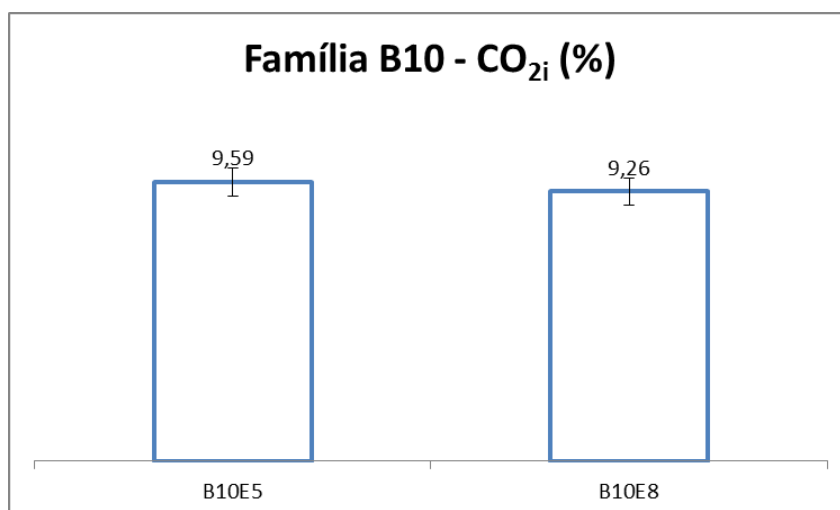


Figura 89 - Emissão de CO_{2i} para 10% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.

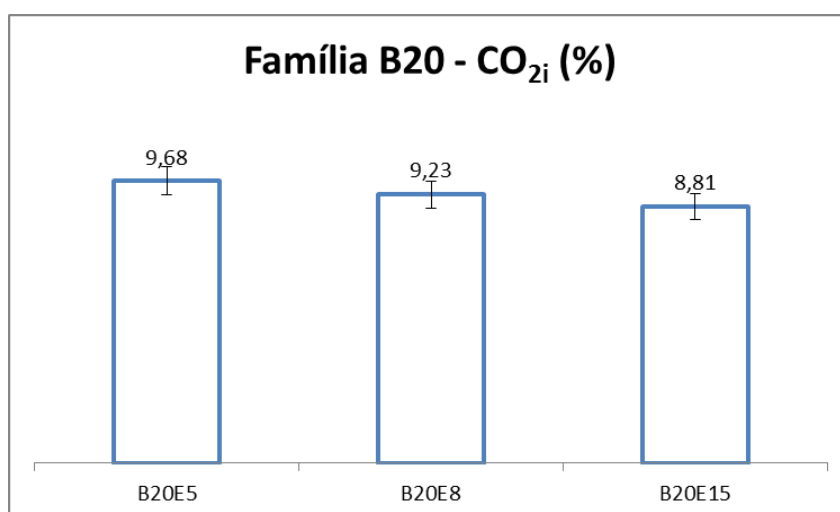


Figura 90 - Emissão de CO_{2i} para 20% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.

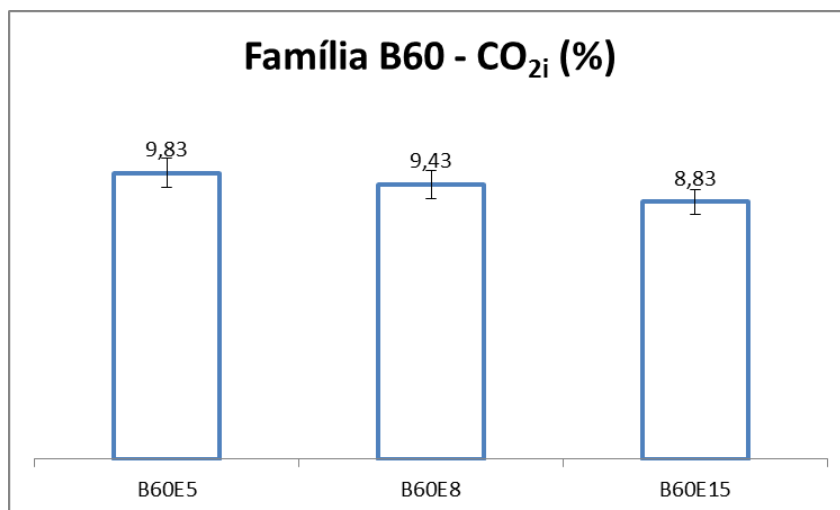


Figura 91 - Emissão de CO_{2i} para 60% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.

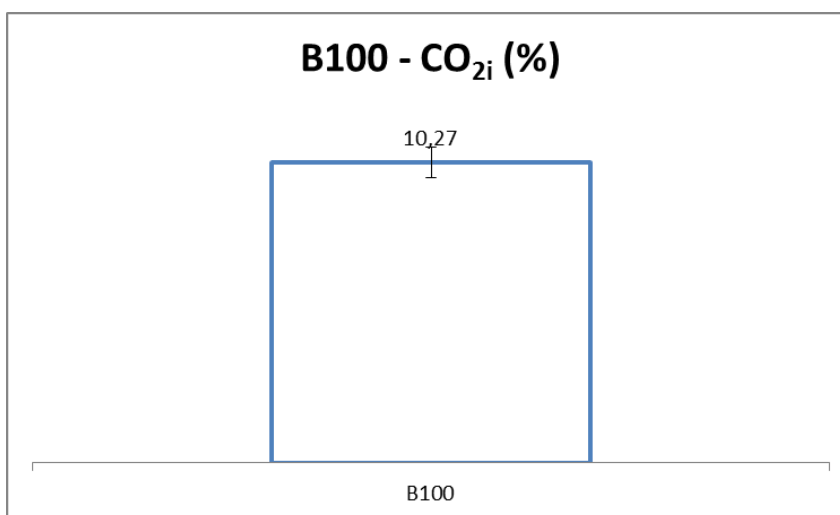


Figura 92 - Emissão de CO_{2i} para 100% de biodiesel de palma em volume.

O comportamento apresentando pelos resultados demonstra que o efeito do aumento do teor de etanol sobre todas as diferentes famílias faz com que as emissões de CO_{2i} diminuam. Além disso, quando comparado ao resultado obtido devido à variação de biodiesel para um mesmo teor de etanol podemos ver que o etanol exerce uma influência maior, já que as variações ocorrem em uma escala maior de valores.

4.7. Emissões de NO_x

As emissões de óxidos de nitrogênio para as diferentes amostras ensaiadas encontram-se a seguir:

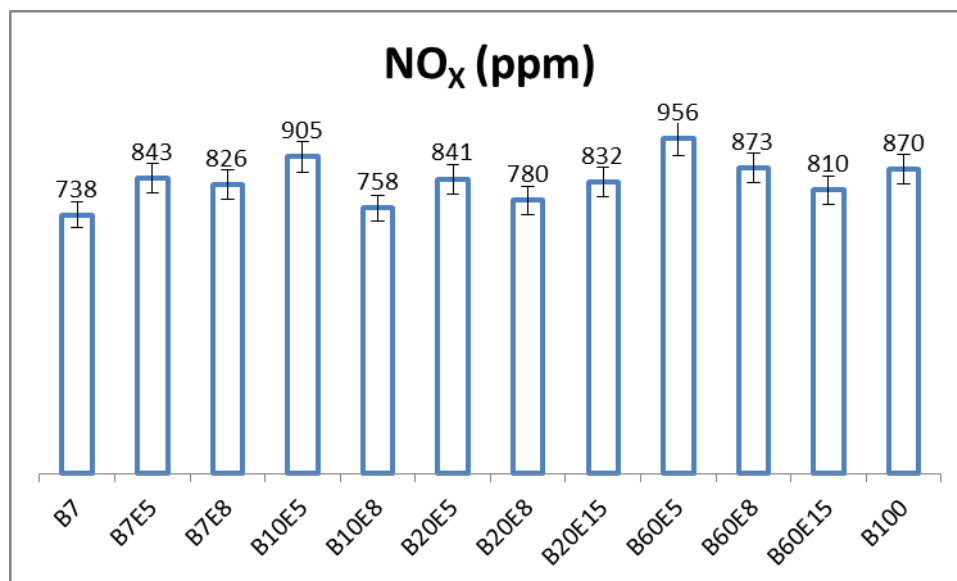


Figura 93 – NO_x emitido em função da amostra de combustível ensaiada.

4.7.1. Por Família de Etanol

O comportamento esperado para a variação do teor de biodiesel presente na amostra para um valor fixo de etanol é de que o mesmo cause aumento nas emissões dos óxidos de nitrogênio, uma vez que sua combustão alcança valores de temperatura maiores facilitando o processo de formação de NO_x. Os resultados seguem:

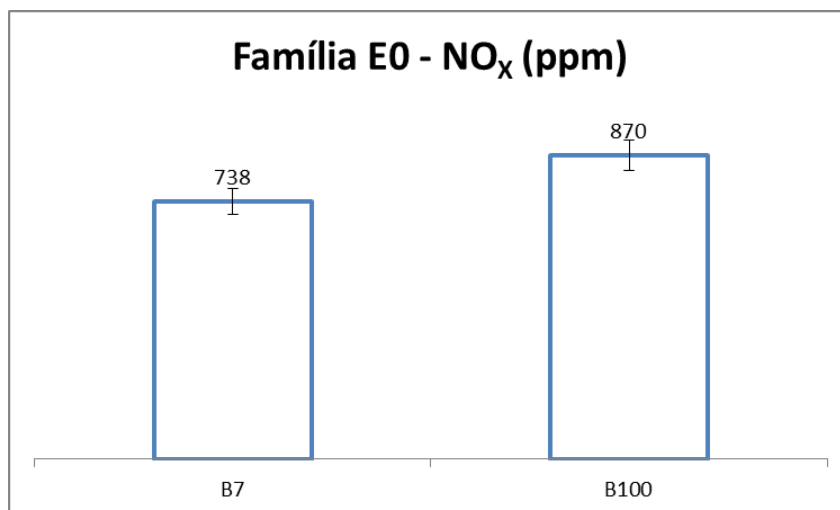


Figura 94 - Emissão de NO_x para 0% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.

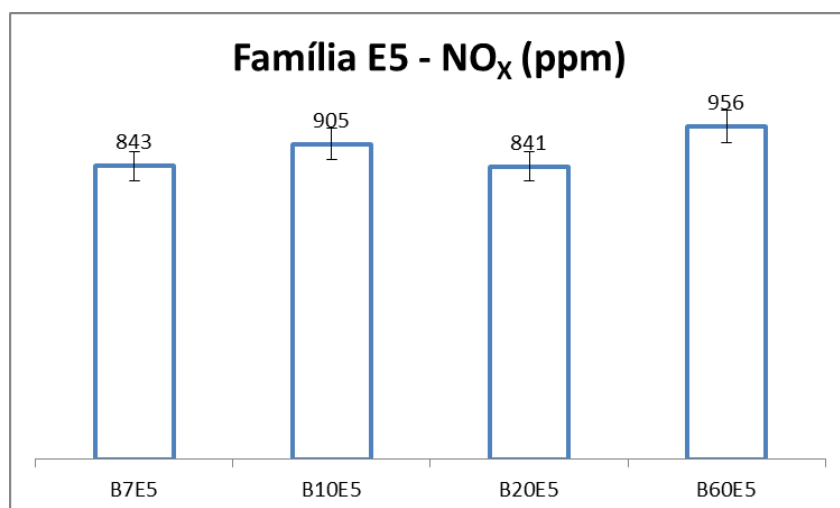


Figura 95 - Emissão de NO_x para 5% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.

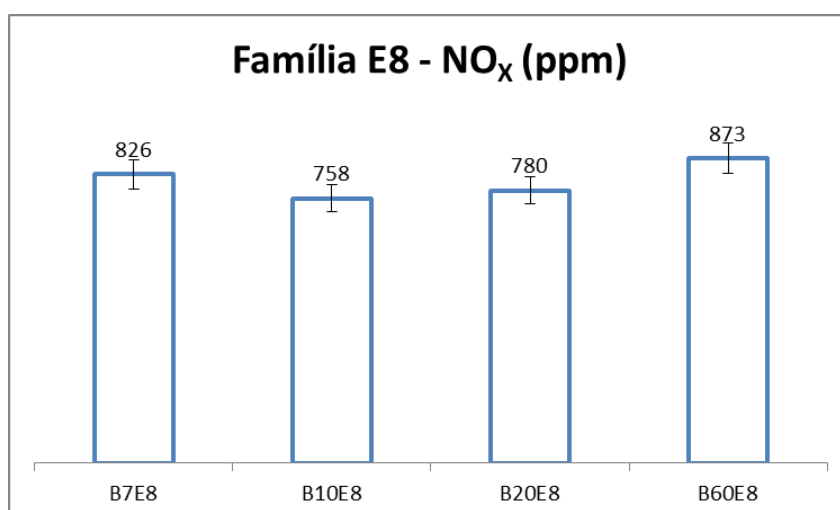


Figura 96 - Emissão de NO_x para 8% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.

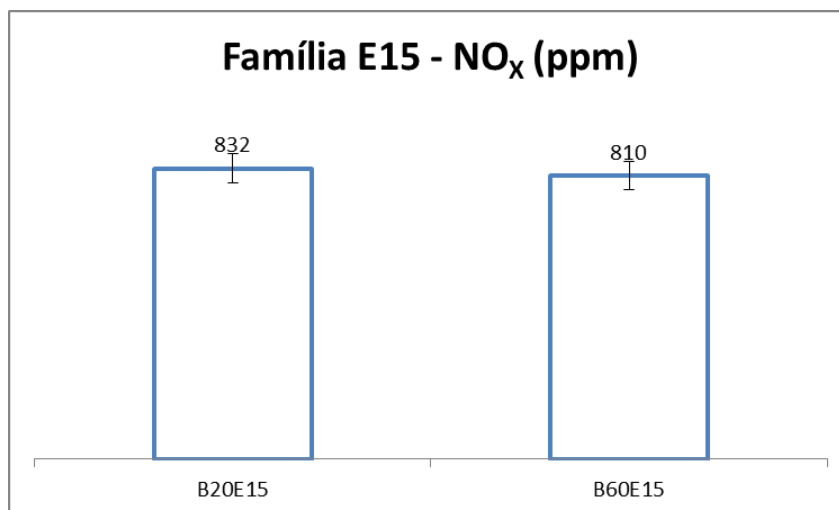


Figura 97 - Emissão de NO_x para 15% de etanol em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e biodiesel de palma.

Apesar de a primeira família apresentada, E0, seguir o comportamento esperado, com o aumento da emissão de NO_x do biodiesel de palma puro com relação ao diesel comercial podemos ver que não existe um comportamento genérico bem determinado ao analisarmos as demais famílias. Ocorre um comportamento de subida e posterior descida para uma mesma família e mínimo de emissões em valores intermediário de teores de biodiesel quando se trata das amostras presentes nas famílias E5 e E15 e uma queda contínua quando se trata das amostras da família E15.

4.7.2. Por Família de Biodiesel

Quando é fixado agora o valor do biodiesel, é esperado que o aumento na quantidade de etanol provoque uma queda nas emissões de NO_x. Isto porque, como já foi visto na nossa avaliação teórica e durante os dados experimentais extraídos, a presença do etanol piora a combustão em motores de ignição por compressão, o que faz com que a temperatura presente na câmara de combustão diminua, dificultando o processo químico de formação de NO_x. Os resultados seguem:

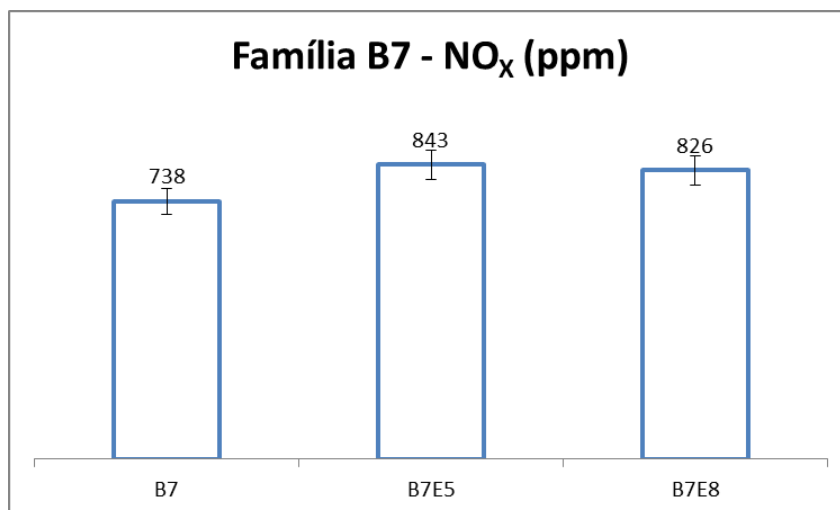


Figura 98 - Emissão de NO_x para 7% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.

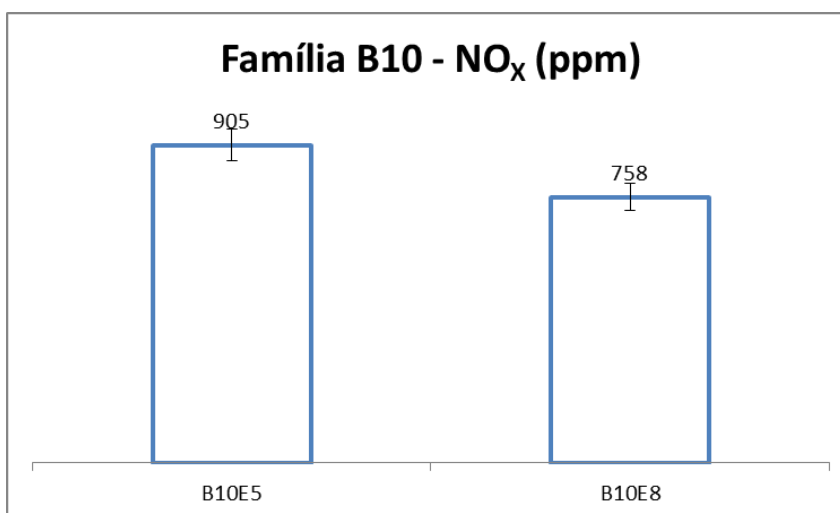


Figura 99 - Emissão de NO_x para 10% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.

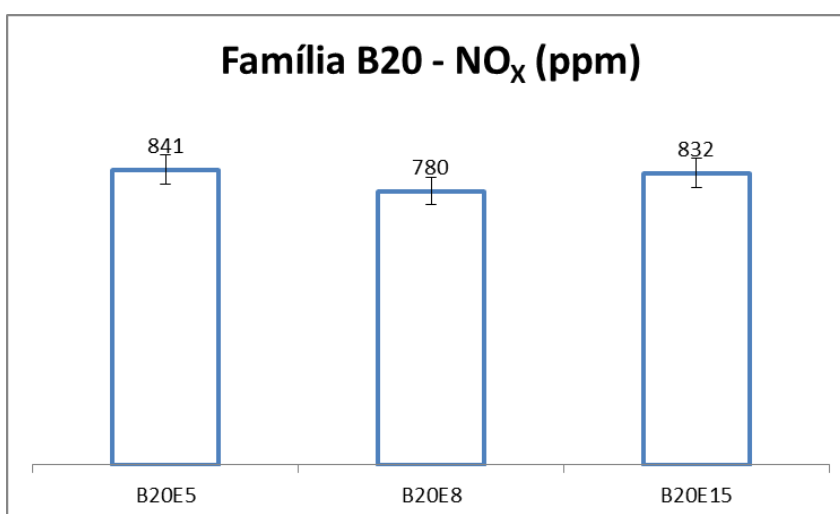


Figura 100 - Emissão de NO_x para 20% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.

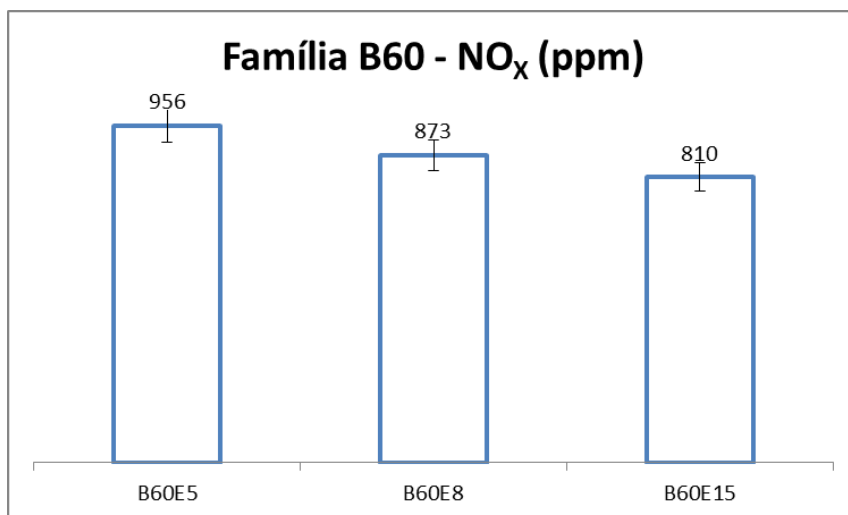


Figura 101 - Emissão de NO_x para 60% de biodiesel de palma em volume e diferentes quantidades de diesel mineral e etanol.

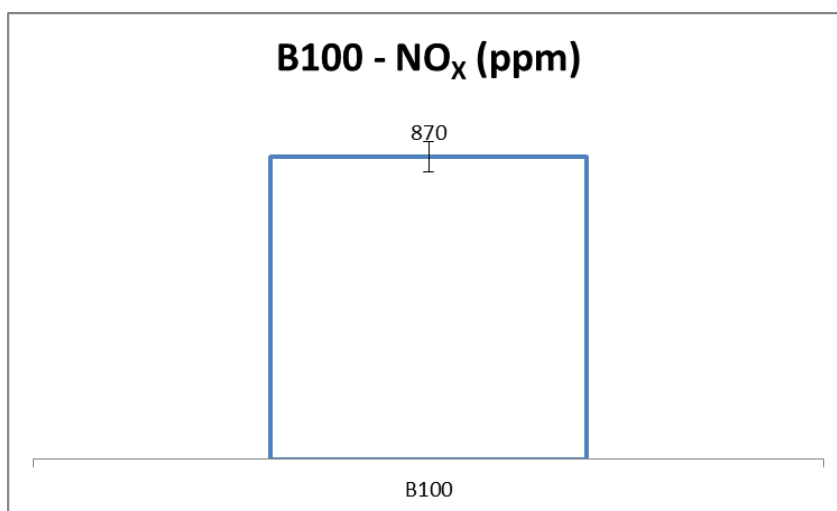


Figura 102 - Emissão de NO_x para 100% de biodiesel de palma em volume.

Um primeiro fato importante que deve ser notado é que a inclusão de 5% de etanol na mistura parece causar um grande aumento na emissão de NO_x, como pode ser visto quando comparamos os valores do biodiesel de palma puro e diesel comercial com os apresentados pelas amostras com 5% de etanol. Isto se mostra mais interessante ainda quando após os 5% iniciais, a continua adição de etanol causa o efeito que era previsto, passando então a diminuir o nível de NO_x emitido, à exceção da amostra da família B20 com 15% de etanol, que apresentou aumento com relação ao resultado para 8%. Por fim, mesmo com a adição de etanol as emissões de NO_x mantiveram-se sempre acima da quantidade emitida pelo diesel comercial, o que pode demonstrar que este tipo de poluente não possa ser controlado desta forma.

5. Metodologia Computacional

5.1. Geometria do problema

A primeira grande preocupação tratada na metodologia é de onde nosso problema se encontra e até onde podemos esperar que os resultados obtidos pelos métodos adotados sejam coerentes. Sob o ponto de vista físico sabemos que o percentual adotado de etanol não deve superar a barreira dos 15% do total, além disso, sabemos que o biodiesel sempre está presente em um mínimo de 7%, devido a este ser o percentual adotado no diesel comercial. Também sabemos que obviamente nem o diesel ou biodiesel podem possuir percentuais acima de 100%, e mais do que isso, o somatório de todos os componentes deve totalizar 100%. Existem também as restrições quanto ao tipo de método adotado. Como foi descrito na revisão bibliográfica o desempenho de interpoladores se torna especialmente ruim quando utilizado para extrapolações fora do domínio dos pontos de treino utilizados. Por este motivo devemos limitar nossa busca por soluções apenas dentro da malha de pontos de treino ensaiada. Dito isto podemos visualizar a malha computacional em vermelho, assim como os pontos ensaiados que serão utilizados durante o processo de treinamento na Figura 103 a seguir:

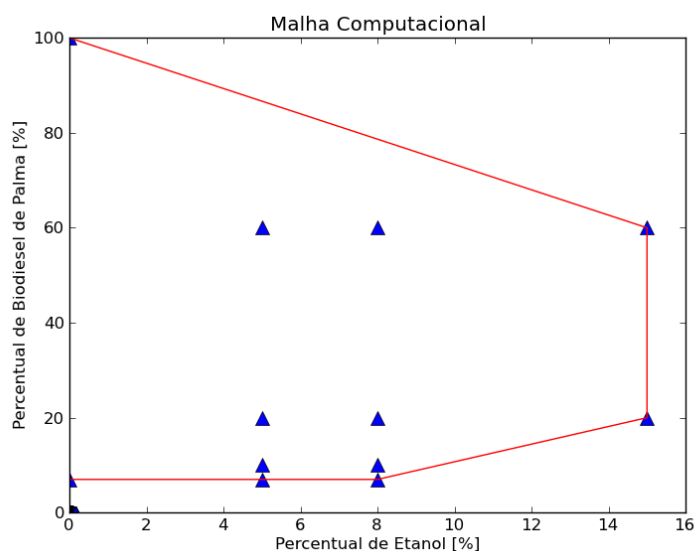


Figura 103 - Malha Computacional do problema.

5.2. Interpolação e Obtenção da Função Objetivo

A obtenção da função objetivo sobre a qual será realizado o processo de otimização será feita através da determinação de uma função de interpolação com base nos dados obtidos durante os ensaios. Trata-se de uma função bidimensional, uma vez que apesar de termos três componentes nas misturas, qualquer um deles pode ser determinado a partir dos outros dois. Como nosso maior interesse está sob o percentual de etanol e biodiesel da mistura, estas duas variáveis foram escolhidas como domínio da função. Serão utilizados os dados dos 12 pontos experimentais ensaiados como pontos de treino para a função de interpolação. Utilizando o processo descrito na seção 2.6.2 a função objetivo poderá ser então determinada

5.2.1. Escolha da implementação

A implementação do método utilizada neste trabalho é a mesma relatada em [40] onde foi realizado um estudo extenso sobre diferentes tipos de *RBF*, influência do

número de dimensões do problema, quantidade de pontos de treino utilizados, pontos objetivos calculados e funções de diferentes comportamentos. A implementação se mostrou bastante robusta mesmo em casos mais problemáticos, como problemas em alta dimensão e com poucos pontos de treino, além de poder lidar com problemas de dimensão bastante elevada, que traziam erros para soluções previamente feitas. O tempo computacional para construção do modelo também se mostrou muito satisfatório aumentando a motivação pelo uso desta implementação. Por fim a implementação também já foi utilizada em um trabalho semelhante para estimar parâmetros de desempenho de misturas de combustível em motores de ignição por compressão obtendo resultados favoráveis [41].

5.2.1.1. Escolha da *RBF*

Os resultados obtidos por [40] indicam que dentre as diversas famílias de *RBF* testadas, uma das que apresenta o melhor resultado e comportamento para os mais diversos tipos de função é a *RBF* de norma *Multiquadrics*. O valor obtido para esta norma quanto à proximidade dos dados reais, indicado pelo termo R^2 , bem como o termo *RAAE* estava entre os melhores obtidos para todos os casos.

5.2.1.2. Escolha de c

Como explicado anteriormente na seção 2.6.2 o parâmetro c desempenha grande importância no resultado obtido através de uma interpolação por *RBF*'s. Por este motivo uma escolha cuidadosa deste parâmetro deve ser feita para que se procure o melhor resultado possível. No trabalho de [40], foi adotada uma escolha baseada originalmente no trabalho de [32]. Porém neste trabalho foi decidida a utilização de uma comparação cruzada, removendo um dos pontos de treino por vez, calculando o erro do ponto interpolado com relação ao real e repetindo o processo para todos os outros pontos de treino, um a um. Daí então um erro médio é calculado e podemos variar o parâmetro c , sendo escolhido o c para o qual o menor erro médio fosse encontrado. Além disso, é tomado um cuidado para que o número de condição da matriz seja menor do que 1000. Isto porque foi observado que acima desse valor a matriz se torna mal condicionada e a resolução do sistema linear deixa de apresentar resultados confiáveis. Após executar este processo para cada função a ser otimizada, o mesmo valor de c foi encontrado para todas, $c = 0,0232$.

5.2.1.3. Desempenho e tempo computacional

O tempo computacional desta implementação é extremamente baixo, e como já foi dito é também uma das motivações de seu uso. A partir dos dados de [40] temos que a construção do modelo com cerca de 500 pontos de treino e cálculo de cerca de 5000 pontos objetivos para problemas de dimensão igual a 50 leva pouco menos de 1 segundo. Considerando um problema de dimensão mais próxima ao nosso caso e um número reduzido de pontos de treino temos que a construção e posterior cálculo para um problema de dimensão igual a 3, com 100 pontos de treino e cálculo de 5000 pontos objetivos leva apenas algo próximo a 0.05 segundos. Como o processo de treino só precisa ser realizado uma única vez no início do programa, logo o cálculo de pontos objetivos de forma posterior é ainda mais rápido. Isto faz com que o processo de otimização não sofra lentidão, ou ao menos que a mesma seja reduzida, devido a forma como a função objetivo é calculada.

5.3. Otimização por Enxame de Partículas

Como esperado, será utilizado o método de enxame de partículas para realizar o processo de otimização de nossas funções objetivo. Precisamos agora determinar quais serão os casos que serão otimizados e quais as restrições aplicáveis.

5.3.1. Cenários adotados

Para todas as funções objetivo otimizadas serão adotados alguns cenários possíveis, procurando verificar o resultado em diversos tipos de situações. Primeiramente será realizada a otimização sem qualquer restrição adicional (além daquelas especificadas na seção 5.1). Um segundo caso interessante para as emissões de poluentes é limitar o número de cetano mínimo em 40, para garantir que o desempenho do motor não seja comprometido, deixando de realizar o serviço necessário. Outro ponto interessante é a limitação do máximo de monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio emitidos quando maximizamos o número de cetano, atraso de ignição ou em outras emissões. Estas emissões são regulamentadas pelo IBAMA no Brasil através do PROCONVE [42], porém as limitações se encontram em termos de g/km ou g/kWh, valores que não podem ser aplicados ao nosso caso visto que não se trata de um veículo e não temos dados de potência e torque, por este motivo será adotado para o NO_x um valor arbitrário de 850ppm como máximo permitido e para o CO será adotado como máximo o valor obtido no ensaio do diesel comercial B7 de 404 ppm. Por último foi realizada a otimização de um parâmetro adimensional que tem como base a normalização dos valores de CO e NO_x unidos em apenas um termo. Assim sendo cada poluente foi normalizado com relação ao valor máximo medido nos ensaios, sendo posteriormente adicionados e o termo final dividido por 2. Esta é uma tentativa de realizar a otimização dos dois parâmetros ao mesmo tempo, porém mantendo o caráter da imagem da nossa função objetivo ainda no R^1 .

Os parâmetros pertinentes ao método de otimização foram mantidos fixos durante todos os cenários adotados, o tamanho da população foi mantido em 1000, os parâmetros α e β assumiram os valores 0 (o termo de inércia α ao se tornar zero facilita a busca por soluções de uma forma mais ampla no domínio) e 2. Para limitar o tempo computacional caso o código não fosse capaz de convergir foi adotado também um número máximo de 100 iterações

Com base no que foi explicado no parágrafo anterior podemos então determinar os seguintes processos de otimização:

Tabela 11 - Cenários de otimização utilizados.

Cenário	Otimização	Restrição 1	Restrição 2	Restrição 3
1	Máx número de cetano	-	-	-
2	Máx número de cetano	$\text{NO}_x < 850$	-	-
3	Máx número de cetano	$\text{CO} < 404$	-	-
4	Máx número de cetano	$\text{NO}_x < 850$	$\text{CO} < 404$	-
5	Mín atraso de ignição	-	-	-
6	Mín atraso de ignição	$\text{NO}_x < 850$	-	-
7	Mín atraso de ignição	$\text{CO} < 404$	-	-
8	Mín atraso de ignição	$\text{NO}_x < 850$	$\text{CO} < 404$	-
9	Mín CO emitido	-	-	-
10	Mín CO emitido	$\text{NO}_x < 850$	-	-

11	Mín CO emitido	número de cetano>40	-	-
12	Mín CO emitido	NO _x <850	número de cetano>40	-
13	Mín CO ₂ emitido	-	-	-
14	Mín CO ₂ emitido	NO _x <850	-	-
15	Mín CO ₂ emitido	CO<404	-	-
16	Mín CO ₂ emitido	NO _x <850	CO<404	-
17	Mín CO ₂ emitido	número de cetano>40	-	-
18	Mín CO ₂ emitido	NO _x <850	número de cetano>40	-
19	Mín CO ₂ emitido	CO<404	número de cetano>40	-
20	Mín CO ₂ emitido	NO _x <850	CO<404	número de cetano>40
21	Mín NO _x emitido	-	-	-
22	Mín NO _x emitido	CO<404	-	-
23	Mín NO _x emitido	número de cetano>40	-	-
24	Mín NO _x emitido	CO<404	número de cetano>40	-
25	Mín termo (CO _n + NO _{xn})/2	-	-	-

6. Resultados Computacionais e Discussão

Antes de exibir e ser feita a análise do resultado das otimizações serão exibidos os gráficos das superfícies de resposta gerados para cada uma das funções interpoladas. Isto nos permitirá avaliar a qualidade da solução encontrada e obter um conhecimento mais genérico do comportamento da função no domínio.

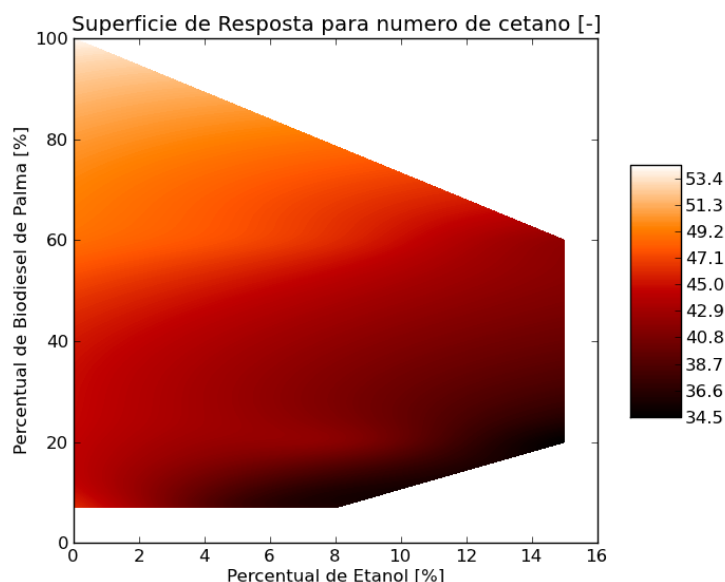


Figura 104 – Superfície de Resposta obtida para número de cetano.

A superfície de resposta obtida sugere que o número de cetano aumenta com o percentual de biodiesel e decai com o aumento do percentual de etanol, algo esperado. O máximo global na região mais clara aponta para o teor de 100% de biodiesel enquanto os mínimos parecem se concentrar em duas regiões distintas, uma pela redução do percentual biodiesel e outra pelo aumento do percentual etanol.

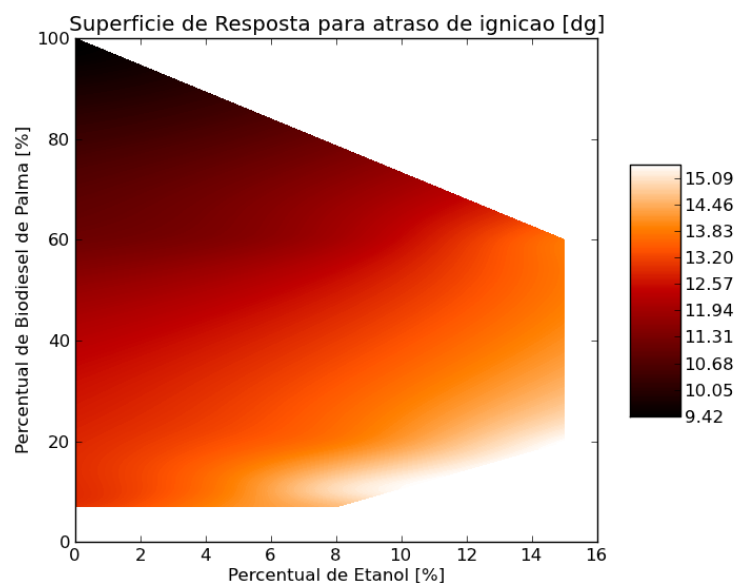


Figura 105 – Superfície de Resposta obtida para atraso de ignição.

A superfície de resposta para o atraso de ignição apresenta o comportamento exatamente oposto ao do número de cetano, também como era de se esperar. Portanto seu mínimo encontra-se próximo dos 100% de biodiesel e o seu máximo pode estar em uma das duas regiões distintas na parte inferior direita do gráfico.

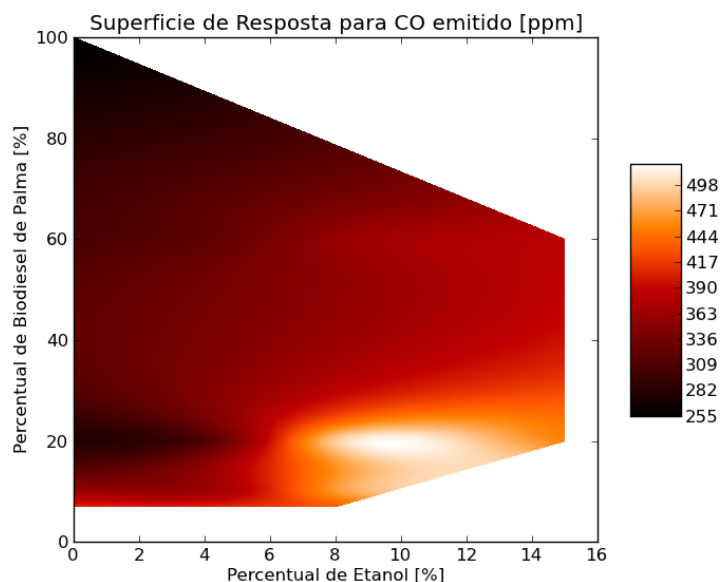


Figura 106 - Superfície de Resposta obtida para CO emitido.

A superfície de resposta para o CO emitido indica também como ponto ótimo de mínimo valores próximos a 100% de biodiesel, enquanto sua emissão é maximizada na região branca em destaque.

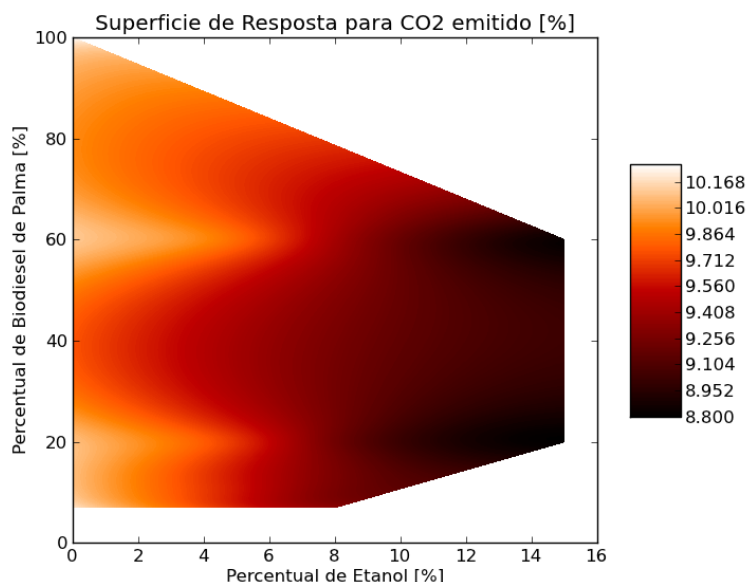


Figura 107 - Superfície de Resposta obtida para CO₂ emitido.

A superfície de resposta para o CO₂ emitido nos mostra que os pontos de mínimo global da função encontram-se em uma das duas regiões escuras onde o percentual de etanol alcança seu valor máximo. O local de máximo global parece se situar próximo dos 7% de biodiesel e 0% de etanol ou nos 100% de biodiesel.

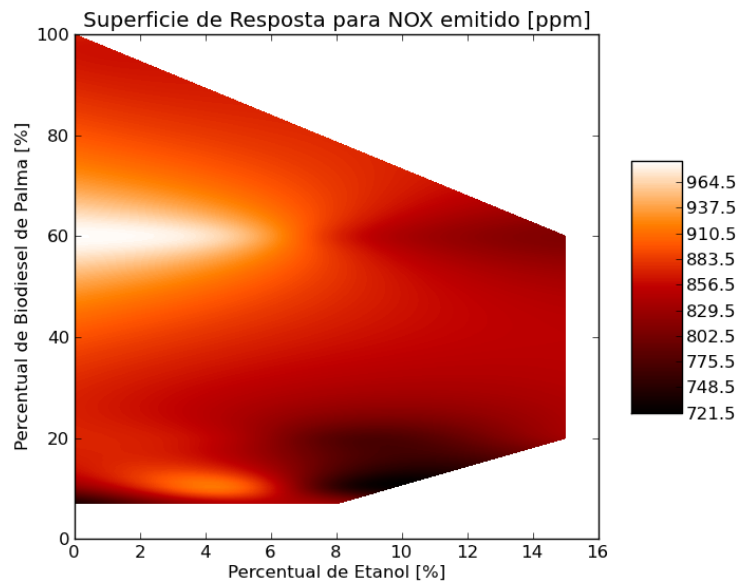


Figura 108 - Superfície de Resposta obtida para NO_x emitido.

A superfície de resposta para o NO_x emitido sugere a existência de várias regiões com mínimos locais, delimitadas pelas regiões escuras do gráfico. A região que contém o máximo de emissão pode ser claramente percebida na parte mais clara do gráfico.

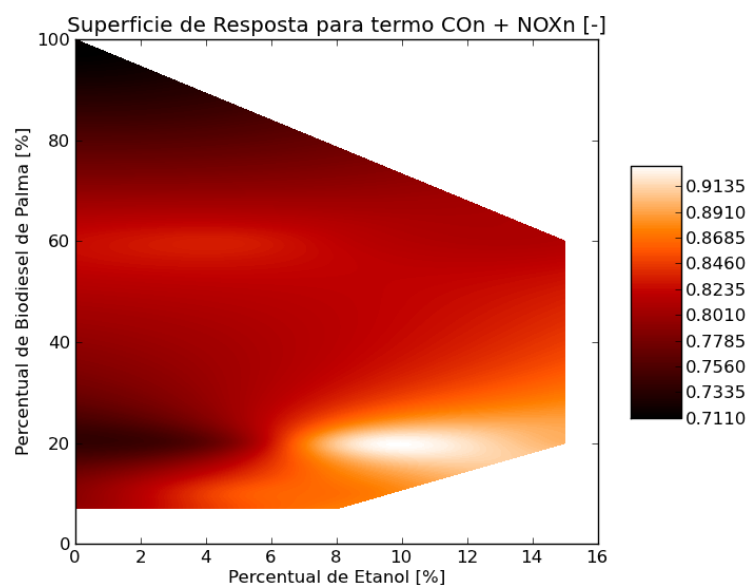


Figura 109 - Superfície de Resposta obtida para o termo CO_n+NO_{xn}.

A superfície de resposta para o termo conjunto do NO_x e CO se aproxima bastante daquela obtida para o CO, provavelmente devido a forma como o termo foi calculado e um maior peso do CO no termo final. Porém podemos perceber o surgimento de um possível máximo local na região próxima dos 60% de biodiesel e 5% de etanol, devido à contribuição do NO_x ao termo.

Uma tabela única com todos os resultados computacionais obtidos para os diferentes cenários pode ser vista na seção 9.8.

6.1. Número de Cetano

No cenário 1 o resultado obtido é de 97,6% de biodiesel e 0% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 12 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 1.

Número de cetano [-]	54,94
Atraso de Ignição [°]	9,44
CO [ppm]	256,33
CO ₂ [%]	10,11
NO _x [ppm]	862,72

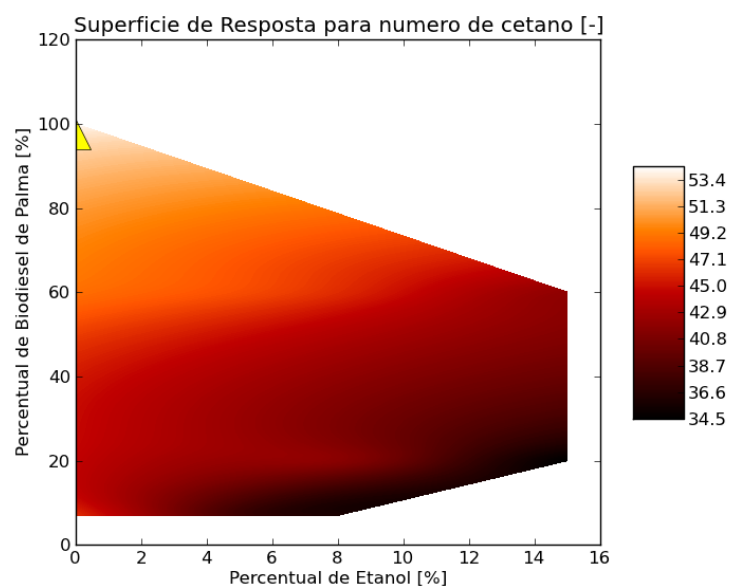


Figura 110 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 1.

No cenário 2 o resultado obtido é de 27,7% de biodiesel e 5,3% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 13 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 2.

Número de cetano [-]	42,96
Atraso de Ignição [°]	13,18
CO [ppm]	361,23
CO ₂ [%]	9,46
NO _x [ppm]	844,54

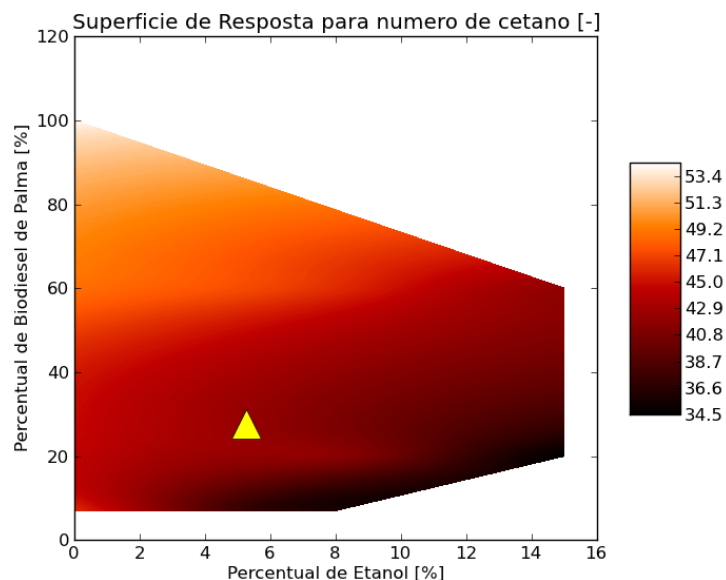


Figura 111 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 2.

No cenário 3 o resultado obtido é de 90,1% de biodiesel e 0% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 14 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 3.

Número de cetano [-]	53,8
Atraso de Ignição [°]	10,09
CO [ppm]	277,37
CO ₂ [%]	10,13
NO _x [ppm]	881,72

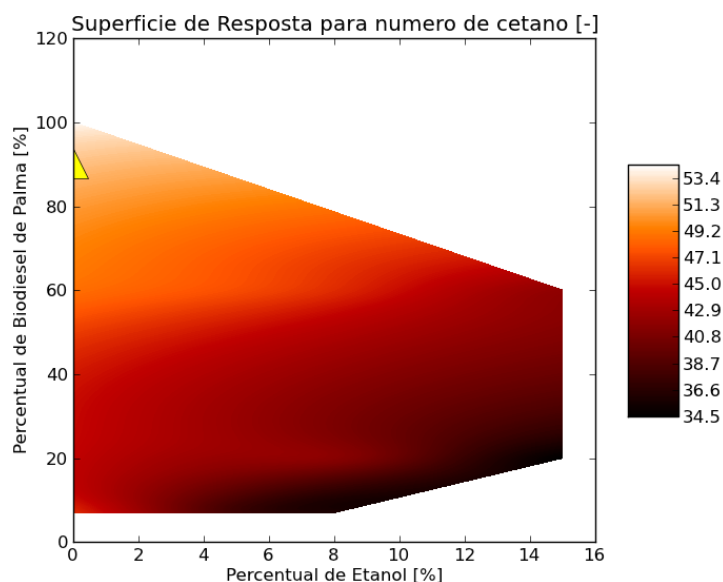


Figura 112 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 3.

No cenário 4 o resultado obtido é de 35,1% de biodiesel e 3,8% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 15 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 4.

Número de cetano [-]	44,09
Atraso de Ignição [°]	12,89
CO [ppm]	366,85
CO ₂ [%]	9,43
NO _x [ppm]	848,00

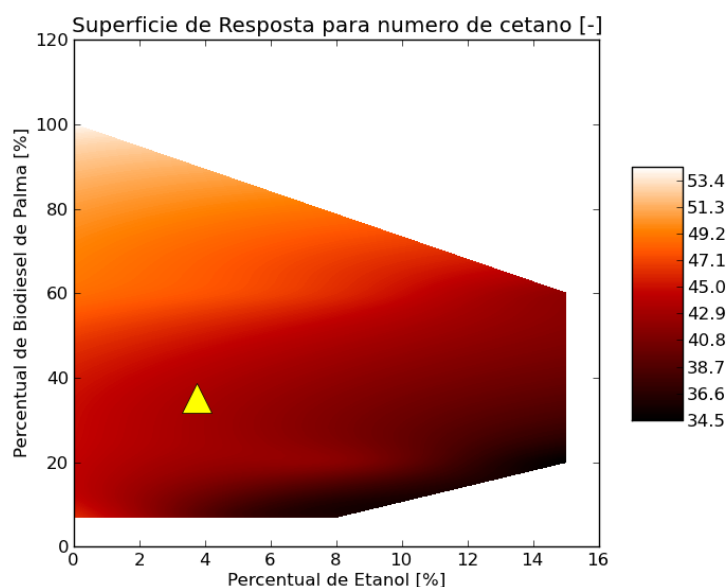


Figura 113 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 4.

Ao visualizar o resultado para o cenário 1 podemos verificar que o mesmo se encontra na região mais clara do gráfico como era esperado quando analisamos a superfície de resposta (lembre-se que o número de cetano precisa ser maximizado). O resultado procura chegar aos 100% de biodiesel onde o maior número de cetano é alcançado, como também é previsto na teoria. Ao passarmos para o cenário número 2 podemos ver que a restrição quanto ao máximo de NO_x que pode ser emitido faz com que o percentual de biodiesel seja reduzido e ocorra um aumento do percentual de etanol, uma vez que a queima do biodiesel favorece a formação do mesmo e o etanol auxilia em seu controle. Ao avaliar o que acontece no cenário número 3 nota-se que a restrição sobre a emissão de CO praticamente não afeta o resultado da otimização se considerada sozinha. Isto acontece porque a emissão de monóxido de carbono para teores elevados de biodiesel e baixo percentual de etanol encontra-se dentro do valor máximo estipulado e o método pode seguir para a zona de máximo global sem impedimentos. Quando consideramos ambas as restrições podemos ver que a presença da restrição sobre o CO emitido altera o comportamento da otimização com relação aquele exibido apenas para a restrição de NO_x. Como as emissões de CO são altas próximas dos 7% de biodiesel e 0% de etanol o método busca uma posição com maior percentual de biodiesel e certa quantidade de etanol. Desta forma o NO_x ainda pode ser controlado e a condição de CO emitido também é respeitada.

6.2. Atraso de Ignição

O resultado para o cenário 5 é de 98,8% de biodiesel e 0% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 16 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 5.

Número de cetano [-]	54,73
Atraso de Ignição [°]	9,44
CO [ppm]	266,86
CO ₂ [%]	10,39
NO _x [ppm]	883,50

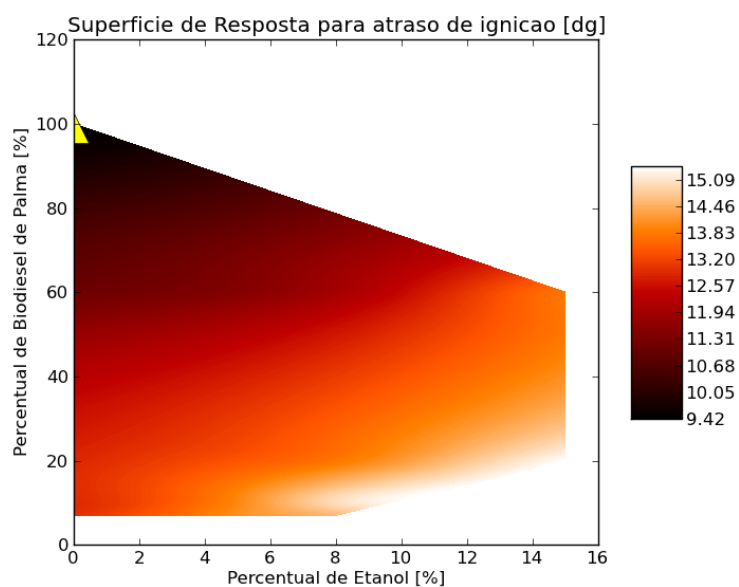


Figura 114 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 5.

O cenário 6 tem como resultado 8,3% de biodiesel e 0% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 17 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 6.

Número de cetano [-]	44,88
Atraso de Ignição [°]	12,92
CO [ppm]	393,21
CO ₂ [%]	10,15
NO _x [ppm]	789,23

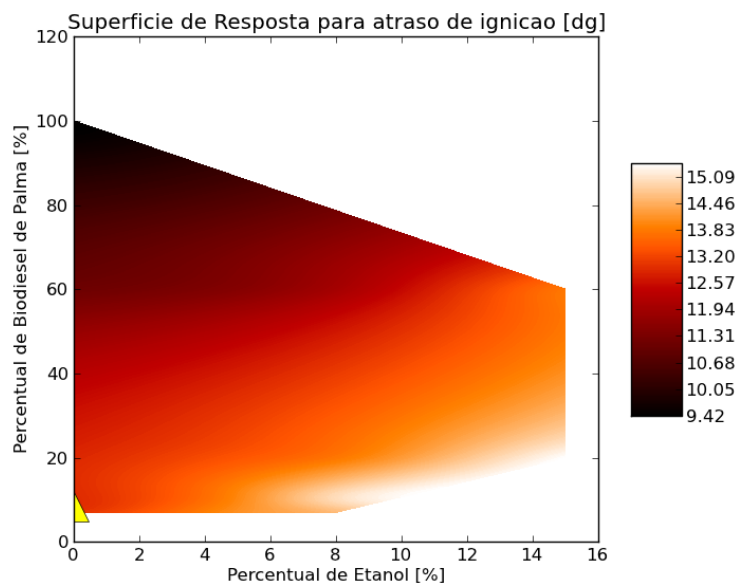


Figura 115 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 6.

No cenário 7 o resultado obtido é de 98,8% de biodiesel e 0% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 18 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 7.

Número de cetano [-]	54,69
Atraso de Ignição [°]	9,43
CO [ppm]	266,80
CO ₂ [%]	10,38
NO _x [ppm]	883,06

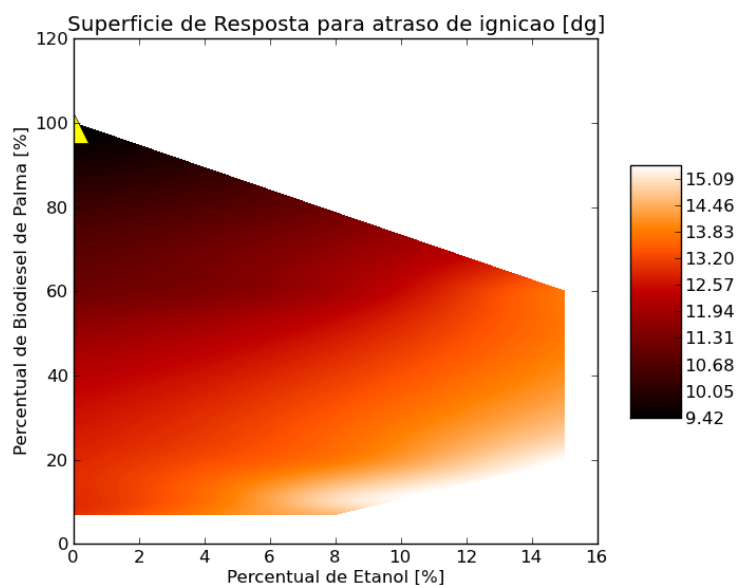


Figura 116 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 7.

No cenário 8 o resultado obtido é de 39,7% de biodiesel e 7% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 19 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 8.

Número de cetano [-]	42,38
Atraso de Ignição [°]	12,97
CO [ppm]	373,59
CO ₂ [%]	9,27
NO _x [ppm]	849,65

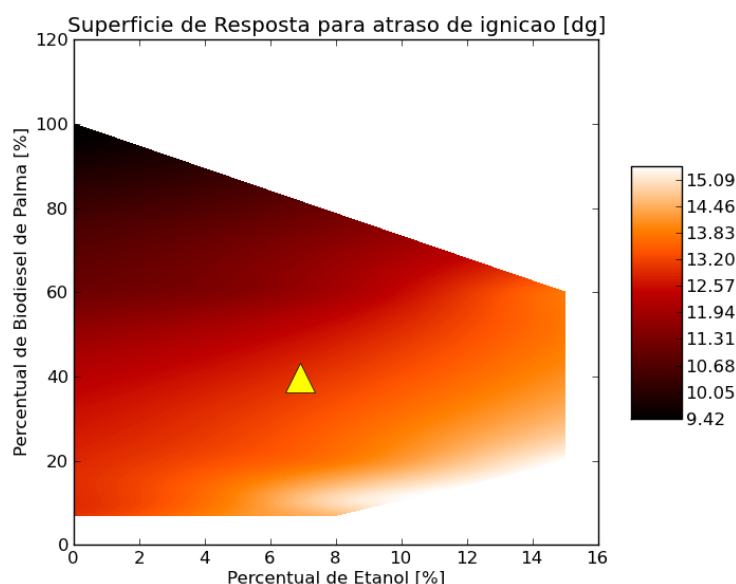


Figura 117 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 8.

O resultado do processo de minimização do atraso de ignição é bastante semelhante à maximização do número de cetano, portanto, resultados semelhantes são esperados. No cenário número 5 podemos ver esta semelhança quando o ponto ótimo também se aproxima dos 100% de biodiesel. Porém no cenário 6 quando imposta a restrição sobre a emissão máxima de NO_x permitida o comportamento torna-se um pouco diferente em relação ao número de cetano. O teor de biodiesel cai chegando ao mínimo de 7%, por outro lado não temos a adição de etanol vista anteriormente para o cetano. A ausência do etanol é compensada por um percentual mais baixo de biodiesel, o que reduz a temperatura de chama e diminui a emissão de NO_x. Avançando para o cenário 7 encontra-se o mesmo comportamento do cenário 3, onde a imposição da restrição de CO máximo emitido não altera, quando considerada de forma isolada, o resultado do processo de otimização. A justificativa para isto ocorrer é a mesma, o ponto de mínimo do atraso de ignição encontra-se na região onde os valores de CO são baixos. No cenário 8, quando ambas as restrições são aplicadas encontra-se uma solução com teor médio de biodiesel (cerca de 40%) e aproximadamente 7% de etanol. Este comportamento difere um pouco daquele do número de cetano assim como entre os cenário 2 e 6, porém ainda parece coerente do ponto de vista teórico e dos dados, isto porque a elevação do percentual de biodiesel para longe dos 7% diminui a emissão de CO e ao mesmo tempo um valor controlado de etanol faz com que o NO_x emitido mantenha-se dentro do limite da restrição. Apesar de possuírem comportamentos similares existem pequenas diferenças nos resultados de número de cetano e atraso que podem motivar a adoção de um caminho diferente para o controle de emissão de pelo método durante a busca do mínimo.

6.3. Emissão de CO

No cenário 9 o resultado obtido é de 98,3% de biodiesel e 0% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 20 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 9.

Número de cetano [-]	54,53
Atraso de Ignição [°]	9,78
CO [ppm]	256,05
CO ₂ [%]	10,35
NO _x [ppm]	881,73

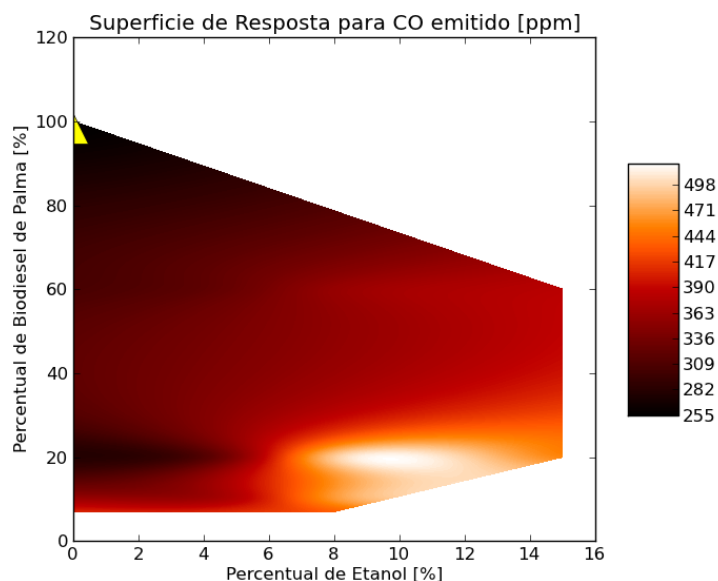


Figura 118 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 9

No cenário 10 o resultado obtido é de 20,8% de biodiesel e 2,9% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 21 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 10.

Número de cetano [-]	43,17
Atraso de Ignição [°]	13,17
CO [ppm]	293,40
CO ₂ [%]	9,73
NO _x [ppm]	838,30

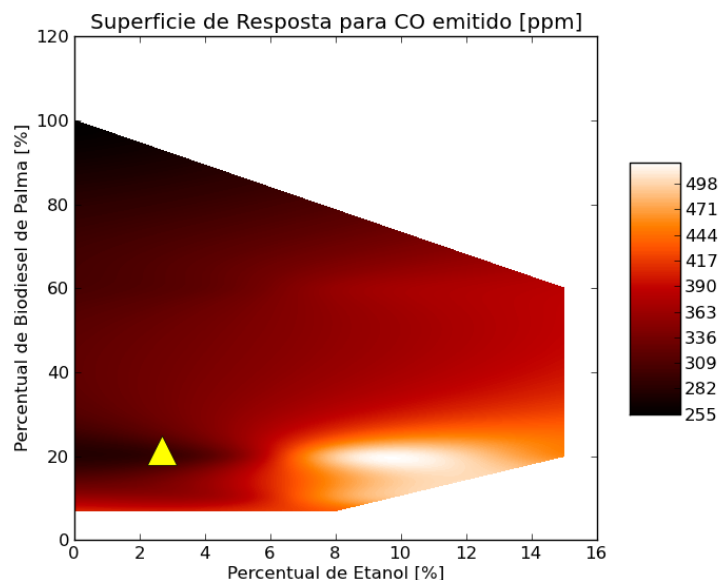


Figura 119 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 10.

No cenário 11 o resultado obtido é de 95,4% de biodiesel e 0,6% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 22 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 11.

Número de cetano [-]	53,60
Atraso de Ignição [°]	9,88
CO [ppm]	259,89
CO ₂ [%]	10,22
NO _x [ppm]	877,79

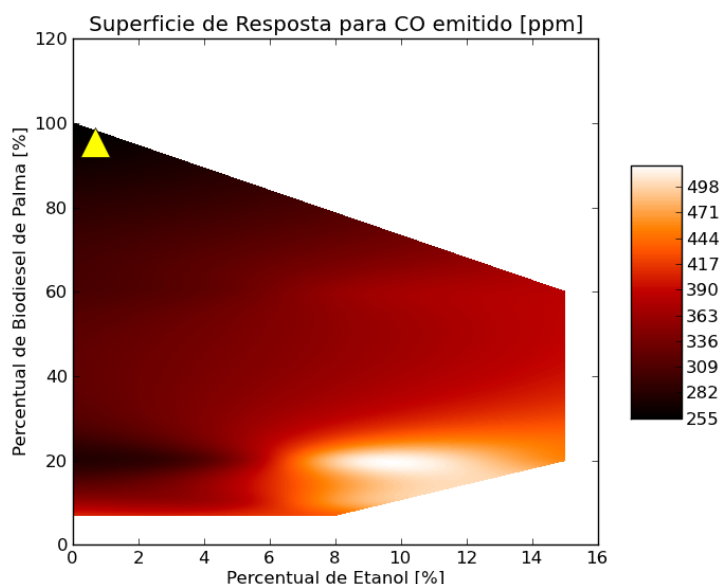


Figura 120 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 11.

No cenário 12 o resultado obtido é de 19,4% de biodiesel e 0% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 23 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 12

Número de cetano [-]	44,25
Atraso de Ignição [°]	13,03
CO [ppm]	280,66
CO ₂ [%]	9,93
NO _x [ppm]	841,30

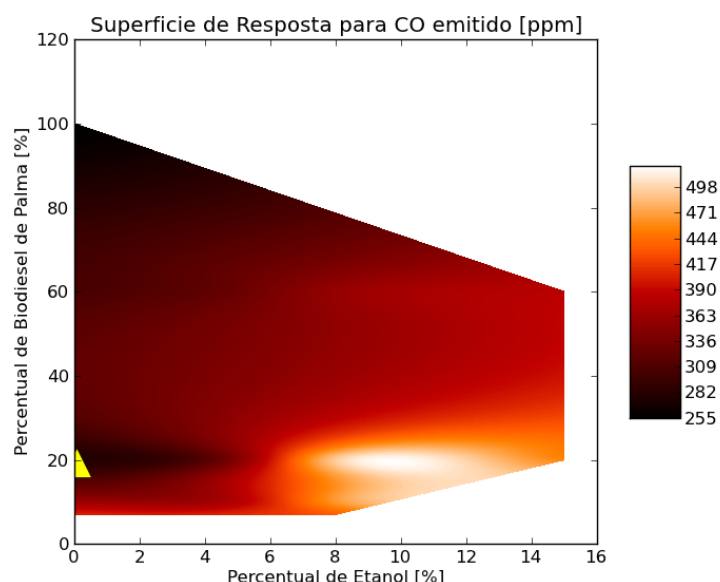


Figura 121 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 12.

Analisando o resultado para o cenário 9 podemos ver que o método busca os 100% de biodiesel como ponto ótimo, ao visualizarmos a superfície de resposta no início dos resultados isto já era esperado por representar a parte mais escura do gráfico. No cenário 10 a restrição sobre a máxima emissão permitida de NO_x faz com que o teor de biodiesel caia, pois como já vimos o biodiesel queima em temperatura mais elevada e facilita a formação deste poluente chegando-se aos 20,8% de biodiesel e 2,9% de etanol. É interessante notar na superfície de resposta que o local onde o ponto ótimo se encontra está em uma faixa mais escura com relação a percentuais maiores ou menores de biodiesel. Quando, no cenário 11, levamos em conta o número de cetano como restrição obtemos o mesmo resultado do cenário 9, pelo mesmo motivo que já foi diversas vezes explicado sobre a localização dos mínimos globais (ou máximo no caso do número de cetano) de ambas as funções coincidirem. Ao aplicar ambas as restrições no cenário 12 o resultado encontrado é próximo àquele do cenário 10, ocorre uma queda no percentual de etanol como forma de o número de cetano permanecer acima dos 40.

6.4. Emissão de CO₂

No cenário 13 o resultado obtido é de 21,3% de biodiesel e 14,5% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 24 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 13.

Número de cetano [-]	35,19
Atraso de Ignição [°]	15,18

CO [ppm]	455,93
CO ₂ [%]	8,81
NO _x [ppm]	831,59

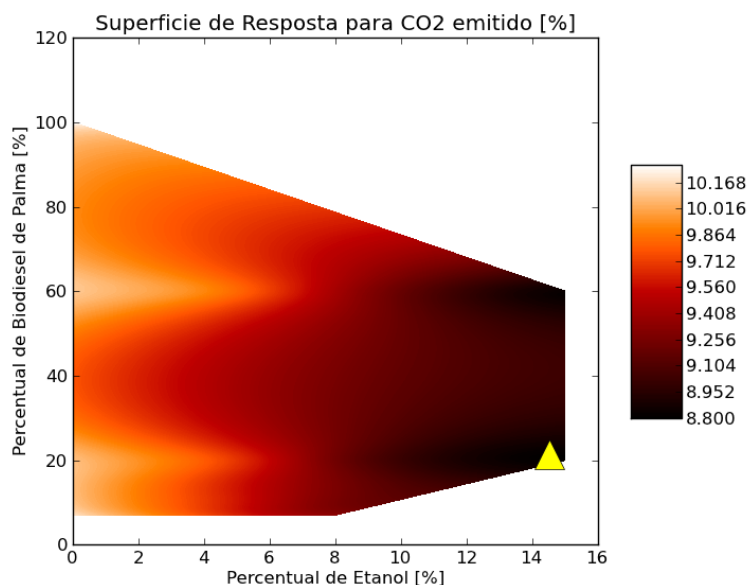


Figura 122 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 13.

No cenário 14 o resultado obtido é de 19,9% de biodiesel e 13,7% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 25 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 14.

Número de cetano [-]	35,45
Atraso de Ignição [°]	15,14
CO [ppm]	471,17
CO ₂ [%]	8,82
NO _x [ppm]	816,08

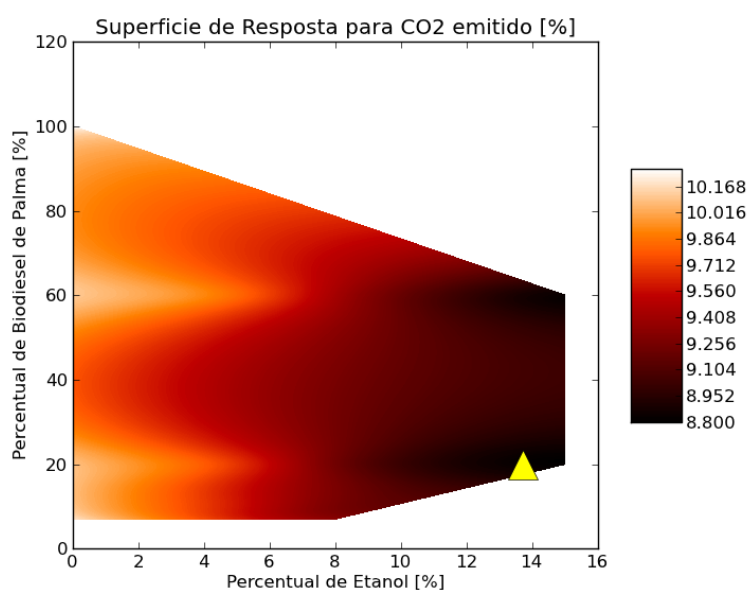


Figura 123 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 14.

No cenário 15 o resultado obtido é de 58,2% de biodiesel e 13,7% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 26 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 15.

Número de cetano [-]	42,32
Atraso de Ignição [°]	13,54
CO [ppm]	381,18
CO ₂ [%]	8,89
NO _x [ppm]	815,67

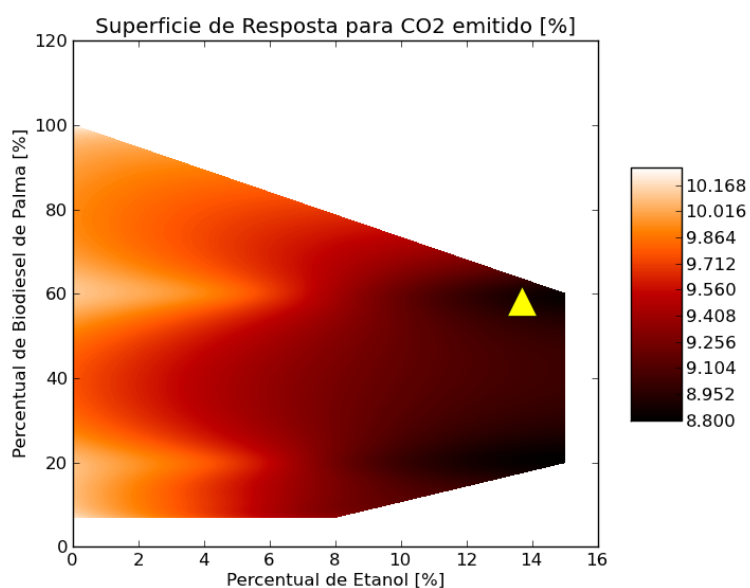


Figura 124 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 15.

No cenário 16 o resultado obtido é de 59,7% de biodiesel e 14,9% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 27 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 16.

Número de cetano [-]	41,97
Atraso de Ignição [°]	13,80
CO [ppm]	383,19
CO ₂ [%]	8,83
NO _x [ppm]	810,02

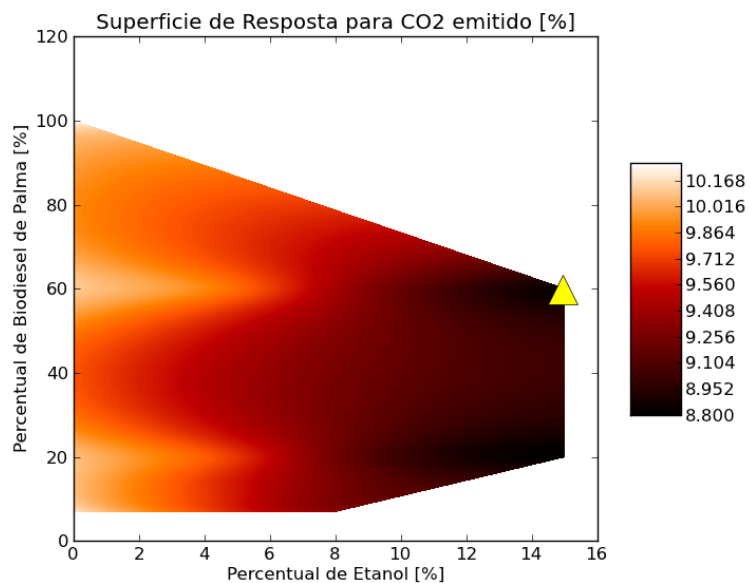


Figura 125 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 16.

No cenário 17 o resultado obtido é de 54,0% de biodiesel e 14,5% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 28 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 17.

Número de cetano [-]	41,80
Atraso de Ignição [°]	13,70
CO [ppm]	384,34
CO ₂ [%]	8,94
NO _x [ppm]	829,30

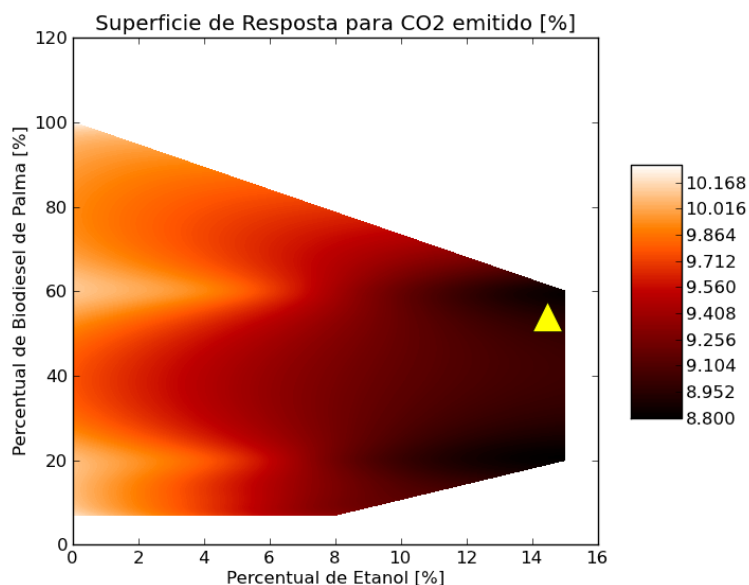


Figura 126 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 17.

No cenário 18 o resultado obtido é de 57,5% de biodiesel e 12,4% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 29 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 18.

Número de cetano [-]	42,92
Atraso de Ignição [°]	13,23
CO [ppm]	377,68
CO ₂ [%]	8,98
NO _x [ppm]	824,37

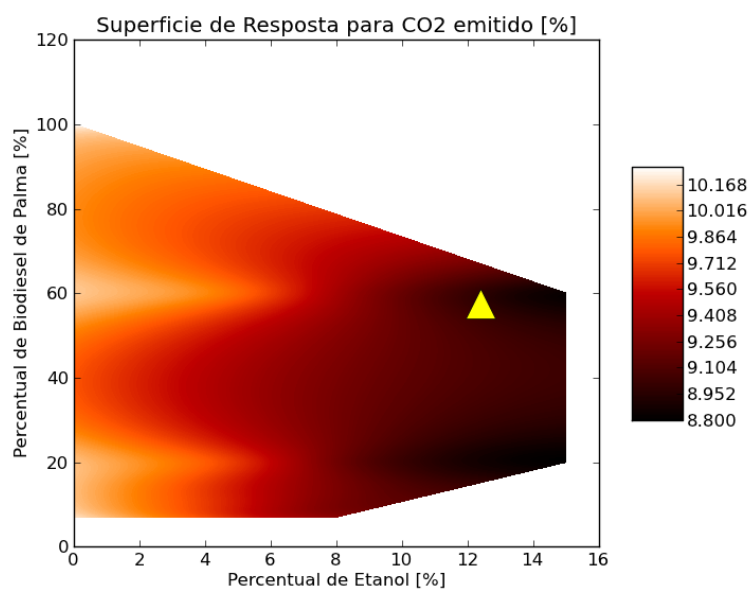


Figura 127 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 18.

No cenário 19 o resultado obtido é de 57,7% de biodiesel e 12,5% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 30 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 19.

Número de cetano [-]	42,89
Atraso de Ignição [°]	13,25
CO [ppm]	377,99
CO ₂ [%]	8,97
NO _x [ppm]	823,08

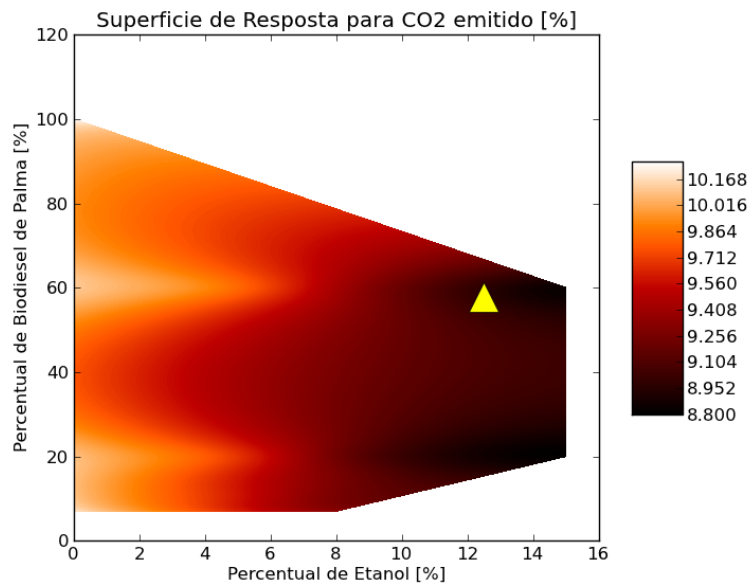


Figura 128 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função.

No cenário 20 o resultado obtido é de 59,2% de biodiesel e 13,1% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 31 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 20.

Número de cetano [-]	42,73
Atraso de Ignição [°]	13,37
CO [ppm]	378,98
CO ₂ [%]	8,92
NO _x [ppm]	816,17

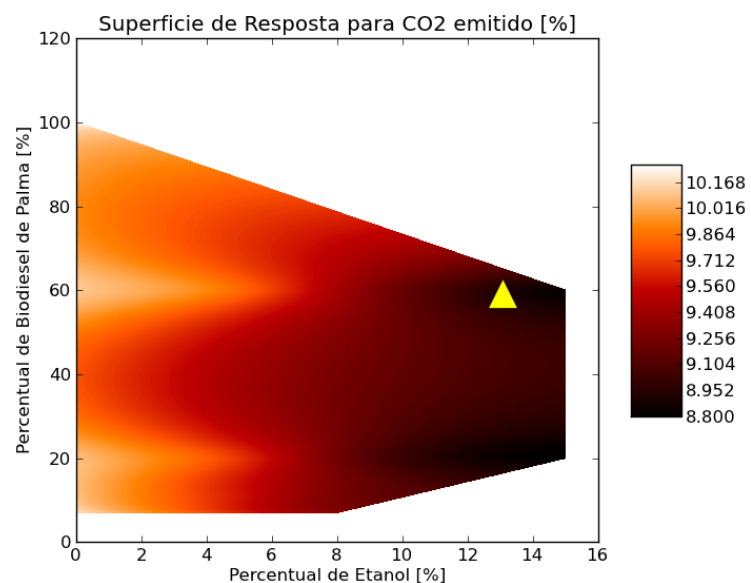


Figura 129 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 20.

Partindo do cenário 13 podemos ver que o ponto ótimo encontrado esta localizado em uma das duas grandes regiões mais escuras da superfície de resposta. A quantidade elevada de etanol traz uma queda no desempenho da combustão e,

portanto, menos CO₂ é gerado, além disso, o percentual menor de biodiesel, e consequentemente maior presença de diesel mineral, faz com que o oxigênio já presente no combustível e que poderia auxiliar no processo de queima seja reduzido. No cenário 14 a restrição sobre a emissão de NO_x quando imposta sozinha não causa nenhum efeito sobre o processo de otimização com relação ao cenário 13, isto é esperado já que para valores tão altos de etanol e valores médios de biodiesel a emissão de NO_x é reduzida. Os cenários de 15 a 20 apresentaram todos resultados próximos, com o percentual do biodiesel próximo dos 60% e o de etanol variando entre 13 a 15%. De certa forma isto é esperado já que vimos anteriormente que a superfície de resposta do número de cetano e da emissão de CO possuem suas regiões de máximo e mínimo global, respectivamente, praticamente sobrepostas. Como a restrição do NO_x pode ser cumprida devido ao elevado percentual de etanol o processo de otimização nos leva a segunda região mais escura da superfície de resposta, se aproximando de valores mais altos de biodiesel onde o número de cetano é maior e a emissão de CO menor.

6.5. Emissão de NO_x

No cenário 21 o resultado obtido é de 10,8% de biodiesel e 10,4% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 32 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 21.

Número de cetano [-]	35,60
Atraso de Ignição [°]	15,40
CO [ppm]	499,75
CO ₂ [%]	9,13
NO _x [ppm]	725,04

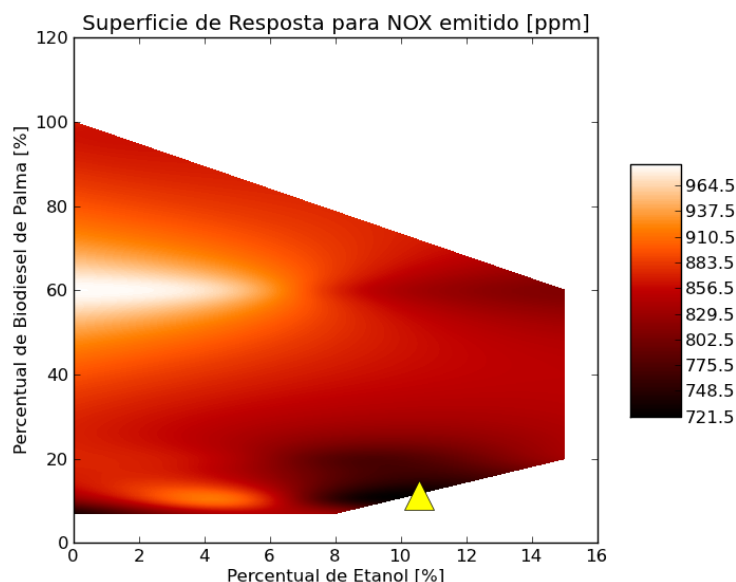


Figura 130 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 21.

No cenário 22 o resultado obtido é de 8,4% de biodiesel e 1,0% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 33 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 22.

Número de cetano [-]	44,06
----------------------	-------

Atraso de Ignição [°]	13,06
CO [ppm]	382,57
CO ₂ [%]	10,01
NO _x [ppm]	793,16

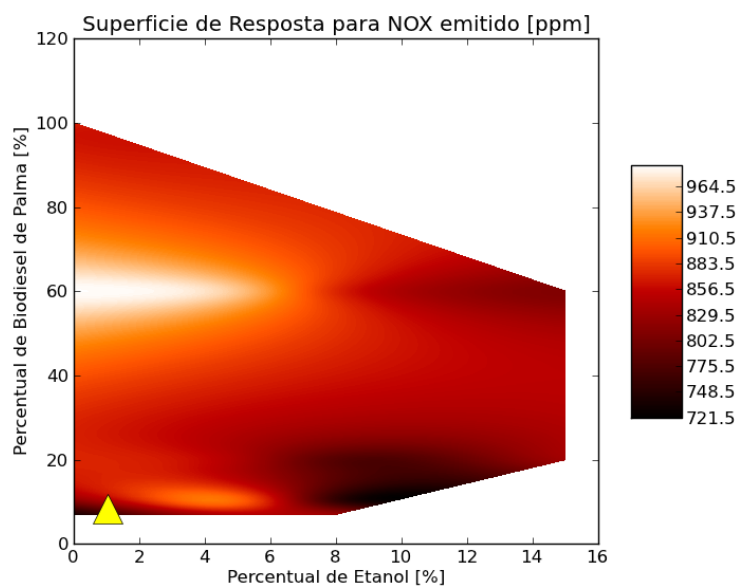


Figura 131 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 22.

No cenário 23 o resultado obtido é de 62,6% de biodiesel e 13,0% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 34 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 23.

Número de cetano [-]	43,64
Atraso de Ignição [°]	13,11
CO [ppm]	372,61
CO ₂ [%]	9,01
NO _x [ppm]	823,50

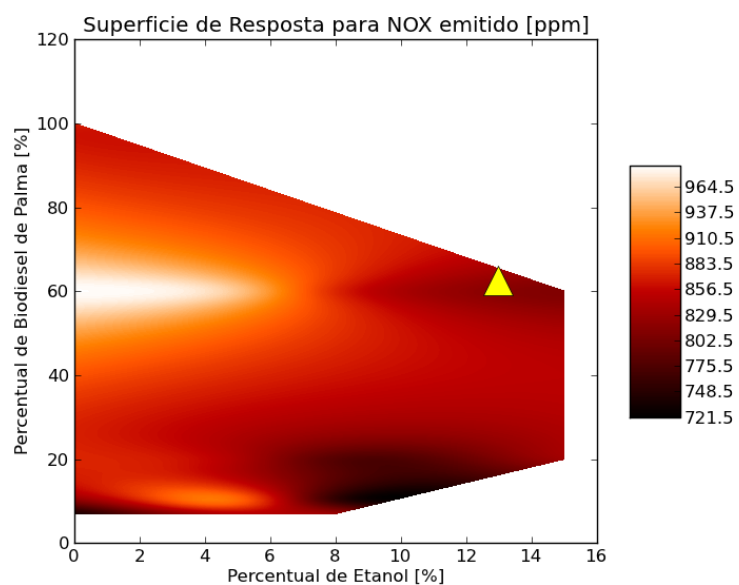


Figura 132 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 23.

No cenário 24 o resultado obtido é de 60,4% de biodiesel e 12,7% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 35 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 24.

Número de cetano [-]	43,15
Atraso de Ignição [°]	13,23
CO [ppm]	376,71
CO ₂ [%]	8,95
NO _x [ppm]	817,75

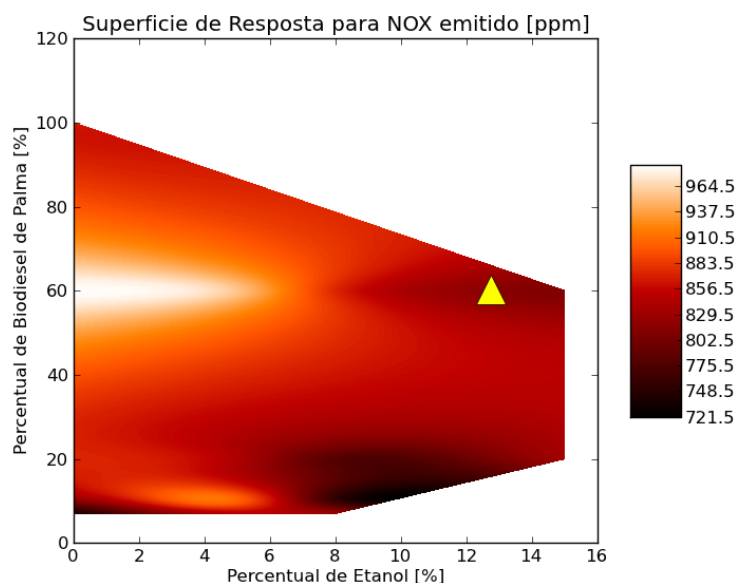


Figura 133 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 24.

Para a otimização da emissão de NO_x no cenário 21 quando não possui nenhuma restrição o resultado encontrado possui um elevado teor de etanol enquanto procura manter baixo percentual de biodiesel, algo que faz sentido do ponto de vista da redução da temperatura de chama. Quando aplicamos a restrição sobre o CO emitido o percentual de etanol despenca e a solução se encontra próxima ao diesel comercial B7, uma vez que a emissão de CO é maior com o aumento do etanol (pois a combustão se torna mais ineficiente). Ao aplicarmos a restrição quanto ao número de cetano no cenário 23 vemos que a resposta encontra-se na elevação do percentual de biodiesel, o que é correto, porém se comparamos com os resultados do cenário 22 vemos que esta condição já se encontrava satisfeita e o resultado para o NO_x é melhor, logo o resultado obtido no cenário 23 é um mínimo local. Finalmente no cenário 24 ao aplicar ambas as restrições vemos que caímos no mesmo mínimo local do caso 23, isto porque o local de mínimo global é cercado por valores muito elevados de NO_x que dificultam sua procura pelo método.

6.6. Termo normalizado CO + NO_x

No cenário 25 o resultado obtido é de 98,2% de biodiesel e 0% de etanol. Os demais resultados seguem:

Tabela 36 - Resultados obtidos para a otimização do cenário 25.

Número de cetano [-]	53,66
Atraso de Ignição [°]	9,43

CO [ppm]	256,06
CO ₂ [%]	10,14
NO _x [ppm]	863,32

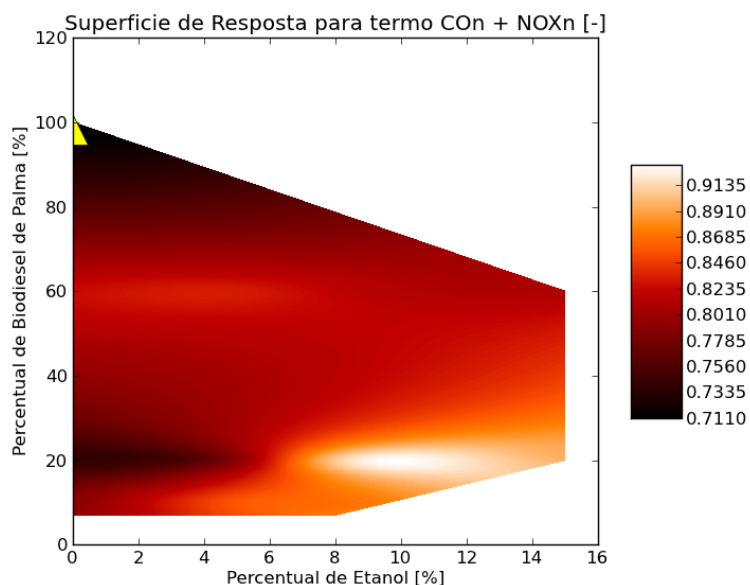


Figura 134 - Ponto ótimo encontrado com relação à superfície de resposta da função para o cenário 25.

A primeira coisa fácil de perceber é que a superfície de resposta se assemelha muito mais àquela encontrada para a emissão de CO do que a do NO_x. Ainda assim podemos ver diferenças na superfície obtida, próximo dos 60% de biodiesel e 5% de etanol há o surgimento de uma área de máximo local, decorrente da área de máximo da superfície de resposta do NO_x emitido. Dito isto, o resultado obtido na busca é bastante próximo dos 100% de biodiesel, algo que não é muito bom sob o ponto de vista da emissão de NO_x. Este termo foi utilizado apenas com um teste e mostra a importância no cuidado que se deve ter quando agrupamos mais de um parâmetro sem a devida atenção, aqui o comportamento do CO dominou a superfície gerada, e por consequência o processo de otimização acaba sendo o mesmo de quando consideramos apenas o CO.

7. Conclusão

De uma forma geral os ensaios experimentais realizados apresentaram resultados condizentes com aqueles esperados. O aumento do percentual de biodiesel causou aumento no número de cetano e redução do atraso de ignição, por outro lado, a presença do etanol em grandes quantidades pode ser altamente prejudicial ao desempenho do motor sob o ponto de vista do seu processo de combustão, resultando em número de cetano muito baixo e grande atraso de ignição. Ainda assim a presença do etanol se mostrou favorável para o controle de certos tipos de poluentes como o CO_2 e NO_x . A emissão de CO mostrou redução quando o percentual de biodiesel da amostra se torna maior, uma vez que, como previsto, a combustão torna-se mais completa além de o próprio combustível já ser oxigenado, aumentando a quantidade de oxigênio disponível. Apesar de este último efeito também ser encontrado no etanol o aumento da sua concentração causa, de uma forma geral, uma elevação na emissão de CO, isto porque sua presença afeta negativamente o processo de combustão, dificultando que o mesmo ocorra de forma completa. O uso do biodiesel como emulsificador da mistura do diesel e etanol foi verificado, permitindo teores de até 15% de etanol. Porém amostras com pequena quantidade de biodiesel como 10 e 7% apresentaram separação de fases e não puderam ser ensaiadas. Além disso, mesmo com elevadas quantidades de etanol a emissão de NO_x para as misturas ternárias ainda se encontra superior a do diesel comercial efeito provocado pela presença do biodiesel em grande quantidade. Não foi possível avaliar o efeito sobre a emissão de SO_2 , mas é esperado que o aumento do percentual de biodiesel e etanol façam com que este tipo de poluente diminua, devido aos mesmos não possuírem enxofre em sua composição.

Quanto à implementação computacional da otimização, a conclusão que podemos chegar com base nos resultados obtidos e nas superfícies de resposta geradas é de que a mesma funcionou de acordo com o esperado em todos os casos testados. Além disso, mostrou-se bastante flexível quanto ao tipo e número de restrições que poderiam ser inseridas no processo de otimização. Estas restrições podem ser alteradas de acordo com a necessidade do usuário, mudando-se os parâmetros da restrição, valor de comparação, etc. O tempo computacional para a população adotada mostrou-se bastante satisfatório levando apenas poucos segundos para que o resultado final fosse encontrado. Sendo assim pode-se dizer que o objetivo de realizar a otimização de misturas ternárias com base em dados experimentais foi cumprido com sucesso. A otimização apresentada pode então ser utilizada na determinação de novas amostras que precisem seguir características específicas quanto ao número de cetano, emissões, etc. A malha energética pode-se tornar mais bem distribuída entre fontes não renováveis e renováveis, reduzindo a dependência de importações de derivados do petróleo e melhorando a saúde das populações com a redução dos poluentes liberados nas grandes cidades.

Do ponto de vista de trabalhos futuros seria interessante a obtenção dos dados de potência e torque do motor para as diferentes amostras. Assim seria possível fazer uma análise mais completa do desempenho obtido com cada uma, sua faixa de aplicação, eficiência, etc. Além disso, o uso de água em pequena quantidade nas amostras também pode ser feito, como forma de reduzir ainda mais alguns tipos de emissões de poluentes. Por fim a captura e análise do material particulado gerado também poderia ser feita, o que tornaria a análise de poluentes mais completa.

8. Referências Bibliográficas

- [1] Ministério de Minas e Energia, “Resenha Energética Brasileira,” Brasília, 2015.
- [2] MechTech, “Mechanical Technology: Four Stroke Cycle Diesel Engine,” Dezembro 2013. [Online]. Available: <http://4mechtech.blogspot.com.br/2013/12/four-stroke-cycle-diesel-engine.html>. [Acesso em 10 Janeiro 2016].
- [3] J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Education, 1988.
- [4] S. C. A. d. Almeida, *Câmaras de Combustão*, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- [5] M. A. Pasqualetto, J. J. M. Antunes, D. S. N. Vieira, M. J. Colaço e A. K. Leiroz, “Métodos para a Determinação do Atraso de Ignição em um Motor Marítimo Diesel Operando com Óleo Diesel Marítimo,” em *Anais do VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Uberlândia, 2014.
- [6] Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, “PORTARIA No 75, DE 5 DE MARÇO DE 2015,” 5 Março 2015. [Online]. Available: www.anp.gov.br/?dw=74502. [Acesso em 15 Dezembro 2015].
- [7] Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, “RESOLUÇÃO ANP Nº 19, DE 15.4.2015 - DOU 16.4.2015 - REPUBLICADA DOU 17.4.2015 - REPUBLICADA DOU 20.4.2015,” 15 4 2015. [Online]. Available: http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2015/abril/ranp%2019%20-%202015.xml. [Acesso em 2016 Janeiro 10].
- [8] H. R. Lobianco, *Estudo Experimental do Uso de Misturas Combustíveis Ternárias em um Motor CFR/ ASTM*, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: Escola Politécnica, UFRJ, 2014.
- [9] K. Wattanavichen e A. Azetsu, *Studies of Visualized Diesohol Combustion Phenomena in IDI Engine*, Bangkok: Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.
- [10] Y. Cruz, *Combustíveis alternativos: mistura de etanol anidro ao óleo diesel para motores de ciclo diesel com sistema de injeção de bomba rotativa*, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2009.
- [11] J. L. B. Borges, *Avaliação de Desempenho de um Motor de Ciclo Diesel Alimentado por Misturas Ternárias de Biocombustíveis Contendo Biodiesel, Etanol e Óleo Vegetal*, Londrina, Paraná: Universidade Estadual de Londrina, 2009.
- [12] Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, “RESOLUÇÃO ANP Nº 50, DE 23.12.2013 - DOU 24.12.2013,” 23 12 2013. [Online]. Available: http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2013/dezembro/ranp%2050%20-%202013.xml. [Acesso em 10 Fevereiro 2016].

- [13] E. J. S. Parente, Biodiesel: Uma aventura tecnológica num país engraçado,, Fortaleza, 2003.
- [14] E8, "Wikimedia," 12 6 2007. [Online]. Available: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4c/Biodiesel_Reaction2.gif. [Acesso em 13 2 2016].
- [15] C. E. S. Volpato, A. P. Conde, J. A. Barbosa e e. al, "Desempenho demotor diesel quatro tempos alimentado com biodiesel de óleo de soja (B 100)," *Ciênc. agrotec., Lavras*, v. 33, n. 4, pp. 1125-1130, 2009.
- [16] Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, "RESOLUÇÃO ANP Nº 45, DE 25.8.2014 - DOU 26.8.2014," 25 8 2014. [Online]. Available: http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2014/agosto/ranp%2045%20-%202014.xml. [Acesso em 20 Janeiro 2016].
- [17] I. A. Vioculescu e G. L. Borman, "An Experimental Study of Diesel Engine Cylinder-Averaged NOX Histories," *SAE paper 780228*, *SAE Trans.*, vol 87, 1978.
- [18] S. H. Mansouri, J. B. Heywood e K. Radhakrishnan, "Divided-Chamber Diesel Engine, Part I: Cycle Simulation Which Predicts Performance and Emissions," *SAE paper 820273*, *SAE Trans.*, vol 91, 1982.
- [19] X. Liu e D. B. Kitterlson, "Total Cylinder Sampling from a Diesel Engine (Part II)," *SAE paper 780227*, *SAE Trans.*, vol 87, 1978.
- [20] S. L. Plee, J. P. Myers e T. Ashmed, "Flame Temperature Correlation for the Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Particulate and NOX Emissions," *SAE paper 811195*, *SAE Trans.*, vol90, 1981.
- [21] S. L. Plee, T. Ahmad e J. P. Myers, "Diesel NOX Emissions - A Simple Correlation Technique for Intake Air Effects," *Proceedings of Nineteenth International Symposium on Combustion*, 1983.
- [22] M. Lapuerta, O. Armas e R. Garca-Contretras, "Stability of diesel bioethanol blends for use in diesel engines," *Fuel*, v. 86, pp. 1351-1357, 2007.
- [23] M. Abu-Qudais, O. Haddad e M. Qudaisat, "The effect of alcohol fumigation on diesel engine performance and emissions," *Energy Conversion & Management*, v. 41, pp. 389-399, 2000.
- [24] Koike e e. al, "Emissão dos Gases de Combustão em Motor de Ignição por Compressão: Ensaio Comparativo entre Diesel, Biodiesel com Injeção de Etanol," *Revista Minerva*, vol. 7, pp. 11-18, 2010.
- [25] US Energy Information Administration, "Annual Energy Outlook 2012," Junho 2012. [Online]. Available: <http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383%282012%29.pdf>.
- [26] J. Lin, G. Gaustad e T. A. Trabold, "Profit and policy implications of producing biodiesel-ethano-diesel fuel blends to specification," *Applied Energy*, vol.104, pp. 936-944, 2013.

- [27] A. Atmanli, B. Yuksel, E. Ileri e A. D. Karaoglan, "Response surface methodology based optimization of diesel-n-butanol-cotton oil ternary blend ratios to improve engine performance and exhaust emission characteristics," *Energy Conversion and Management*, pp. 383-394, 2015.
- [28] G. Bohling, "Kriging," 19 Outubro 2005. [Online]. Available: <http://people.ku.edu/~gbohling/cpe940/Kriging.pdf>. [Acesso em 18 Agosto 2015].
- [29] R. L. Hardy, "Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces," *J. Geophys. Res.* 176, pp. 1905-1915, 1971.
- [30] E. J. Kansa, "Multiquadrics – a scattered data approximation scheme with applications to computational fluid dynamics –II: solutions to parabolic, hyperbolic and elliptic partial differential equations," *Comput. Math. Appl.* 19, pp. 149-161, 1990.
- [31] G. E. Fasshauer, "Solving Partial Differential Equations by Collocation with Radial Basis Function, Surface Fitting and Multiresolution Methods," *A. Le Méhauté, C. Rabut, and L.L. Schumaker (eds)*, pp. 131-138, 1997.
- [32] M. J. Colaço, G. S. Dulikravich e D. Sahoo, "A Response Surface Method Based Hybrid Optimizer," *Inverse Problems in Science & Engineering*, vol.16, pp. 717-742, 2008.
- [33] L. L. C. Silva, *Simulação dos Processos Termodinâmicos em Motores de Combustão Interna – Ciclo Diesel*, USP, 1992.
- [34] J. Kennedy e R. C. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," em *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*, 1995.
- [35] M. J. Colaço, H. R. B. Orlande e G. S. Dulikravich, "Inverse and Optimization Problems in Heat Transfer," *Journal of the Brazilian Society of MEchanical and Sciences Engineering*, vol XXVIII, 2006.
- [36] Robert Bosch Brasil S.A, "Bombas Injetoras em linha," São Paulo, 2000.
- [37] ASTM, "Standard Test Method for Ignition Quality of Diesel Fuels By the Cetane Method," 1985.
- [38] U.S. Department of Energy, "Biodiesel Blends," [Online]. Available: http://www.afdc.energy.gov/fuels/biodiesel_blends.html. [Acesso em 22 Janeiro 2016].
- [39] L. M. Faria, *Estudo Experimental do Impacto da Adição de Biodiesel ao Óleo Diesel Marítimo*, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: Escola Politécnica, UFRJ, 2015.
- [40] D. S. N. Vieira, *Projeto: Métodos Computacionais de Simulação e Problemas Inversos Aplicados A Motores de Combustão Interna*, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: Escola Politécnica, UFRJ, 2014.
- [41] D. S. N. Vieira, *Otimização De Motores De Combustão Interna Através De Métodos Sem Malha*, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: Escola Politécnica, UFRJ, 2014.

- [42] IBAMA, "Programas de Controle de Emissões Veiculares," 2015. [Online]. Available: <http://www.ibama.gov.br/areas-tematicas-qa/programa-proconve>. [Acesso em 10 Fevereiro 2016].

9. APÊNDICES

9.1. Apêndice A – Número de Cetano Tabelado

POSIÇÃO DO VOLANTE x N° DE CETANO DO MOTOR CFR DO LMT/PMU / COPPEI											
LEITURAS COM OS INCHOS	POSIÇÃO DO VOLANTE	NÚMERO DE CETANO ESTIMADO	NÚMERO DE CETANO COM INCHOS	DIFERENÇA EM PERCENTUAL		LEITURAS COM OS INCHOS	POSIÇÃO DO VOLANTE	NÚMERO DE CETANO ESTIMADO	NÚMERO DE CETANO COM INCHOS	DIFERENÇA EM PERCENTUAL	
1	900	21,5	21,5	0,00%			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				4	1503	38,5	38,3	>0,5%	
	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				5	1545	43,4	43,4	0,00%	
	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				6	1596	49,8	49,5	>0,6%	
	1070	25,2					1600	50,5			
	1080	25,4					1610	52,5			
	1090	25,6					1620	54,4			
	1100	25,8				7	1622	54,8	55,1	<0,5%	
	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				8	1667	60,5	60,8	<0,5%	
	1160	26,8					1670	60,8			
	1170	26,9					1680	61,7			
	1180	27,1					1690	62,5			
2	1187	27,2	27,1	>0,4%			1700	63,3			
	1190	27,2					1710	64,1			
	1200	27,3					1720	65			
	1210	27,5					1730	65,7			
	1220	27,6				9	1740	66,4	66,4	0,00%	
	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				10	1807	71,4	72,0	<0,8%	
	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			
3	1437	33,3	32,7	>1,8%			1950	74,7			
	1440	33,6					1960	74,8			
	1450	34,2				11	1964	74,8	74,8	0,00%	

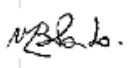
9.2. Apêndice B – Especificação TESTO 350XL

Power	Rechargeable NiMH battery, up to 2 hours continuous operation or 115 VAC
Oxygen:	Range: 0 to 21% volume Resolution: 0.1% volume Accuracy: 2% of m.v
Carbon Monoxide:	Range: 0 to 10,000ppm (H2S compensated Resolution: 1ppm Accuracy: 5ppm (0 - 99ppm), 5% m.v (100 - 2,000ppm), 10% m.v (2,001 - 10,000ppm)
Nitrogen Oxide:	Range: 0 to 3,000ppm Resolution: 1ppm Accuracy: 5ppm (0 - 99ppm), 5% m.v (100 - 2,000ppm), 10% m.v (2,001 - 10,000ppm)
Nitrogen Dioxide:	Range: 0 to 500ppm Resolution: 0.1ppm Accuracy: 5ppm (0 - 99ppm), 5% m.v (100 - 500ppm)
Sulphur Dioxide:	Range: 0 to 500ppm Resolution: 0.1ppm Accuracy: 5ppm (0 - 99ppm), 5% m.v (100 - 500ppm)
Temperature:	Range: -40°C to + 600°C Accuracy: 0.5°C (-40°C to +99°C), 0.5% m.v (+100°C to +1,200°C)
Carbon Dioxide:	Range: 0 to CO2 max volume % Resolution: 0.1% volume Accuracy: Calculated from Oxygen
Efficiency:	Range: 0 to 100%
Power:	Rechargeable NiMH (2hours operation) or 240V AC mains

9.3. Apêndice C – Tabela de Volume necessário de Diesel, Biodiesel e Etanol para cada amostra

Amostras	Diesel [L]	Biodiesel [L]	Etanol [L]
B7	3,0000	0,0000	0,0000
B7E5	2,8387	0,0113	0,1500
B7E8	2,7419	0,1081	0,1500
B10E5	2,4194	0,4306	0,1500
B10E8	1,1290	1,7210	0,1500
B10E15	2,7419	0,0181	0,2400
B20E5	2,6452	0,1148	0,2400
B20E8	2,3226	0,4374	0,2400
B20E15	1,0323	1,7277	0,2400
B60E5	2,4194	0,1306	0,4500
B60E8	2,0968	0,4532	0,4500
B60E15	0,8065	1,7435	0,4500
B100	0,0000	3,0000	0,0000

9.4. Apêndice D – Caracterização Biodiesel de Soja

		COPPEComb Centro de Pesquisa e Caracterização de Petróleo e Combustíveis	
		CERTIFICADO DE ENSAIO	
Emissão: 10/02/2010 REV00 Pág. 1de1			
SOLICITANTE: Daniel Santana		Data da Solicitação :	
Endereço:		10/09/2015	
Identificação da amostra: Biodiesel de Soja B100		Volume recebido: 1 L	
RESULTADO			
Características	Norma Utilizada	Especificação ANP	Resultado
Teor de Água, mg/Kg	ASTM D6304	200	733
Índice de Acidez Total, mgKOH/g, máx.	ASTM D664	0.5	0.16
Ponto de Fulgor, °C, mín.	ASTM D 93	100	193.6
Viscosidade Cinemática a 40° C, mm²/s	ASTM D7042	3,0 a 6,0	4.24
Massa específica, Kg/m³	ASTM D4052	850 a 900	881.4
Cinzas Sulfatadas, % massa, máx.	ASTM D482	0.02	0.009
Resíduo de Carbono, % m/m	ASTM D524	NA	0.02
Estabilidade Oxidativa, H, Min.	EN12114	6H	>8
Observação: O Teor de Água está acima do limite estabelecido pela ANP. O ensaio de Resíduo de Carbono não faz parte do escopo da ANP para especificação do Biodiesel, mas o valor obtido nesta amostra, está abaixo do limite máximo exigido na especificação do Diesel que é de 0,25% m.			
Emissão: 22/09/2015			
			
Gerente Técnico: Marcileny B. Porto - CRQ 3ª 03415130			
Responsável Técnico: Beatriz Cohen Chaves (CRQ 3ª - 033017198)			
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: 3938-8153			

9.5. Apêndice E – Caracterização do Biodiesel de Palma

		COPPEComb	
		CENTRO DE PESQUISAS E CARACTERIZAÇÃO DE PETRÓLEO E COMBUSTÍVEIS	
CERTIFICADO DE ENSAIO			
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	
RESULTADOS			
Características	Norma Utilizada	Resultado	
Viscosidade Cinemática a 40°C, mm ² /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		
		Marcileny B. Porto Gerente Técnico CRQ 3ª 03415130	
Responsável Técnico: Beatriz Cohen Chaves (CRQ 3ª - 033017198)			
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			

9.6. Apêndice F – Dados dos Ensaio de Cetano

-----	B100	B7	B60E5	B20E5
Operador	Nauberto/Daniel	Nauberto/Daniel	Nauberto/Daniel	Nauberto/Daniel
Temp. do ar de admissão ± 1 (°F)	148	149	147	150
Temp do bico injetor ± 1 (°F)	99	100		100
Temp do óleo lubrificante ± 2 (°F)	112	123	118	120
Tempo de consumo 13ml ± 1 (seg.)	60	60	61	61
Posição da cremalheira ± 1 (mm)	720	700	720	710
Posição avanço da injeção $\pm 0,02$ (mm)	11,65	12,08	12,42	11,90
Posição do volante ± 1 (mm)	1620	1570	1580	1535
Atraso de Ignição $\pm 0,2$ (°)	13	13	13	13
Avanço de Injeção $\pm 0,1$ (°)	13	13	13	13
Número de Cetano ± 1 (-)	54,4	46,1	47,4	42,2
Cuba (-)	1	1	1	1
Data do Ensaio (DD/MM/AAAA)	16/03/2016	16/03/2016	16/03/2016	16/03/2016
Hora (HH:MM)	11:00	14:59	11:15	11:28
-----	B10E5	B60E8	B7E5	B20E8
Operador	Nauberto/Daniel	Nauberto/Daniel	Nauberto/Daniel	Nauberto/Daniel
Temp. do ar de admissão ± 1 (°F)	149	150	150	150
Temp do bico injetor ± 1 (°F)	100	100	101	100
Temp do óleo lubrificante ± 2 (°F)	124	124	126	110
Tempo de consumo 13ml ± 1 (seg.)	60	60	59	61
Posição da cremalheira ± 1 (mm)	700	710	700	707
Posição avanço da injeção $\pm 0,02$ (mm)	12,14	11,60	12,06	11,81
Posição do volante ± 1 (mm)	1500	1570	1495	1530
Atraso de Ignição $\pm 0,2$ (°)	13	13	13	13
Avanço de Injeção $\pm 0,1$ (°)	13	13	13	13
Número de Cetano ± 1 (-)	38,2	46,1	37,7	41,6
Cuba (-)	1	1	1	1
Data do Ensaio (DD/MM/AAAA)	16/03/2016	16/03/2016	16/03/2016	16/03/2016
Hora (HH:MM)	11:40	11:52	12:07	14:07

-----	B10E8	B7E8	B60E15	B20E15
Operador	Nauberto/Daniel	Nauberto/Daniel	Nauberto/Daniel	Nauberto/Daniel
Temp. do ar de admissão ± 1 (°F)	149	150	149	149
Temp do bico injetor ± 1 (°F)	100	100	100	100
Temp do óleo lubrificante ± 2 (°F)	112	116	119	120
Tempo de consumo 13ml ± 1 (seg.)	60	60	61	60
Posição da cremalheira ± 1 (mm)	700	703	703	700
Posição avanço da injeção $\pm 0,02$ (mm)	11,78	11,8	11,91	11,8
Posição do volante ± 1 (mm)	1475	1475	1538	1455
Atraso de Ignição $\pm 0,2$ (°)	13	13	13	13
Avanço de Injeção $\pm 0,1$ (°)	13	13	13	13
Número de Cetano ± 1 (-)	35,9	35,9	42,0	34,5
Cuba (-)	1	1	1	1
Data do Ensaio (DD/MM/AAAA)	16/03/2016	16/03/2016	16/03/2016	16/03/2016
Hora (HH:MM)	14:17	14:26	14:38	14:46

9.7. Apêndice G – Dados dos Ensaios de Emissões

-----	B100	B7	B60E5	B20E5
Operador	Nauberto/Daniel	Nauberto/Daniel	Nauberto/Daniel	Nauberto/Daniel
Temp. do ar de admissão ± 1 (°F)	149	149	149	150
Temp do bico injetor ± 1 (°F)	100	100	100	100
Temp do óleo lubrificante ± 2 (°F)	108	108	110	112
Tempo de consumo 13ml ± 1 (seg.)	56	60	57	60
Posição da cremalheira ± 1 (mm)	705	705	705	705
Posição avanço da injeção $\pm 0,02$ (mm)	12,20	12,20	12,20	12,20
Posição do volante ± 1 (mm)	1530	1530	1530	1530
Atraso de Ignição $\pm 0,2$ (°)	9,5	13,0	11,5	13,4
Avanço de Injeção $\pm 0,1$ (°)	13,8	13	14,3	13,8
Número de Cetano ± 1 (-)	NULL	41,6	NULL	NULL
Cuba (-)	1	1	1	1
Data do Ensaio (DD/MM/AAAA)	18/03/2016	18/03/2016	18/03/2016	18/03/2016
Hora (HH:MM)	16:12	16:00	16:20	16:29
CO $\pm 5\%$ (ppm)	258	404	328	345
CO _{2i} $\pm 5\%$ (%)	10,27	10,18	9,83	9,68
NO $\pm 5\%$ (ppm)	816	681	906	763
NO ₂ $\pm 5\%$ (ppm)	58,6	56,1	65,1	65,9
NO _x $\pm 5\%$ (ppm)	870	738	956	841
H ₂ $\pm 10\%$ (ppm)	16	22	15	11
FT ± 1 (°C)	23,6	23,0	23,7	23,8

-----	B10E5	B60E8	B7E5	B20E8
Operador	Nauberto/Daniel	Nauberto/Daniel	Nauberto/Daniel	Nauberto/Daniel
Temp. do ar de admissão ± 1 (°F)	150	150	150	150
Temp do bico injetor ± 1 (°F)	100	100	100	100
Temp do óleo lubrificante ± 2 (°F)	114	116	116	118
Tempo de consumo 13ml ± 1 (seg.)	61	59	61	62
Posição da cremalheira ± 1 (mm)	705	705	705	705
Posição avanço da injeção $\pm 0,02$ (mm)	12,20	12,20	12,20	12,20
Posição do volante ± 1 (mm)	1530	1530	1530	1530
Atraso de Ignição $\pm 0,2$ (°)	14,0	12,0	14,1	13,8
Avanço de Injeção $\pm 0,1$ (°)	13,8	14,1	13,6	13,4
Número de Cetano ± 1 (-)	NULL	NULL	NULL	NULL
Cuba (-)	1	1	1	1
Data do Ensaio (DD/MM/AAAA)	18/03/2016	18/03/2016	18/03/2016	18/03/2016
Hora (HH:MM)	16:38	16:43	16:50	16:58
CO $\pm 5\%$ (ppm)	379	358	408	493
CO _{2i} $\pm 5\%$ (%)	9,59	9,43	9,62	9,23
NO $\pm 5\%$ (ppm)	827	811	769	714
NO ₂ $\pm 5\%$ (ppm)	66,9	69,2	67,7	71,0
NO _x $\pm 5\%$ (ppm)	905	873	843	780
H ₂ $\pm 5\%$ (ppm)	20	18	15	29
FT ± 1 (°C)	23,9	24,0	24,1	23,8
-----	B10E8	B7E8	B60E15	B20E15
Operador	Nauberto/Daniel	Nauberto/Daniel	Nauberto/Daniel	Nauberto/Daniel
Temp. do ar de admissão ± 1 (°F)	150	148	149	149
Temp do bico injetor ± 1 (°F)	100	100	100	100
Temp do óleo lubrificante ± 2 (°F)	120	120	122	122
Tempo de consumo 13ml ± 1 (seg.)	62	62	61	62
Posição da cremalheira ± 1 (mm)	705	705	705	705
Posição avanço da injeção $\pm 0,02$ (mm)	12,2	12,2	12,2	12,2
Posição do volante ± 1 (mm)	1530	1530	1530	1530
Atraso de Ignição $\pm 0,2$ (°)	15,0	14,6	13,8	15,4
Avanço de Injeção $\pm 0,1$ (°)	13,3	13,3	13,6	13,3
Número de Cetano ± 1 (-)	NULL	NULL	NULL	NULL
Cuba (-)	1	1	1	1
Data do Ensaio (DD/MM/AAAA)	18/03/2016	18/03/2016	18/03/2016	18/03/2016
Hora (HH:MM)	17:08	17:15	17:25	17:34
CO $\pm 5\%$ (ppm)	465	436	383	456
CO _{2i} $\pm 5\%$ (%)	9,26	9,33	8,83	8,81
NO $\pm 5\%$ (ppm)	691	746	738	737
NO ₂ $\pm 5\%$ (ppm)	67,5	71,2	80,0	79,3
NO _x $\pm 5\%$ (ppm)	758	826	810	832
H ₂ $\pm 5\%$ (ppm)	26	23	16	28
FT ± 1 (°C)	24,1	24,1	24,2	24,3

9.8. Apêndice H – Dados dos Cenários de Otimização

Cenário	Objetivo	Restrição1	Restrição 2	Restrição 3
1	Máx número de cetano	-	-	-
2	Máx número de cetano	NO _x <850	-	-
3	Máx número de cetano	CO<404	-	-
4	Máx número de cetano	NO _x <850	CO<404	-
5	Mín atraso de ignição	-	-	-
6	Mín atraso de ignição	NO _x <850	-	-
7	Mín atraso de ignição	CO<404	-	-
8	Mín atraso de ignição	NO _x <850	CO<404	-
9	Mín CO emitido	-	-	-
10	Mín CO emitido	NO _x <850	-	-
11	Mín CO emitido	número de cetano>40	-	-
12	Mín CO emitido	NO _x <850	número de cetano>40	-
13	Mín CO ₂ emitido	-	-	-
14	Mín CO ₂ emitido	NO _x <850	-	-
15	Mín CO ₂ emitido	CO<404	-	-
16	Mín CO ₂ emitido	NO _x <850	CO<404	-
17	Mín CO ₂ emitido	número de cetano>40	-	-
18	Mín CO ₂ emitido	NO _x <850	número de cetano>40	-
19	Mín CO ₂ emitido	CO<404	número de cetano>40	-
20	Mín CO ₂ emitido	NO _x <850	CO<404	número de cetano>40
21	Mín NO _x emitido	-	-	-
22	Mín NO _x emitido	CO<404	-	-
23	Mín NO _x emitido	número de cetano>40	-	-
24	Mín NO _x emitido	CO<404	número de cetano>40	-
25	Mín termo (CO _n + NO _{xn})/2	-	-	-

Cenário	Biodiesel [%]	Etanol [%]	número de cetano [-]	atraso de ignição [°]
1	97,6	0,0	54,94	9,44
2	27,7	5,3	42,96	13,18
3	90,1	0,0	53,80	10,09
4	35,1	3,8	44,09	12,89
5	98,8	0,0	54,73	9,44
6	8,3	0,0	44,88	12,92
7	98,8	0,0	54,69	9,43
8	39,7	7,0	42,38	12,97
9	98,3	0,0	54,53	9,78
10	20,8	2,9	43,12	13,17
11	95,4	0,6	53,60	9,88
12	19,4	0,0	44,25	13,03
13	21,3	14,5	35,19	15,18
14	19,9	13,7	35,45	15,14
15	58,2	13,7	42,32	13,54
16	59,7	14,9	41,97	13,80
17	54,0	14,5	41,80	13,70
18	57,5	12,4	42,92	13,23
19	57,7	12,5	42,89	13,25
20	59,2	13,1	42,73	13,37
21	10,8	10,4	35,60	15,40
22	8,4	1,0	44,06	13,06
23	62,6	13,0	43,64	13,11
24	60,4	12,7	43,15	13,23
25	98,2	0,0	53,66	9,43

Cenário	CO [ppm]	CO2 [%]	NOX [ppm]
1	256,33	10,11	862,72
2	361,23	9,46	844,54
3	272,37	10,13	881,72
4	366,85	9,43	848,00
5	266,86	10,39	883,50
6	393,21	10,15	789,23
7	266,80	10,38	883,66
8	373,59	9,27	849,65
9	256,05	10,35	881,78
10	293,40	9,73	838,30
11	259,89	10,22	877,79
12	280,66	9,93	841,30
13	455,93	8,81	831,59
14	471,17	8,82	816,08
15	381,18	8,89	815,64
16	383,19	8,83	810,02
17	384,34	8,94	829,30
18	377,68	8,98	824,37
19	377,99	8,97	823,08
20	378,98	8,92	816,16
21	499,75	9,13	725,04
22	382,57	10,01	793,16
23	372,61	9,01	823,50
24	376,71	8,95	817,75
25	256,06	10,14	863,32