

MATHEUS VIOLA

**Estudo do desempenho de um motogerador a partir da combustão de diferentes
misturas de gasolina-etanol**

Matheus Viola

Estudo do desempenho de um motogerador a partir da combustão de diferentes misturas de gasolina-etanol

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Profa. Dra. Ivonete Ávila

Guaratinguetá - SP
2017

Viola, Matheus
V795e Estudo do desempenho de um motogerador a partir da combustão de
diferentes misturas de gasolina-etanol / Matheus Viola – Guaratinguetá,
2017.
56 f : il.
Bibliografia: f. 50-52

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ivonete Ávila

1. Etanol. 2. Gasolina. 3. Planejamento experimental. I. Título

CDU 547.262


Luciana Máximo

Bibliotecária-CRB-3595

MATHEUS VIOLA

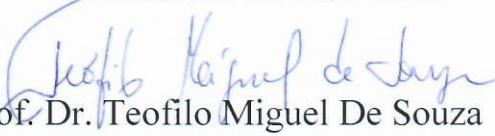
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Profa. Dra. Ivonete Ávila
Orientadora/UNESP-FEG


Prof. Dr. Teofilo Miguel De Souza
UNESP-FEG


MSc. Tatiane Tobias Da Cruz
UNESP-FEG

Novembro de 2017

DADOS CURRICULARES

MATHEUS VIOLA

NASCIMENTO	24.11.1993 – São José dos Campos / SP
FILIAÇÃO	José Eduardo Viola Izabel Rosa da Silva Viola
2012/2017	Engenharia Mecânica - Graduação UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus de Guaratinguetá

*Dedico este trabalho
de modo especial, à minha família.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

À minha orientadora, *Profa. Dra. Ivonete Ávila* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

Ao Prof. *Dr. Teófilo Miguel de Souza* por disponibilizar a infraestrutura do Laboratório de Energia Renováveis para a realização dos testes.

Aos meus pais *Izabel Rosa da Silva Viola e José Eduardo Viola*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

Às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

RESUMO

Atualmente, não só no Brasil, mas como no mundo todo, um dos temas mais discutidos é relacionado à disponibilidade de recursos energéticos e seu aproveitamento nas máquinas existentes. Com base nisso, surgiu-se a necessidade de otimizar o desempenho dos motores atuais, considerando as possíveis misturas de combustíveis fósseis e renováveis. Essas diferentes misturas podem influenciar os parâmetros de funcionamento de um motor e também os gases emitidos na exaustão (CO , CO_2 , NO_x). Assim, neste trabalho de graduação propõe-se estudar o desempenho de um motogerador e avaliar as emissões geradas na combustão de diferentes misturas de gasolina-etanol para diferentes cargas aplicadas. Os testes foram realizados em um gerador de energia acoplado a um motor de combustão interna do ciclo Otto. A bancada experimental foi instrumentada de forma a medir os valores de tensão, corrente, potência e emissões geradas na combustão. A metodologia de planejamento estatístico denominada *Response Surface Methodology* (RSM) foi aplicada com 3 repetições no ponto central, 4 pontos axiais e mais 22 combinações, totalizando 11 ensaios que foram realizadas aleatoriamente variando-se a porcentagem de etanol na gasolina e a carga aplicada. A partir das medidas, foram obtidas as superfícies de resposta, sendo que a significância estatística foi determinada pela análise de variância (ANOVA). Os resultados mostraram que o aumento da porcentagem de etanol na mistura pouco influenciou os parâmetros de funcionamento do motogerador, mas observou-se que as variações nas porcentagens de cada um dos combustíveis tiveram uma grande influência nos gases de exaustão (CO_2 , NO_x e O_2).

PALAVRAS-CHAVE: Moto-gerador. Etanol. Gasolina. Misturas. Emissões. Planejamento experimental.

ABSTRACT

Currently, not only in Brazil, but also all over the world, one of the most discussed topics in the energy field is related to the availability of energy resources and its use in existing machines. Based on this, there is a need to optimize the performance of current engines, considering the possible blends between fossil and renewable fuels. These different blends have influence on the operating parameters of an engine (power, voltage, current) as well as exhaust gases emitted (CO, CO₂, NO_x). Thus, in this undergraduate thesis, it is proposed to study the performance of a power generator and also to evaluate the emissions generated during the combustion of different gasoline-ethanol blends for different loads applied. The tests were performed on a power generator coupled to an internal combustion engine (Otto cycle). The experimental workbench was instrumented in order to measure the values of voltage, current, power and the emissions generated during the combustion. The statistical methodology called Response Surface Methodology (RSM) was applied with 3 replicates at the center point, 4 axial points and 22 combinations, totalizing 11 trials that were randomly performed, varying the percentage of ethanol and also the applied load. Based on the measurements, the response surfaces were obtained, and the statistical significance was determined by the analysis of variance (ANOVA). It was observed that the increase in the ethanol percentage in the blend had a small influence on the operating parameters of the power generator, but it was observed that the variations in the percentages of each one of the fuels had a big influence on the exhaust gases like CO₂, NO_x and O₂.

KEYWORDS: Power generator. Ethanol. Gasoline. Blends. Emissions. Experimental design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Motogerador Buffalo, modelo BFG 1200 utilizados nos testes.....	20
Figura 2 - Quadro de cargas resistivas.	22
Figura 3 - (a) Termômetro modelo TE-400; (b) Termômetro modelo TH1000; (c) Wattímetro digital modelo ET-4091; (d) Multímetro digital modelo VA-760; (e) Tacômetro modelo H019-031.	23
Figura 4 - Analisador de gases modelo AS0 630 AE.	25
Figura 5 - Calorímetro IKA C2000	26
Figura 6 – Comportamento do PCS em função do teor de etanol na mistura de gasolina-etanol.	31
Figura 7 - Superfície de Resposta e Superfície de Contorno: (a) Potência, (b) Corrente, (c) Tensão e (d) RPM em função da carga e percentual de etanol.....	35
Figura 8 - Superfície de Resposta e Superfície de Contorno: Temperatura média de exaustão em função da carga e percentual de etanol.	38
Figura 9 - Superfície de Resposta e Superfície de Contorno: (a) Eficiência em PCI e (b) Excesso de ar em função da carga e percentual de etanol.	41
Figura 10 - Superfície de Resposta e Superfície de Contorno para as emissões de (a) CO ₂ , (b) O ₂ e (c) NO _x em função da carga e percentual de etanol.	43
Figura 11 - Superfície de Resposta: Concentração de CO ₂ em função da carga e percentual de etanol.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados dos combustíveis utilizados.....	18
Tabela 2 - Especificação do Motogerador.....	21
Tabela 3 - Especificação do Analisador de Gases.....	24
Tabela 4 – Tabela de Variância.....	30
Tabela 5 - Determinação do PCS das misturas gasolina-etanol utilizadas.....	31
Tabela 6 - Níveis e valores das variáveis estudadas do planejamento experimental.	32
Tabela 7 - Matriz codificada e com valores reais adotados no delineamento 2^2 com 3 repetições no ponto central.	33
Tabela 8 - Resultados do desempenho do motogerador obtidos experimentalmente.....	34
Tabela 9 - Coeficientes encontrados utilizando o método RSM para a análise de desempenho do motogerador.....	34
Tabela 10 – ANOVA obtida para a tensão em função da carga e percentual de etanol.....	36
Tabela 11 - Resposta obtidas referente às temperaturas média de exaustão (T_{ME}) e ambiente (T_{MA}) e temperatura final de exaustão (T_{FE}) em função da carga e percentual de etanol.....	37
Tabela 12 - Coeficientes encontrados utilizando o método RMS para a temperatura média de exaustão (T_{ME}).	38
Tabela 13 – ANOVA para a Temperatura média de exaustão (T_{ME}).	39
Tabela 14 – Resultados obtidos a partir da definição no planejamento experimental.	40
Tabela 15 – Coeficientes encontrados utilizando o método RMS para as análises das emissões.....	40
Tabela 16 – ANOVA obtido para a excesso de ar em função da carga e percentual de etanol na mistura de gasolina-etanol.	42
Tabela 17 – ANOVA para as emissões de CO_2 (%) em função em função da carga e percentual de etanol na mistura de gasolina-etanol.	44
Tabela 18 - Matriz codificada, matriz de valores e de resultados obtidos.....	50
Tabela 19 – Matriz X.....	51
Tabela 20 - Calculo da matriz X^tX	51
Tabela 21 - Calculo da matriz X^ty	52
Tabela 22 - Calculo da matriz $(X^tX)^{-1}X^ty$	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVOS	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3	MATERIAIS E MÉTODOS	18
3.1	COMBUSTÍVEIS	18
3.1.1	Procedimento de lavagem da gasolina	19
3.2	BANCADA EXPERIMENTAL	20
3.2.1	Motogerador	20
3.2.2	Quadro de cargas resistivas	21
3.2.3	Instrumentação	22
3.3	ANALISADOR DE GASES	24
3.3.1	Procedimento de operação do motogerador	25
3.4	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR	26
3.5	TEORIA DA COMBUSTÃO	26
3.6	PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO DE EXPERIMENTO	27
3.7	ANÁLISE DE VARIÂNCIA	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZADAS NO EXPERIMENTO	31
4.2	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	32
4.3	ANÁLISE DO DESEMPENHO DO GERADOR	33
4.4	TEMPERATURAS COLETADAS DURANTE EXPERIMENTO	37
4.5	ANÁLISE DO EXCESSO DE AR, EFICIÊNCIA EM PCI E EMISSÕES	39
5	CONCLUSÕES	46
	REFERÊNCIAS	47
	APÊNDICE A - Descrição detalhada da aplicação do método estatístico de	
	Superfície de Resposta	50

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

Combustíveis fósseis estão limitados às reservas concentradas em certas regiões do mundo, sendo que essas fontes estão perto de atingir o seu pico de produção. Além disso, as emissões de poluentes de combustão gerados a partir destes combustíveis e os seus custos crescentes fará o uso de fontes renováveis mais atraente (DEMIRBAS, 2009).

Há diversas propostas para o uso de combustíveis alternativos de menor impacto ao meio ambiente, diminuindo o teor de dióxido de carbono. Uma das saídas estratégicas para diminuir as emissões de gases do efeito estufa e melhorar a qualidade do ar devido aos impactos causados pela queima de combustíveis fósseis, é a utilização de misturas gasolina/etanol.

Atualmente, o uso misturas de gasolina-etanol em motores de combustão interna é bastante difundido (YAO; TSAI; WANG, 2013). No Brasil, o etanol é o combustível mais representativo entre os biocombustíveis, sendo que seu uso em misturas com combustíveis fósseis tem por finalidade aproveitar principalmente as vantagens de cada um dos combustíveis (MOMENI MOVAHED; BASIRAT TABRIZI; MIRSALEM, 2014).

A atualmente o governo brasileiro permite uma porcentagem de até 27% de etanol na gasolina. De acordo com Balanço Energético Nacional de 2017, em 2016 a produção de etanol anidro utilizado para a mistura com a gasolina A para formar a gasolina C, registrou um acréscimo de 1,4%, totalizando 11.727,3 mil m³ (EPE, 2016).

As características físico-químicas da mistura gasolina/etanol são conhecidas e estudadas há tempos, principalmente no Brasil. Porém, muitas características dessa mistura de diferentes combustíveis ainda precisam ser melhores definidas visando a otimização do processo de obtenção de energia durante a combustão desses dois combustíveis, que varia com a porcentagem de gasolina e etanol na mistura.

Compreender mais a fundo o uso de misturas de gasolina e etanol em motores, é de extrema importância para capacitar estudiosos da área a realizar melhorias nesses equipamentos, melhorando a eficiência da combustão de misturas etanol e gasolina. Com isso pode-se reduzir os gases de efeito estufa que são produzidos durante a combustão desses combustíveis.

Por esse motivo, pretende-se fazer testes comparativos entre diferentes porcentagens de misturas de etanol e gasolina na avaliação da geração de energia útil destes combustíveis,

utilizando-se um motogerador de combustão interna. Ressalta-se que motores de combustão interna são uma das formas de tecnologia mais utilizadas hoje em dia, para diferentes fins: alimentação de automóveis, máquinas industriais, testes de combustíveis, entre outros (STÉFANI; GOMES; SANTOS, 2007).

De acordo com Stéfani, Gomes e Santos (2007), motores do tipo monocilíndrico apresentam vantagens importantes para esse tipo de estudo, onde utiliza-se diferentes combustíveis. Também como são motores com uma estrutura mais simples, a energia proveniente da queima dos combustíveis é direcionada quase totalmente para a geração de potência.

Diversos testes serão realizados no motogerador, buscando identificar um ponto ótimo de funcionamento do mesmo. Assim, pode-se definir uma porcentagem de mistura de combustível ideal. Esse ponto ótimo de funcionamento deve levar em conta a emissão de gases do efeito estufa e também os parâmetros de funcionamento do motor.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desse Trabalho de Graduação é avaliar o desempenho de um motogerador (ciclo Otto), considerando-se também as emissões geradas, a partir do processo de combustão em função de uma carga aplicada e do teor de etanol na gasolina.

Os objetivos específicos deste trabalho de graduação são:

1. Proceder as misturas de gasolina-etanol;
2. Definir o planejamento experimental por meio da metodologia RSM (*Response Surface Methodology*), considerando as variáveis potência (carga aplicada) e percentual de etanol na mistura.
3. Instrumentar a bancada experimental;
4. Montar o equipamento de análise de gases na bancada experimental;
5. Determinar o poder calorífico dos combustíveis;
6. Proceder os ensaios no motogerador;
7. Avaliar o efeito da adição de etanol na gasolina sob o desempenho do motor (potência, tensão, corrente);
8. Aplicar a ANOVA para avaliar a qualidade do ajuste do modelo à ser avaliado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em pesquisas em que se utiliza misturas de combustíveis com o etanol, é comum adotar como nomenclatura “Exx” para identificar o percentual de etanol em uma mistura gasolina/etanol. Considera-se que E0 e E100 referem-se a 100% de gasolina e 100% de etanol, respectivamente.

Diversos estudos abordam a influência das diferentes misturas de gasolina-etanol nas emissões de poluentes atmosféricos e também no funcionamento de motores de combustão interna (PHUANGWONGTRAKUL et al., 2016; NAJAFI et al., 2015; NIVEN, 2005; YÜKSEL; YÜKSEL, 2004; AL-HASAN, 2003; HE; HAO; YAN, 2003; POULOPOULOS; SAMARAS; PHILIPPOPOULOS, 2001; STUMP et al., 1994).

Uma das propriedades mais importantes do etanol para estes estudos é seu elevado teor de oxigênio, que pode ter influência na eficiência da combustão do combustível em motores de ignição. Assim, os estudos sobre esse tema mostram que uma das vantagens da utilização de misturas de gasolina/etanol é a produção de menores níveis de CO e THC, se compararmos à combustão utilizando apenas gasolina (NAJAFI et al., 2016; NAJAFI et al., 2015; STUMP et al., 1994).

Os resultados que apontam a diminuição das emissões são justificados pelo aumento de oxigênio no processo de combustão, melhorando, portanto, essa reação. Gasolina misturada ao etanol diminuiu também as emissões de gases tóxicos, tais como o benzeno, o 1,3-butadieno, tolueno e xileno, com os níveis crescentes de etanol (POULOPOULOS; SAMARAS; PHILIPPOPOULOS, 2001; STUMP et al., 1994).

Algumas das propriedades físico-químicas da mistura gasolina/etanol como calor latente de vaporização, teor de oxigênio, velocidade da chama entre outros são itens básicos na formação de NO_x em motores síncronos. Com base em estudos bibliográficos Masum (2013) descreve que existe uma controvérsia em relação às emissões de NO_x provenientes de motores que misturam um percentual de etanol no combustível. Para justificar isso, pode-se verificar que alguns outros autores afirmam que há um aumento da emissão de NO_x com o aumento da porcentagem de etanol presente na mistura (NAJAFI et al., 2016; NAJAFI et al., 2015; BAYRAKTAR, 2005) e outros descrevem um comportamento oposto (DOĞAN et al., 2017; BALKI; SAYIN; CANAKCIC, 2014; KOÇ et al., 2009).

Santos e Peixoto (2008) avaliou possíveis efeitos nas emissões de gases do efeito estufa ao adicionar etanol à gasolina na frota de veículos leves do Brasil no período de 2001- 2006.

O cálculo das emissões foi desenvolvido e avaliado de acordo com a metodologia publicada pelo *Intergovernmental Panel Climate Change* (IPCC, 2006)¹. Foram realizadas adaptações da metodologia para melhor se adequar às condições da frota do Brasil de veículos leves pelo Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões de Gases de Efeito Estufa publicado pelo Ministério de Ciência e Tecnologia. Algumas correções na metodologia foram necessárias, segundo a proposta feita por La Rovere, Pereira e Gitz (2006) para os motores do tipo *flex-fuel*. Os resultados obtidos mostraram que ocorre um aumento na temperatura dos gases nas emissões com o aumento do percentual de etanol na mistura e, este influi mais do que o valor mais alto da entalpia de combustão da gasolina ($\Delta H_o = -5400$ kJ/mol) em relação ao do etanol ($\Delta H_o = -1400$ kJ/mol).

Koç et al. (2009) relataram que as emissões de NOx diminuem ao aumentar a concentração de etanol no combustível, isso é devido ao alto calor latente de vaporização do etanol. Os autores realizaram testes em um motor de ignição por centelha, utilizando misturas com baixo e alto percentual de etanol na mistura (E0, E50 e E85).

Na pesquisa realizada por Kyriakides et al. (2013), os autores utilizaram um motor ciclo Otto e diferentes porcentagens de misturas de gasolina, etanol e água como combustível. Os autores concluíram que algumas das vantagens de se utilizar o etanol é o seu alto valor de octanagem e alto calor de vaporização, ambos proporcionam uma maior produção durante o funcionamento do motor devido à maior compressão e melhor utilização da relação ar/combustível. Também foi relatado que uma das desvantagens da utilização do etanol é seu menor poder calorífico, que gera um consumo maior de combustível.

Estudo utilizando um motor de ignição por centelha foi realizado por Najafi et al. (2015), utilizando como combustível para os testes diferentes misturas de gasolina-etanol (E5, E7,5, E10, E12,5 e E15). Os resultados obtidos mostraram que as emissões de CO diminuíram e as emissões de CO₂ aumentaram com o aumento da porcentagem de etanol na gasolina. Também foi relatado pelos autores que com o aumento de etanol na mistura, foram obtidos maiores valores de NOx.

Balki, Sayin e Canakcic (2014) utilizaram um motor mono cilindro, de quatro tempos em testes com misturas de gasolina, etanol e metanol, aplicando diferentes rotações em cada

¹ Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. Disponível em: <<http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>> (Apud Santos e Peixoto, 2008)

teste. Com os resultados obtidos os autores concluíram que ao utilizar o etanol como combustível em vez da gasolina em um motor de baixa potência, tem-se uma diminuição das emissões, principalmente de NO_x , HC e CO. Além disso, ocorreu um aumento das emissões de CO_2 devido a uma combustão cada vez mais completa.

Castro (2014) utilizou o mesmo motogerador utilizado neste trabalho para avaliar seu desempenho, potência, tensão e consumo específico do combustível utilizando diferentes misturas de gasolina e etanol. Além disso, a autora também avaliou as emissões de exaustão nos ensaios de combustão. Os resultados mostraram com o aumento da concentração de etanol na mistura, ocorreu redução na quantidade do CO_2 emitido e aumento das emissões de NO_x . Também foi verificado que o motogerador forneceu aproximadamente 800 W de potência, o que é suficiente para permitir o funcionamento de geladeira, televisão e lâmpadas elétricas, em uma casa de pequeno porte.

Doğan et al. (2017) realizaram testes em um motor 4 cilindros de quatro tempos, com ignição por centelha e sobre carga total. Os testes foram executados utilizando-se misturas de gasolina/etanol nas proporções de E0, E10, E20 e E30. Com os resultados obtidos e os cálculos teóricos, os autores concluíram que com o aumento da porcentagem de etanol na mistura, obteve-se uma redução nas emissões de monóxido de carbono (CO).

O Grupo do Laboratório de Combustão e Captura de Carbono (LC3) desenvolve pesquisas com diferentes misturas de combustíveis fósseis e renováveis, tais como gasolina/etanol (QUIROGA, 2016), carvão/biomassa (RIBEIRO, 2016) e etanol/GNV (CHIAPINOTTO, 2017).

Quiroga (2016) investigou uma relação entre a energia de ativação da mistura de etanol e gasolina obtida pelas técnicas de análise térmica e a energia útil obtida em testes de motor padrão. Foram executados ensaios com etanol e gasolina pura e suas misturas (E5, E10, E15, E20, E25, E30, E50 e E75). O estudo do sinergismo foi utilizado como ferramenta para avaliar o efeito do teor de etanol na mistura com a gasolina, sendo concluído que existe sinergismo nas misturas com teor de etanol entre 5% e 30%. Devido à isto, estas misturas foram as que apresentaram melhores resultados na potência, para taxas de compressão entre 6:1 a 7:1.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 COMBUSTÍVEIS

A gasolina utilizada foi obtida do distribuidor Ipiranga, em um posto localizado em Guaratinguetá – SP e o etanol anidro (P.A.) foi comprado de fornecedor de reagentes químicos. As especificações necessárias para o estudo ser realizado estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados dos combustíveis utilizados

(continua)

Descrição	Gasolina Original	Etanol P.A.
Composição	Gasolina: 75 a 80%	Este produto é uma substância pura
	Etanol: 24 a 26%	
Estado físico	Produto líquido e transparente a temperatura ambiente, isento de material em suspensão	Produto líquido e transparente a temperatura ambiente, isento de material em suspensão
Cor	De incolor a alaranjada	Incolor
Odor	Forte e característico	Característico
pH	Teste não efetuado para este produto	De 6,0 a 8,0
Temperaturas específicas ou faixas de temperatura nas quais correm mudanças de estado físico	65°C (10% evaporado, máx.)	Faixa de destilação: 78 – 79°C a 760 mmHg
	80°C (50% evaporado, máx.)	Ponto de ebulição: 78°C
	190°C (90% evaporado, máx.)	Ponto de fusão: -118°C
	220°C (PFE, máx.)	Ignição: > 400°C
Ponto de fulgor	< 0°C (Vaso aberto)	15,8°C (Vaso aberto)
Limites de explosividade	Inferior a 1,4%	Inferior a 3,3%
	Superior a 7,6%	Superior a 19%

Tabela 2 - Dados dos combustíveis utilizados

(conclusão)

Descrição	Gasolina Original	Etanol P.A.
Pressão de Vapor	69kPa - 37,8°C (máximo)	44mmHg - 20°C
Densidade	0,72 – 0,76 a 20/4°C	0,8093 a 20/4°C
Solubilidade	Em água: Desprezível	Em água: Totalmente solúvel
	Solventes orgânicos: Solúvel	Solventes orgânicos: Solúvel
Viscosidade	-	1,20 cP a 20°C
Taxa de evaporação	>1 (Acetato de Butila = 1)	-
Hidrocarbonetos saturados	32 – 52% v/v	-
Hidrocarbonetos olefinicos	30% v – Valor máx.	-
Hidrocarbonetos aromáticos	45%v – Valor máx.	-
Benzeno	<1,0% v/v	-
Álcoois	-	92,6 – 93,8% p/p

Fonte: Ipiranga Produtos de Petróleo S.A (2012)

3.1.1 Procedimento de lavagem da gasolina

A gasolina comercializada no Brasil já possui um percentual de etanol na sua composição, por esse motivo é necessário realizar a retirada do etanol da gasolina para que seja possível determinar os percentuais adotados nos ensaios de forma precisa. Para isso, utilizou-se uma solução de cloreto de sódio e água na proporção de 1kg de cloreto de sódio para 10 L de água.

Para realizar a retirada do etanol presente na gasolina, deve-se misturar 1 L de gasolina comercial com 1 L da solução salina em um funil de separação. Realiza-se uma agitação manual de aproximadamente 20 vezes e deve-se deixar a mistura em repouso durante 3 minutos. Pode-se observar uma separação da mistura em 2 fases (mistura heterogênea bifásica). A gasolina por ser menos densa fica na parte superior e na parte inferior encontra-se a solução salina misturada com o álcool anidro extraído da gasolina. Foi determinado que este procedimento deve ser realizado três vezes, para que a gasolina seja isenta de etanol.

Com a gasolina pura, pode-se enfim preparar as misturas gasolina-etanol nas porcentagens pré-estabelecidas a partir do método estatístico utilizado. Foi utilizado o etanol comercial obtido no posto Ipiranga devido principalmente ao alto custo do álcool anidro, também a gasolina comercializada em postos de gasolina é misturada com o etanol proveniente do mesmo distribuidor.

3.2 BANCADA EXPERIMENTAL

3.2.1 Motogerador

Utilizou-se um motogerador da marca Buffalo para a realização dos testes, o modelo dele é o BFG 1200, composto de um gerador elétrico de 1,2kW/115V acoplado a um motor de combustão interna do tipo Otto, movido à gasolina com potência de 2,8 cv (2060 W). Na Figura 1 apresenta-se o motogerador utilizado, sendo que as especificações são descritas na Tabela 2.

Figura 1 - Motogerador Buffalo, modelo BFG 1200 utilizados nos testes.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

Tabela 3 - Especificação do Motogerador.

Descrição	Valores fornecidos
Motor	Motor 2.8 cv, 4 tempo/gasolina
Partida	Manual
Potência máxima	1.1 kW
Potência nominal (regime contínuo)	1.0 kW
Tensão saída	115V / 230V
Frequência	60Hz
Controle de tensão	Capacitor
Relé	5
Carregador de bateria	12V - 8,3
Capacidade do tanque	5,5 litros
Autonomia (50% carga)	6 horas
Peso	24,5 kg
Fases	Monofásico
Ruído 7m distância	67 dB (A)
Dimensões CxLxA	470x378x400mm

Fonte: Fabricante Buffalo (2006).

3.2.2 Quadro de cargas resistivas

Para possibilitar a variação das cargas durante o experimento, utilizou-se um quadro composto por 8 lâmpadas incandescentes de 100W cada, com seus respectivos interruptores para permitir a escolha da quantidade de cargas de caráter resistivas necessária em cada um dos testes. Para ter uma estabilidade no regime de trabalho do motogerador, escolhe-se a quantidade desejada de lâmpadas que serão acionadas antes das medições começarem.

Figura 2 - Quadro de cargas resistivas.



Fonte: Produção do Próprio Autor

3.2.3 Instrumentação

A temperatura ambiente foi medida por intermédio de um termômetro da marca *Instrutherm*, modelo TE-400 (Figura 3a). Um fator relevante que deve ser considerado ao realizar a medição é de que o equipamento deve ficar fora do alcance direto do sol, fornecendo assim um valor apropriado de temperatura ambiente. Essa medição é necessária para verificar se pequenas diferenças de temperatura ambiente influenciam no funcionamento do motogerador.

Também foi utilizado um termômetro digital para verificar a temperatura de exaustão dos gases do motor, utilizou-se um termômetro digital portátil da marca *Instrutherm*, modelo TH 1000, com sensor termopar tipo K (Figura 3b). Para isso, este equipamento foi fixado no escape do motogerador, que é onde os gases da combustão são emitidos.

A corrente e a tensão são pontos importantes a serem avaliados durante os testes, pois assim pode-se avaliar o comportamento do motogerador. Para realizar tão medição, foi utilizado um alicate wattímetro digital da marca Minipa, modelo ET-4091 (Figura 3c). Este possui um software que é responsável por transmitir as medições de corrente, tensão e potência para o computador. Também se utilizou um multímetro da marca *Instrutherm*, modelo VA-760 (Figura 3d), para averiguação externa das mesmas medidas realizadas pelo wattímetro. Portanto, as aferições de tensão, corrente e potência são necessárias para verificar se a capacidade elétrica fornecida pelo motogerador são suficientes para utilização em cargas elétricas com tensão determinada.

Figura 3 - (a) Termômetro modelo TE-400; (b) Termômetro modelo TH1000; (c) Wattímetro digital modelo ET-4091; (d) Multímetro digital modelo VA-760; (e) Tacômetro modelo H019-031.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Fonte: Produção do Próprio Autor

Outra característica de funcionamento do motogerador importante é a rotação do motogerador durante os testes. Por esse motivo, utilizou-se um tacômetro digital infravermelho da marca Homis, modelo H019-031 (Figura 3e). Foi necessário inserir um refletor no rotor do motogerador, para que assim fosse possível realizar a medição da rotação. Este modelo possui uma interface com o computador, possibilitando o armazenamento dos dados direto no computador, através de um software específico do equipamento.

3.3 ANALISADOR DE GASES

Um importante fator a ser avaliado nos testes de combustão das misturas refere-se às emissões dos gases provenientes da combustão durante cada um dos ensaios. Para medir os diferentes gases emitidos pelo motogerador, utilizou-se o analisador portátil de gases de combustão fabricado pela Chemist 300, modelo AS0 630 AE (Figura 4).

As especificações do analisador fornecida pelo fabricante estão descritas na Tabela 3.

Tabela 4 - Especificação do Analisador de Gases.

Medição	Sensor	Range	Resolução	Limite de erro
O ₂	Eletroquímico	0 a 25% vol.	0,1% vol.	± 0,2% vol.
NO	Eletroquímico	0 a 4000 ppm	1 ppm	± 5 ppm para 0 a 100 ppm ± 5% para 100 a 1000 ppm ± 10% para 1000 a 4000 ppm
NO _x	Calculado	0 a 12000 ppm	1 ppm	-
CO ₂	Calculado	0 a 99,9% vol.	0,1% vol.	-
Temp. Gás	Termopar tipo K	81,0 a 99,9 °C	0,1 °C	± 2°C para 81,0 a 200 °C ± 1% acima de 200°C
Excesso de Ar	Calculado	1,00 a 23,00	0,01	-

Fonte: Manual de Instruções do Fabricante.

Para realizar as medições, deve-se inserir a sonda desse aparelho no final do escapamento do motogerador. A aquisição dos dados foi feita por meio de um software do próprio aparelho, armazenando os dados obtidos no computador.

Figura 4 - Analisador de gases modelo AS0 630 AE.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

3.3.1 Procedimento de operação do motogerador

Após a apresentação da bancada experimental pode-se descrever em detalhes como foi realizado o experimento em questão. A primeira etapa consiste em conectar o cabo elétrico do quadro de cargas resistivas no terminal do gerador, posicionar a chave de liga/desliga do motogerador na posição ligada. Após isso, deve-se posicionar corretamente o equipamento de medição de corrente, tensão e potência no quadro de cargas resistivas, para que assim os valores das medições em cada teste sejam coletados de forma correta. Também deve-se posicionar o termômetro digital no escape do motor para assim obter as medidas de temperatura de exaustão durante os experimentos. Posteriormente a sonda do medidor de gases deve ser posicionada em um orifício feito no escape do motor. O tacômetro é posicionado de forma que o seu laser seja refletido por um refletor localizado no rotor, realizando-se assim a medição correta das rotações durante todo o experimento.

Após posicionar corretamente os equipamentos, deve-se ligar o computador para que assim seja possível coletar todos os dados necessários para realizar a análise de funcionamento do motogerador. Essa coleta de dados foi realizada por meio dos softwares específicos. Para realizar cada teste, insere-se no motogerador 150mL de combustível na porcentagem pré-estabelecida através do planejamento estatístico e assim é dada a partida no mesmo. Posteriormente, liga-se a chave do motogerador na posição de 115V, para que assim

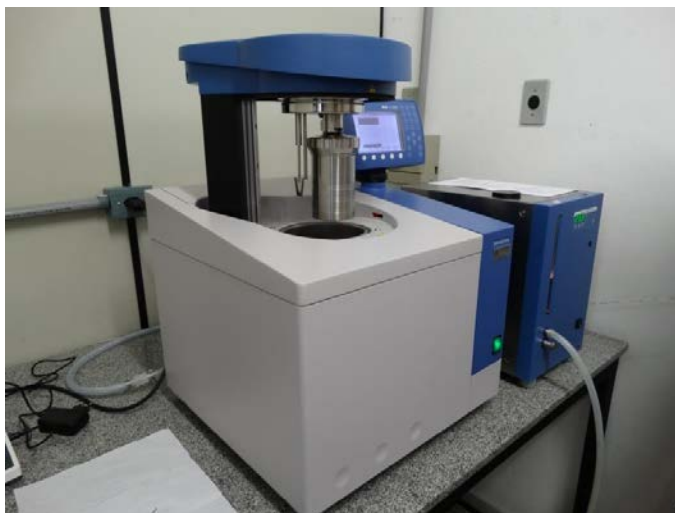
ele passe a fornecer a energia necessária para acender a quantidade determinada de lâmpadas.

Coleta-se a temperatura de exaustão no terceiro, quinto e sétimo minutos. Já a temperatura ambiente, no terceiro e sétimo minuto. No caso dos gases emitidos durante a combustão, foram realizadas 9 medições por teste, a cada minuto a partir do segundo minuto até o décimo.

3.4 DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR

Para realizar a determinação do poder calorífico superior (PSC) das amostras de combustíveis, utilizou-se um equipamento chamado Calorímetro IKA C2000 (Figura 5)]. Deve ser considerado alguns padrões/normas a serem seguidos para a validação dos resultados obtidos com este equipamento e por isso essa validação está de acordo com as normas DIN 51900, ASTM 240 D, ISO 1928, BSI etc.

Figura 5 - Calorímetro IKA C2000

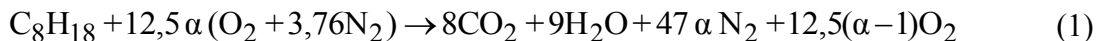


Fonte: Produção do Próprio Autor.

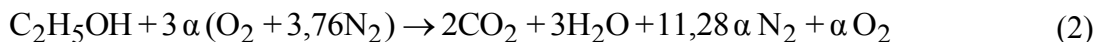
3.5 TEORIA DA COMBUSTÃO

Para realizar os cálculos necessários e compreender da forma correta a combustão com os diferentes combustíveis, é necessário entender a estequiometria de combustão da mistura ar-combustível com os diferentes combustíveis.

Considerando-se a reação de combustão da gasolina com excesso de ar sendo a do iso-octano (C_8H_{18}), que é dada pela equação (1).



Quando é necessária uma combustão do etanol com excesso de ar, deve-se considerar a reação dada pela equação (2).



O excesso de ar médio obtido durante os testes realizados no motogerador, que é representado pelo α na equação (1) e na equação (2), foi de 30,6%.

Para compreender a combustão de cada um dos combustíveis, é importante conhecer também a característica conhecida como poder calorífico, que é definido como a quantidade de calor liberada pela combustão completa da unidade de massa (ou volume) do combustível. O poder calorífico é considerado o conteúdo energético de cada um dos combustíveis, independentemente se ocorreu ou não a combustão, pois ele está diretamente relacionado à composição elementar do combustível avaliado.

Segundo Canakci (2013) o PCI da gasolina é em torno de 42,6 MJ/kg e do etanol é aproximadamente de 26,7 MJ/kg. O cálculo teórico do poder calorífico inferior (PCI) de um combustível sólido ou líquido, dado em kcal/kg, pode ser efetuado pela equação (3), para isso deve-se levar em conta as reações de combustão dos componentes puros (C, H, O e S).

$$\text{PCI} \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) = 7832\text{C} + \left(\text{H} - \frac{\text{O}}{8} \right) \cdot 28650 + 2065 \cdot \text{S} - 615\text{W} \quad (3)$$

Tem-se que C, H, O e S como o teor destes elementos no combustível e W o teor de água.

O valor pelo qual deve-se multiplicar o teor de água corresponde à entalpia de aquecimento da água de 25°C a 100°C (± 74 kcal/kg) somado a entalpia de vaporização da água (541 kcal/kg) à pressão de 101,3 kPa.

3.6 PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO DE EXPERIMENTO

De forma a diminuir a quantidade de ensaios necessários para a avaliação do desempenho do motogerador, utiliza-se uma ferramenta de planejamento estatístico de experimento. A metodologia utilizada nesse trabalho é chamada de superfície de respostas, ou RSM (Response Surface Methodology), sendo definida como uma técnica de otimização baseada em planejamento fatorial.

Essa metodologia é dividida em duas etapas: a primeira é baseada na modelagem e a segunda é determinada como deslocamento. Ambas devem ser repetidas tantas vezes quantas

forem necessárias, para que desse modo com isso seja possível alcançar uma região ótima de superfície a ser investigada.

Segundo Bruns, Scarminio e Neto (2001), a modelagem normalmente é feita ajustando-se modelos simples, em geral são lineares ou quadráticos. As respostas são obtidas a partir de planejamentos fatoriais ou até mesmo com planejamentos fatoriais ampliados. O deslocamento ocorre sempre ao longo do caminho de máxima inclinação de um determinado modelo, que é a trajetória na qual a resposta varia de forma mais pronunciada.

Para o caso estudado nesse Trabalho de Graduação, utilizou-se o modelo quadrático, cuja expressão geral é dada na equação (4).

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2 \quad (4)$$

Primeiramente, deve-se montar uma matriz 11 x 6 chamada de matriz X, ela possui 6 colunas que correspondem aos seis termos do modelo quadrático. A matriz y é composta pelos resultados obtidos durante cada um dos experimentos. Calcula-se as matrizes X^tX e Xy e posteriormente deve-se calcular b pela equação (5).

$$\hat{y} = (X^tX)^{-1}X^ty \quad (5)$$

Com isso obtém-se, os coeficientes, b_0 , b_1 , b_2 , b_{11} e b_{22} e b_{12} e consequentemente a superfície de resposta para este caso. Essa metodologia utilizada está descrita em detalhes no Apêndice 1.

3.7 ANÁLISE DE VARIÂNCIA

A análise de Variância (ANOVA) permite a comparação das médias de tratamento (VIEIRA, 2006). De acordo com Rodrigues e Iemma (2005), essa metodologia é utilizada para verificar a qualidade de ajuste de um determinado modelo utilizado em planejamentos.

Para fazer a análise da variância de um modelo, começamos com uma decomposição algébrica dos desvios das respostas observadas em relação à resposta média global (BRUNS; SCARMINIO e NETO, 2001). Como explicado por Bruns, Scarminio e Neto (2001), podemos decompor o desvio de uma resposta em relação à média de todas as respostas obtidas experimentalmente em duas parcelas e portanto, obter a equação (6).

$$(y_i - \bar{y}) = (\hat{y}_i - \bar{y}) + (y_i - \hat{y}_i) \quad (6)$$

Visando expressar a comparação dos desvios em termos quantitativos, eleva-se a equação (4) ao quadrado e faz-se um somatório sobre todos os pontos (BRUNS;

SCARMINIO e NETO, 2001). Obtemos, portanto, as somas quadráticas informadas na equação (7).

$$SQ_T = SQ_R + SQ_r \quad (7)$$

Onde, temos que a Soma Quadrática Total em torno da média (SQ_T) é igual à Soma Quadrática de Regressão (SQ_R) mais a parcela referente a Soma Quadrática do resíduo (SQ_r) (VIEIRA, 2006).

De acordo com (BRUNS; SCARMINIO e NETO, 2001), quanto maior for o valor obtido para regressão, melhor será o ajuste do modelo estudado, isso pode ser quantificado por meio da equação (8).

$$R^2 = \frac{SQ_R}{SQ_T} \quad (8)$$

Na qual, R^2 é o coeficiente de correlação ou de determinação do modelo e pode variar de 0 a 1. Quanto mais próximo de 1, melhor será o ajuste do modelo estudado e portanto, pode-se dizer que para esse caso toda a variação em torno da média será explicado pela regressão (BRUNS; SCARMINIO e NETO, 2001). Pode-se também obter a média quadrática (M.Q.), que é a razão de cada soma quadrática pelo seu respectivo grau de liberdade.

Temos também que a Soma Quadrática residual é igual à Soma Quadrática devida ao Erro Puro (SQ_{EP}) mais a Soma Quadrática devida à falta de ajuste (SQ_{faj}) do modelo utilizado. Segundo Rodrigues e Iemma (2005) pode-se analisar a variabilidade verificada dentro de cada grupo que compõe a amostra, para definir se a falta de ajuste do modelo é significativa ou não. Essa variabilidade é denominada Erro Puro (EP).

Com as Médias Quadráticas em relação ao Erro Puro e à Falta de Ajuste podemos usar um teste F em relação à razão MQ_{faj}/MQ_{ep} para enfim avaliar se o modelo está bem ajustado ou não às observações. Para valores altos dessa razão, tem-se uma elevada falta de ajuste (BRUNS; SCARMINIO e NETO, 2001).

Por último, com as informações fornecidas pode-se enfim montar a Tabela 5 completa da ANOVA para o ajuste, por meio do método dos mínimos quadrados, de um modelo linear nos parâmetros.

Tabela 5 – Tabela de Variância.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de g. l.	Média Quadrática
Regressão	$SQ_R = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	$p - 1$	$MQ_R = \frac{SQ_R}{p - 1}$
Resíduos	$SQ_r = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \hat{y}_i)^2$	$n - p$	$MQ_r = \frac{SQ_r}{n - p}$
Falta de ajuste	$SQ_{faj} = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2$	$m - p$	$MQ_{faj} = \frac{SQ_{faj}}{m - p}$
Erro puro	$SQ_{ep} = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$	$n - m$	$MQ_{ep} = \frac{SQ_{ep}}{n - m}$
Total	$SQ_T = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2$	$n - 1$	
% de variação explicada:	$\frac{SQ_R}{SQ_T}$		
% máxima de variação explicável:	$\frac{SQ_T - SQ_{ep}}{SQ_T}$		

Fonte: Bruns, Scarminio e Neto (2001).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZADAS NO EXPERIMENTO

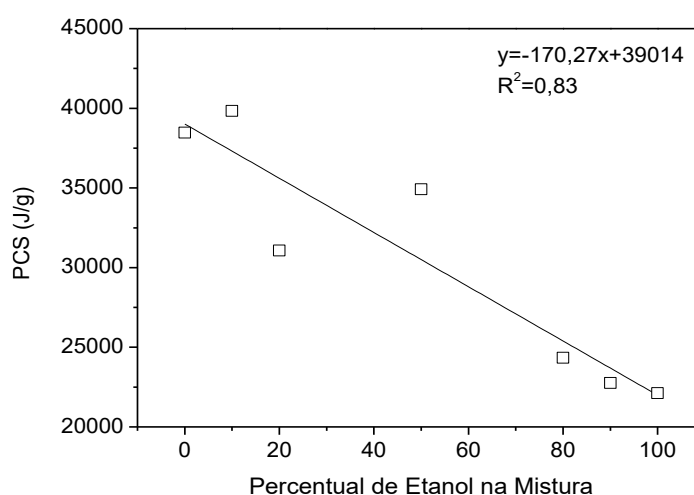
Realizou-se a determinação do poder calorífico superior (PCS) dos combustíveis utilizados. Os resultados dos valores de PCS são apresentados na Tabela 6 e o comportamento do PCS em função do teor de etanol na mistura é apresentado na Figura 6.

Tabela 6 - Determinação do PCS das misturas gasolina-etanol utilizadas.

Amostra	Massa (g)	PCS (J/g)
E00	0,807	38466
E10	0,687	39836
E20	0,970	31076
E50	0,787	34915
E80	0,998	24340
E90	0,984	22753
E100	1,019	22121

Fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 6 – Comportamento do PCS em função do teor de etanol na mistura de gasolina-etanol.



Fonte: Produção do Próprio Autor

Como esperado pela teoria, pode-se constatar na Figura 6 uma tendência em aumentar o

valor obtido de PCS ao diminuir os percentuais de etanol presentes na mistura. Pode-se notar também uma alta dispersão, isso pode ser devido ao manuseio das misturas para realização dos testes, visto que o equipamento é muito sensível e durante a movimentação das amostras pode ocorrer perda dos voláteis presentes na composição dos mesmos.

4.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A Tabela 7 apresenta os valores obtidos para as variáveis que foram estudadas e também os respectivos níveis do planejamento experimental.

Tabela 7 - Níveis e valores das variáveis estudadas do planejamento experimental.

Variáveis	Ponto Axial Nível Baixo	Ponto Baixo	Ponto Central	Ponto Alto	Ponto Axial Nível Alto
	-1,414	-1,061	0	+1,061	+1,414
% de Etanol	10	20	50	80	90
Carga	0	1	4	7	8

Fonte: Produção do Próprio Autor.

A partir dos valores de carga aplica e percentual de etanol, pode-se determinar o planejamento estatístico, realizando 3 repetições no ponto central. Isso resulta em um total de 11 experimentos a serem realizados e esses experimentos foram distribuídos conforme informado na Tabela 8. As respostas obtidas com esses experimentos são apresentadas na sequência.

Tabela 8 - Matriz codificada e com valores reais adotados no delineamento 2^2 com 3 repetições no ponto central.

Testes	Matriz Codificada		Matriz de Valores	
	Carga	% de Etanol	Carga	% de Etanol
1	-1,06	-1,06	1	20
2	+1,06	-1,06	7	20
3	-1,06	+1,06	1	80
4	+1,06	+1,06	7	80
5	-1,41	0,00	0	50
6	+1,41	0,00	8	50
7	0	-1,41	4	10
8	0	+1,41	4	90
9	0	0	4	50
10	0	0	4	50
11	0	0	4	50

Fonte: Produção do Próprio Autor.

4.3 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO GERADOR

A Tabela 9 apresenta os resultados referentes ao desempenho do motogerador nos testes de combustão das misturas de gasolina-etanol, de acordo com as condições experimentais adotadas nos 11 testes.

Foi aplicado o método estatístico de Superfície de Resposta (RSM) nos resultados coletados durante cada um dos experimentos, conforme descrito no Planejamento Experimental e, assim, chegou-se aos coeficientes da equação (4) para cada um desses resultados. As superfícies de resposta e de contorno referentes à potência, corrente, tensão e RPM são apresentadas na Figura 7.

Tabela 9 - Resultados do desempenho do motogerador obtidos experimentalmente

Testes	Potência (W)	Corrente (A)	Tensão (V)	RPM
1	69,82	0,64	109,86	3580,11
2	548,76	3,23	111,84	3578,22
3	70,95	0,66	110,94	3606,56
4	523,06	4,91	108,71	3607,74
5	0	0	109,32	3588,49
6	616,53	5,56	110,91	3571,89
7	304,62	2,77	111,01	3597,51
8	296,34	2,77	108,76	3580,63
9	301,11	2,77	111,87	3622,33
10	298,01	2,81	107,81	3575,82
11	295,26	3,2	108,91	3572,94

Fonte: Produção do Próprio Autor.

Tabela 10 - Coeficientes encontrados utilizando o método RSM para a análise de desempenho do motogerador.

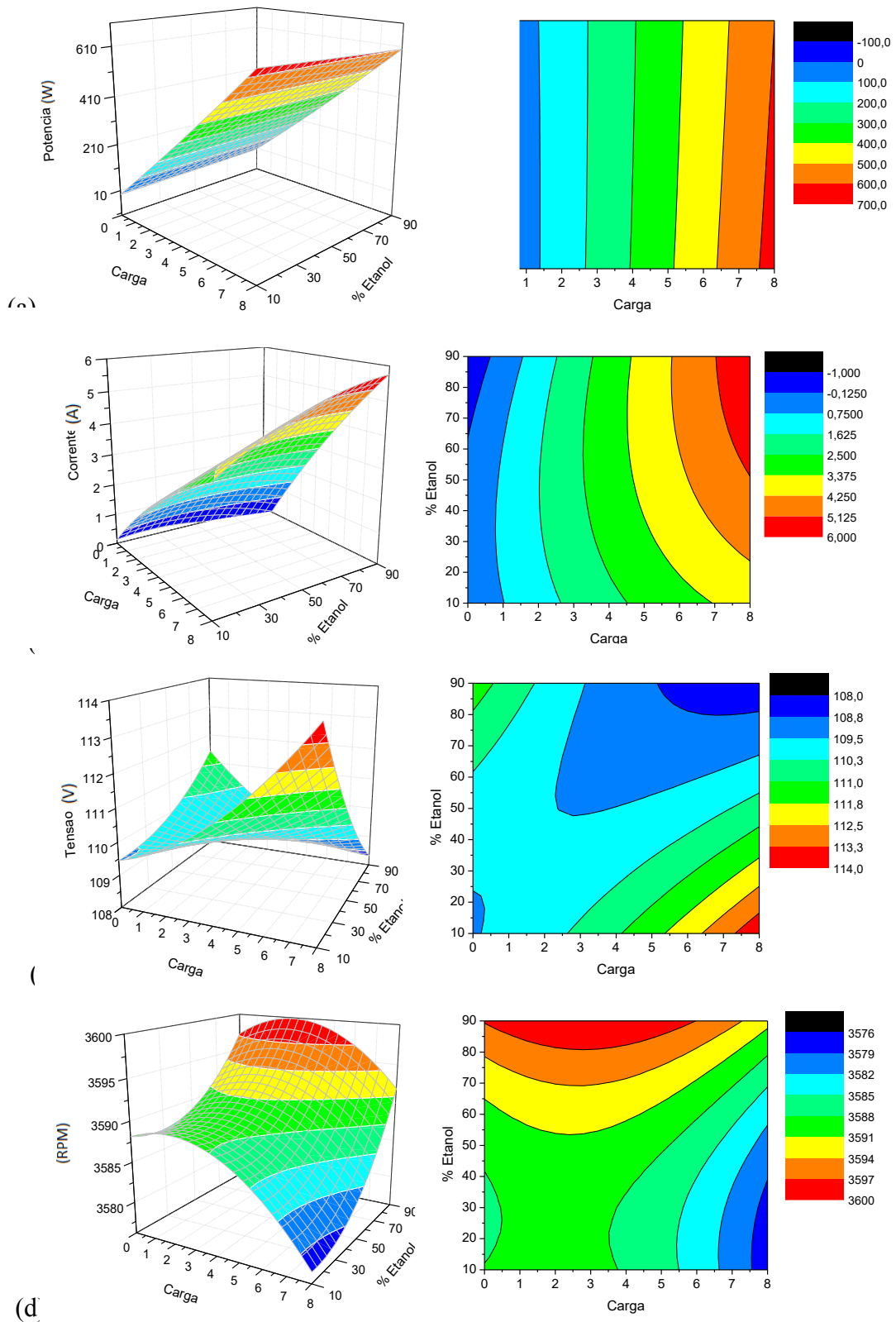
Coeficientes	b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
Potência (W)	298,273	218,757	-4,444	4,503	0,610	-5,962
Corrente (A)	2,956	1,779	0,212	-0,185	-0,190	0,369
Tensão (V)	109,510	0,233	-0,630	0,371	0,256	-0,936
RPM	3589,689	-2,850	4,176	-2,476	1,964	0,682

Fonte: Produção do Próprio Autor.

Nota-se na Figura 7a que com o aumento da carga, tem-se um aumento de potência, ou seja, pode-se concluir que a variável que mais influi no valor da potência de saída do gerador é a carga.

No caso da corrente (Figura 7b), observa-se que o comportamento foi similar ao da potência, pois com o aumento da carga aplicada e da porcentagem de etanol obtém-se um valor cada vez maior de corrente. Nesse caso, nota-se também que a % de etanol tem influência no valor obtido de corrente, porém ela influi menos que o aumento de carga.

Figura 7 - Superfície de Resposta e Superfície de Contorno: (a) Potência, (b) Corrente, (c) Tensão e (d) RPM em função da carga e percentual de etanol.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

Nota-se na Figura 7c que a variação dos valores obtidos para tensão é pequena, em torno de 6V, sendo que o maior valor de tensão é obtido quando tem-se a carga máxima aplicada e a porcentagem de etanol mínima. Por outro lado, o menor valor ocorre quando a carga é máxima e a porcentagem de etanol também.

Pode-se observar na Figura 7d, que o intervalo de variação de RPM é pequeno, ou seja, a influência da variação da carga aplicada e da % de Etanol foram menos relevantes para essa variável nas condições adotadas experimentalmente. Portanto, quanto maior for a carga aplicada menor é o valor de RPM. Os maiores valores de RPM foram obtidos para altas porcentagens de etanol na mistura.

Para a avaliação do desempenho do motogerador, procedeu-se a ANOVA considerando-se a variação de tensão, como mostrado na Tabela 11.

Tabela 11 – ANOVA obtida para a tensão em função da carga e percentual de etanol.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de gl*	Média Quadrática
Regressão	9,273	5	1,855
Resíduos	9,978	5	1,996
Falta de ajuste	8,820	2	4,410
Erro puro	1,158	3	0,386
Total	19,251	10	
% de variação explicada:	48,9%		
% máxima de variação explicável:	54,3%		

Nota: * grau de liberdade.

Fonte: Produção do Próprio Autor.

De acordo com Bruns, Scarminio e Neto (2001), valores altos de:

$$F_{m-p, n-m} = \frac{MQ_{FaltaAjuste}}{MQ_{ErroPuro}}$$

significam uma grande falta de ajuste. Para que o modelo estudado não apresente falta de ajuste é necessário que $F_{calculado}$ por meio desta falta de ajuste seja inferior a $F_{m-p, n-m}$ tabelado pela falta de ajuste.

Com os valores obtidos para a tensão pode-se verificar que o $F_{calculado}$ é menor que o $F_{tabelado}$. Tem-se que $F_{3,2}$ tabelado para 95% de confiança é igual à 19,16 e que o valor de

$F_{\text{calculado}}$ por meio da falta de ajuste é 11,33. Portanto $F_{\text{calculado}}$ é consideravelmente menor que o F_{Tabelado} , provando que o modelo não apresenta falta de ajuste.

O modelo explica 48,9% da variação em torno da média, tem-se também que para este caso a máxima de variação explicável é 54,3%.

4.4 TEMPERATURAS COLETADAS DURANTE EXPERIMENTO

Nos 11 testes definidos no planejamento experimental foram feitas as medidas de temperaturas conforme descritas na Tabela 12.

Tabela 12 - Resposta obtidas referente às temperaturas média de exaustão (T_{ME}) e ambiente (T_{MA}) e temperatura final de exaustão (T_{FE}) em função da carga e percentual de etanol.

Testes	Temperaturas Medidas (°C)		
	T_{ME}	T_{FE}	T_{FE}
1	252,0	30,6	258,0
2	282,3	32,2	296,0
3	258,3	32,4	276,0
4	366,0	35,6	371,0
5	337,0	36,8	345,0
6	312,0	33,7	333,0
7	246,3	30,0	255,0
8	386,7	33,3	396,0
9	254,0	33,6	267,0
10	366,3	37,1	375,0
11	235,3	35,4	244,0

Fonte: Produção do Próprio Autor.

Os coeficientes da equação (1) para a T_{ME} foram obtidos a partir da metodologia RSM, sendo apresentados na Tabela 13.

A partir destes coeficientes foram obtidas as superfícies de resposta e de contorno apresentadas na Figura 8. Observa-se que, com os dados adquiridos, a temperatura de exaustão média durante os testes no motogerador tem um valor de máximo quando se tem a maior porcentagem de etanol presente na mistura e também com a maior carga aplicada.

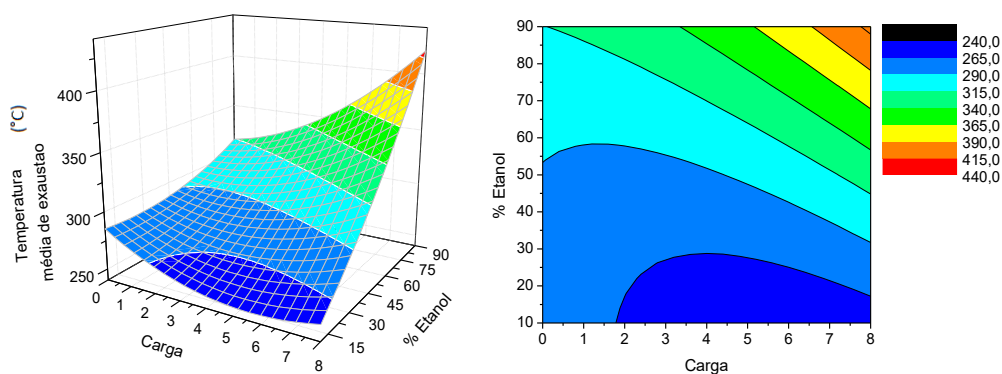
Segundo Santos e Peixoto (2008), isso pode ser justificado devido ao fato de que o volume de gases resultantes da combustão da mistura é menor quando se aumenta a porcentagem de etanol e isso influencia mais decisivamente do que o maior valor da entalpia de combustão da gasolina em relação ao do próprio etanol.

Tabela 13 - Coeficientes encontrados utilizando o método RMS para a temperatura média de exaustão (T_{ME}).

Coeficientes	b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
T_{ME} (°C)	287,770	13,061	34,590	9,690	5,690	17,200

Fonte: Produção do Próprio Autor

Figura 8 - Superfície de Resposta e Superfície de Contorno: Temperatura média de exaustão em função da carga e percentual de etanol.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

Os resultados da ANOVA para a T_{ME} são apresentados na

Tabela 14. Nota-se que para o modelo avaliado, que leva em conta a T_{ME} , os valores obtidos comprovam também que o $F_{calculado}$ é menor que o $F_{tabelado}$. Tem-se que $F_{3,2}$ tabelado para 95% de confiança é igual à 19,16 e que o valor de $F_{calculado}$ por meio da falta de ajuste é 2,011. Portanto $F_{calculado}$ é muito menor que o $F_{Tabelado}$, mostrando que o modelo para esse caso também não apresenta falta de ajuste. Além disso, verifica-se que o modelo explica 43,8% da variação em torno da média, tem-se também que para este caso a máxima de variação explicável é 67,8%.

Tabela 14 – ANOVA para a Temperatura média de exaustão (T_{ME}).

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de gl*	Média Quadrática
Regressão	13723,565	5	2744,713
Resíduos	17565,197	5	3513,039
Falta de ajuste	10060,470	2	5030,237
Erro puro	7504,722	3	2501,574
Total	31288,760	10	
% de variação explicada:	43,8%		
% máxima de variação explicável:	67,8%		

Nota: * grau de liberdade.

Fonte: Produção do Próprio Autor.

4.5 ANÁLISE DO EXCESSO DE AR, EFICIÊNCIA EM PCI E EMISSÕES

Foram feitas as medidas das emissões geradas na combustão das misturas pré-preparadas, sendo que as emissões geradas estão relacionadas às equações de combustão das misturas utilizadas nos experimentos. Os resultados obtidos para os 11 testes definidos no planejamento experimental são apresentados na Tabela 15.

Os mesmos passos anteriores descritos foram executados seguindo-se a metodologia RSM, sendo encontrados os coeficientes da equação (4) para o Excesso de ar, Eficiência em PCI, %CO₂, %O₂ e NOX, cujos resultados são apresentados na Tabela 16.

Na Figura 9 apresentam-se as superfícies de resposta e de contorno para o excesso de ar e a eficiência em PCI em função da carga e percentual de etanol.

Ressalta-se que o PCI pode ser determinado utilizando-se a composição elementar do combustível, calculado pela equação (3) ou bomba calorimétrica. Entretanto, o PCI apresentado neste item foi obtido pelo analisador de gases. Observando os resultados do PCI das misturas avaliadas (Figura 9a), pode-se notar que com uma maior porcentagem de etanol

na mistura, menor é a eficiência em PCI do combustível avaliado. Pode-se perceber também que ao variar a carga aplicada em cada teste, tem-se uma pequena variação no PCI obtido experimentalmente. Esse resultado é esperado devido ao fato de que o PCI está diretamente relacionado ao teor de carbono presente no combustível. Como a gasolina apresenta na sua composição molecular 6 átomos de carbonos a mais que o etanol, deve-se obter um valor maior de PCI para baixas porcentagens de etanol na mistura.

Tabela 15 – Resultados obtidos a partir da definição no planejamento experimental.

Testes	Respostas				
	Excesso de ar	Eficiência em PCI	CO ₂ (%)	NO _x (ppm)	O ₂ (%)
1	1,31	86,2	11,40	49,0	5,00
2	1,29	86,7	11,60	187,0	4,80
3	1,45	84,1	10,30	20,8	6,60
4	1,20	84,9	12,50	32,3	3,50
5	1,34	86,2	11,30	19,0	5,30
6	1,34	85,3	11,10	23,0	5,40
7	1,27	86,2	11,80	83,6	4,50
8	1,29	83,9	11,60	43,3	4,80
9	1,27	86,8	11,80	110,0	4,50
10	1,28	86,1	11,70	47,8	4,60
11	1,33	85,1	11,30	70,8	5,20

Fonte: Produção do Próprio Autor.

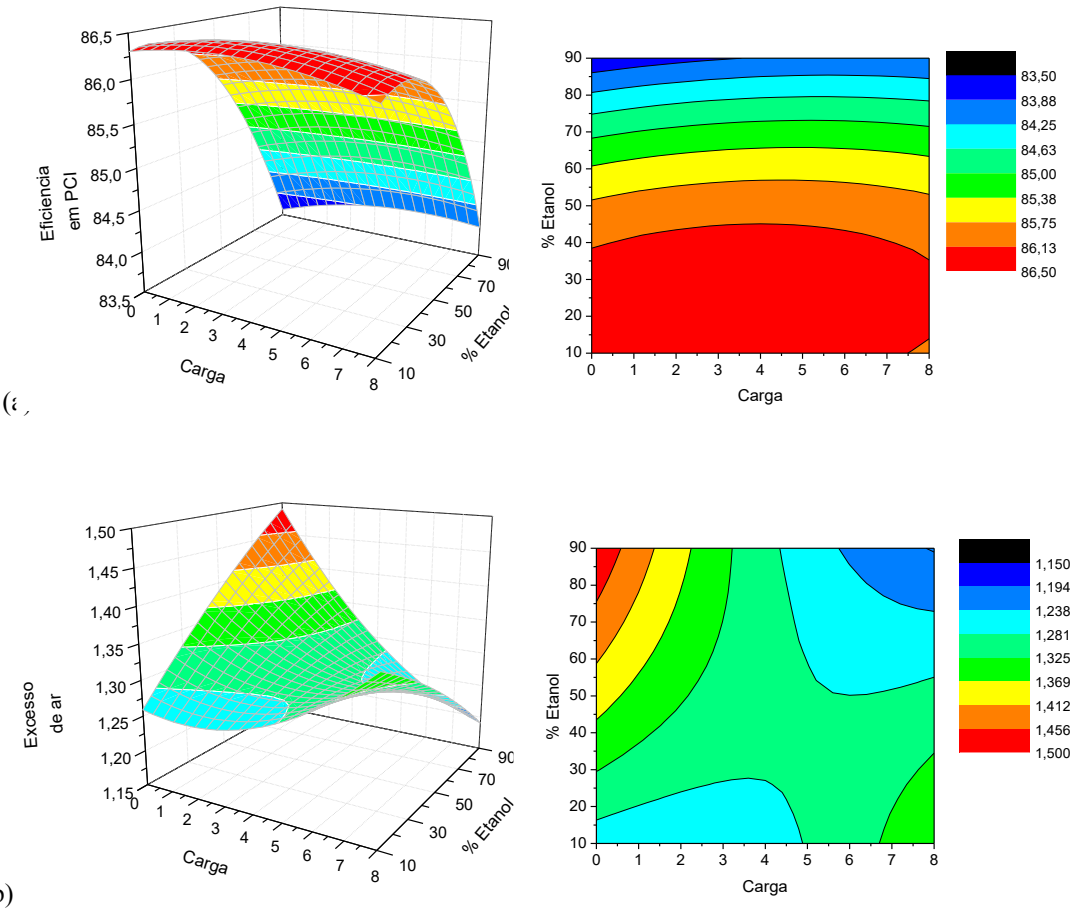
Tabela 16 – Coeficientes encontrados utilizando o método RMS para as análises das emissões.

Coeficientes	b ₀	b ₁	b ₂	b ₁₁	b ₂₂	b ₁₂
Excesso de ar	1,293	-0,034	0,010	0,023	-0,007	-0,051
Eficiência em PCI	85,989	0,013	-0,869	-0,083	-0,433	0,067
%CO ₂	11,599	0,266	-0,058	-0,195	0,055	0,444
%O ₂	4,771	-0,395	0,087	0,276	-0,074	-0,644

NOx (ppm)	73,700	19,321	-29,528	-17,913	3,313	-28,111
-----------	--------	--------	---------	---------	-------	---------

Fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 9 - Superfície de Resposta e Superfície de Contorno: (a) Eficiência em PCI e (b) Excesso de ar em função da carga e percentual de etanol.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

Considerando-se o resultado obtido para o excesso de ar (Figura 9b), nota-se que ao aumentar a porcentagem de etanol presente na mistura gasolina-etanol, tem-se uma mistura cada vez mais “pobre”, ou seja, a massa de ar que o motor admite é maior que a massa de combustível admitida pelo mesmo. Segundo Najafi et al. (2016), a necessidade de aumentar a relação ar/combustível garante que a combustão seja cada vez mais completa, ou seja, com esse aumento cada vez mais CO oxida formando CO₂.

Para ter-se uma combustão completa é necessário fornecer à câmara de combustão uma quantidade cada vez maior de ar, que deve ser maior que a quantidade de ar estequiométrico.

Segundo Vlassov (2008), ao se trabalhar somente com o ar teórico poderá ocorrer uma distribuição não homogênea dentro da própria câmara, ou seja, pode-se ter um local dentro na câmara de combustão com volume de ar baixo e outros lugares com um volume mais elevado de ar. Com um baixo volume de ar, pode-se ter uma queima incompleta do combustível e ao ocorrer o inverso, tem-se uma queima completa. O excesso de ar, ou seja, um maior volume de ar na região afeta a temperatura na câmara de combustão e também o rendimento térmico desse motor.

Pode-se confirmar essas conclusões ao verificar que para a condição de maior excesso de ar (Figura 9), tem-se baixas temperaturas médias de exaustão (Figura 8).

Calculou-se a ANOVA para o excesso de ar em função da carga e percentual de etanol e os resultados são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – ANOVA obtido para a excesso de ar em função da carga e percentual de etanol na mistura de gasolina-etanol.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de g. l.	Média Quadrática
Regressão	0,028	5	0,006
Resíduos	0,011	5	0,002
Falta de ajuste	0,002	2	0,001
Erro puro	0,009	3	0,003
Total	0,039	10	
% de variação explicada	72,8%		
% máxima de variação explicável	95,8%		

Nota: * grau de liberdade.

Fonte: Produção do Próprio Autor.

Neste caso o modelo avaliado leva em consideração o excesso de ar, os valores obtidos comprovam que o $F_{\text{calculado}}$ é menor que o F_{tabelado} . Tem-se que $F_{3,2}$ tabelado para 95% de confiança é igual à 19,16 e que o valor de $F_{\text{calculado}}$ por meio da falta de ajuste é 0,333. Portanto $F_{\text{calculado}}$ é menor que o F_{Tabelado} , provando que o modelo não apresenta falta de ajuste.

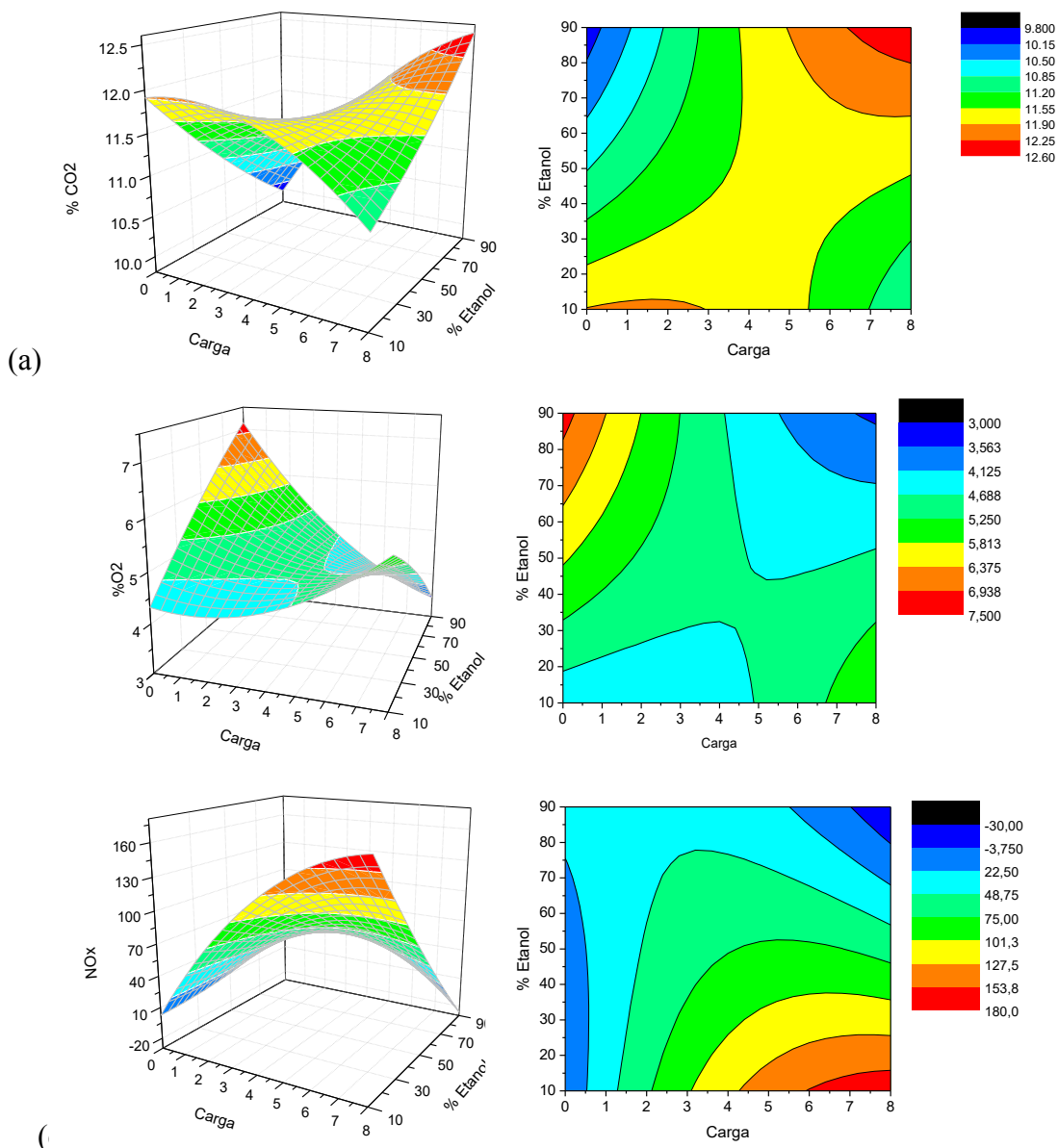
O modelo explica 72,8% da variação em torno da média, tem-se também que para este caso a máxima de variação explicável é 95,8%.

Pode-se comparar essas porcentagens com os da tabela de ANOVA para o caso da

tensão e do CO_2 e verificar que os valores para esse caso são melhores do que os obtidos nos casos anteriores, pois a porcentagem de variação explicada é maior.

As superfícies resposta e de contorno referentes às concentrações dos gases de exaustão medidos na combustão das misturas gasolina-etanol são apresentadas na Figura 10.

Figura 10 - Superfície de Resposta e Superfície de Contorno para as emissões de (a) CO_2 , (b) O_2 e (c) NO_x em função da carga e percentual de etanol.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

Nota-se na Figura 10a duas regiões em que se tem um aumento das emissões de CO_2 . A primeira ocorre quando se tem uma baixa percentagem de etanol e baixa carga e a segunda ocorre para uma alta percentagem de etanol na mistura e também com uma alta carga. De

forma geral, com a adição de etanol na mistura, pode-se perceber uma tendência de aumento das emissões de CO₂.

A primeira região mostra que a presença de oxigênio no etanol contribui para a oxidação de CO em CO₂, ou seja, com uma maior porcentagem de etanol tem-se uma queima de combustível mais completa (NAJAFI et al., 2016). Também, de acordo com Melo et al. (2012) o consumo de combustível aumenta quando se adiciona etanol à mistura gasolina/etanol, pois o etanol possui um poder calorífico menor (em torno de 26 MJ/kg) que a gasolina (em torno de 42 MJ/kg). Portanto, se acrescentarmos etanol na mistura, mais combustível oxigenado será necessário e isso influencia o aumento da emissão de CO₂.

Segundo Najafi et al. (2015) com o aumento da porcentagem de etanol na mistura a concentração de CO₂ aumenta, a emissão de dióxido de carbono depende da relação ar-combustível durante a queima e também da emissão de CO.

Na segunda região de aumento da concentração de dióxido de carbono, observa-se que se tem uma combustão mais eficiente por causa do alto poder calorífico da gasolina e do menor esforço necessário por parte do motogerador.

Tabela 18 – ANOVA para as emissões de CO₂ (%) em função em função da carga e percentual de etanol na mistura de gasolina-etanol.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de gl	Média Quadrática
Regressão	1,650	5	0,330
Resíduos	1,323	5	0,265
Falta de ajuste	0,215	2	0,108
Erro puro	1,108	3	0,369
Total	2,973	10	
% de variação explicada:	55,5%		
% máxima de variação explicável	92,7%		

Nota: * grau de liberdade.

Fonte: Produção do Próprio Autor.

Para o modelo avaliado, que leva em conta a emissão de CO₂, os valores obtidos comprovam que o $F_{\text{calculado}}$ é menor que o F_{tabelado} . Tem-se que $F_{3,2}$ tabelado para 95% de confiança é igual à 19,16 e que o valor de $F_{\text{calculado}}$ por meio da falta de ajuste é 0,292.

Portanto $F_{\text{calculado}}$ é menor que o F_{Tabelado} , provando que o modelo não apresenta falta de ajuste.

O modelo explica 55,5% da variação em torno da média, tem-se também que para este caso a máxima de variação explicável é 92,7%.

Tem-se que o comportamento do percentual de O_2 (Figura 10b) presente nas emissões é inverso ao do percentual de CO_2 (Figura 10a). Este comportamento é esperado, isso ocorre por que quanto mais CO_2 se forma menos oxigênio não reage. De acordo com Castro (2014), em misturas ar/combustível mais “pobres” os valores obtidos de percentual de O_2 são maiores, isso ocorre devido ao fato de existir uma maior proporção de ar para reagir com as moléculas de combustível. Ao realizar uma comparação entre a Figura 10b e a Figura 9b, as quais estão relacionadas ao percentual de O_2 e excesso de ar, respectivamente, pode-se notar um comportamento semelhante.

Com base nas superfícies de resposta e de contorno das emissões de NO_x em relação à carga aplicada e à porcentagem de etanol presente na mistura (Figura 10c), pode-se notar que os valores máximos de NO_x são encontrados quando tem-se altas cargas aplicadas e baixa porcentagem de etanol. Também deve-se notar que esses valores de máximo acontecem na mesma região que se tem baixas temperaturas médias de exaustão (Figura 8).

Na literatura, alguns trabalhos observaram um aumento das emissões de NO_x em função do aumento do teor de etanol na mistura como o do Najafi et al. (2016), Najafi et al. (2015) e Bayraktar (2005). Os autores justificam que o aumento da temperatura dos gases de exaustão tem grande influência no aumento emissões de NO_x . No presente trabalho, foi observado um comportamento contrário ao descrito anteriormente, como descrito por outros autores, tais como Doğan et al. (2017), Balki, Sayin e Canakcic (2014) e Koç et al. (2009). Portanto, o comportamento das emissões de NO_x é controverso com relação ao efeito do etanol nas emissões de NO_x em misturas de gasolina-etanol e por isso é necessário um estudo mais completo sobre esta emissão.

5 CONCLUSÕES

O estudo desenvolvido neste Trabalho de Graduação foi baseado em testes realizados em um motogerador abastecido com diferentes misturas de etanol/gasolina, aplicando-se diferentes cargas.

Visando diminuir o número de testes necessários aplicou-se a metodologia conhecida como *Response Surface Methodology* (RSM), procedendo-se 11 ensaios de combustão no motogerador (3 repetições no ponto central, 4 pontos axiais e mais 2^2 combinações). Nos testes foram variadas o teor de etanol na mistura de gasolina-etanol, considerando-se testes com gasolina pura (E00), misturas de gasolina-etanol (E10, E20, E50, E80 e E90) e etanol puro (E100), e carga aplicada utilizando-se um quadro composto por 8 lâmpadas incandescentes de 100W.

Após a obtenção das respostas aplicou-se a ANOVA para verificar a falta de ajuste nos modelos. Constatou-se que para os casos avaliados (tensão, temperatura média de exaustão, excesso de ar e percentual de CO_2) não ocorreu falta de ajuste.

Ao avaliar o desempenho do motogerador durante os testes, percebe-se que a potência e a corrente possuem comportamentos similares e que ambos são muito dependentes da carga aplicada. No caso da tensão, tem-se os maiores valores na região de carga aplicada máxima e porcentagem de etanol mínima. Para os outros parâmetros avaliados notou-se que com o aumento da porcentagem de etanol na mistura teve-se um aumento do percentual de CO_2 e uma diminuição das emissões de O_2 devido à uma queima cada vez mais completa.

O NO_x é um caso a ser estudo mais em detalhes, pois a maior parte das referências estudadas explicam um comportamento contrário ao obtido nesse trabalho. Porém, nota-se que o comportamento do NO_x é controverso, pois alguns autores relatam também um aumento das emissões de NO_x para percentuais mais baixos de etanol.

Com isso, pôde-se cumprir os objetivos propostos, desde a determinação dos testes a serem realizados até a influência da variação das misturas de combustíveis no comportamento do motogerador, levando em conta a qualidade das superfícies obtidas com a metodologia adotada.

REFERÊNCIAS

- AL-HASAN, M. Effect of ethanol–unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 44, n. 9, p. 1547-1561, 2003.
- BALKI, M. K.; SAYIN, C.; CANAKCIC, M. The effect of different alcohol fuels on the performance, emission and combustion characteristics of a gasoline engine. **Fuel**, London, v. 115, p.901-906, 2014.
- BAYRAKTAR, H. Experimental and theoretical investigation of using gasoline–ethanol blends in spark-ignition engines. **Renewable Energy**, Oxford, v. 30, p.1733–47, 2005.
- BRUNS, R. E.; BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas: Editora da Unicamp, 2001. 412 p.
- CANAKCI, M. Impact of alcohol–gasoline fuel blends on the exhaust emission of an SI engine. **Renewable Energy**, Oxford, v. 52, p.111-117, 2013.
- CASTRO, T. S. **Análise do desempenho de um gerador elétrico de pequeno porte acionado a motor de combustão a quatro tempos**. 2014. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista-UNESP, 2014.
- CHIAPINOTTO, L. **Análise da combustão e das emissões de um motor flex usando misturas heterogêneas de combustíveis**. 2017. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista-UNESP, 2017.
- DEMIRBAS, A. Progress and recent trends in biodiesel fuels. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 50, n. 1, p. 14-34, 2009.
- DOĞAN, B.; EROL, D.; YAMAN, H.; KODANLI, E. The effect of ethanol-gasoline blends on performance and exhaust emissions of a spark ignition engine through exergy analysis. **Applied Thermal Energy**, Oxford, v.120, p.433-443, 2017.
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica**. 452p. EPE: Rio de Janeiro, 2016.
- HE, B. Q.; HAO, J. M.; YAN, X. G. A study on emission characteristics of an EFI engine with ethanol blended gasoline fuels. **Atmospheric Environment**, Oxford, v. 37, n. 7, p. 949-957, 2003.
- KOÇ, M.; SEKMEN, Y.; TOPGÜL, T.; YÜCESU, H. The effects of ethanol-unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in a spark-ignition engine. **Renewable Energy**, Oxford, v. 34, p. 2101-2106, 2009.

KYRIAKIDES, A.; DIMAS, V.; LYMPEROPOULOU, E.; KARONIS, D.; LOIS, E. Evaluation of gasoline–ethanol–water ternary mixtures used as a fuel for an Otto engine. **Fuel**, London, v. 108, p.208-215, 2013.

LA ROVERE, E. L.; PEREIRA, A. S.; GITZ, V. Cenários de demanda interna de combustíveis motores ciclo otto e abatimento de CO₂ devido à produção e ao uso de álcool no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 11, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UFRJ - COPPE, 2006.

MASUM, B. M. Effect of ethanol–gasoline blend on NO_x emission in SI engine. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 24, p.209-222, 2013.

MELO, T. C. C.; MACHADO, G. B.; BELCHIOR, C. R. P.; COLAÇO, M. J.; BARROS, J. E. M.; OLIVEIRA, E. J.; OLIVEIRA, D. G. Hydrous ethanol–gasoline blends: combustion and emission investigations on a Flex-Fuel engine. **Fuel**, London, v. 97, n. 1, p.796-804, 2012.

MOMENI MOVAHED, M.; BASIRAT TABRIZI, H.; MIRSALEM, M. **Experimental investigation of the concomitant injection of gasoline and CNG in a turbocharged spark ignition engine**. *Energy Conversion and Management*, v. 80, p. 126–136, 2014.

NAJAFI, G.; GHOBADIAN, B.; MOOSAVIAN, A.; YUSAF, T. F.; MAMAT, R.; KETTNER, M.; AZMI, W. H. SVM and ANFIS for prediction of performance and exhaust emissions of a SI engine with gasoline-ethanol blended fuels. **Applied Thermal Energy**, Oxford, v.95, p.186-203, 2016.

NAJAFI, G.; GHOBADIAN, B.; YUSAF, T. F.; ARDEBILI, S. M. S.; MAMAT, R. Optimization of performance and exhaust emission parameters of a SI (Spark Ignition) engine with gasoline-ethanol blended fuels using response surface methodology. **Energy**, Oxford, v.90, p.1815-1829, 2015.

NIVEN, R. K. Ethanol in gasoline: environmental impacts and sustainability review article. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 9, n. 6, p. 535-555, 2005.

PHUANGWONGTRAKUL, S.; WECHSATOL, W.; SETHAPUT, T.; SUKTANG, K.; WONGWISES, S. Experimental study on sparking ignition engine performance for optimal mixing ratio of ethanol-gasoline blended fuels. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 100, p. 869-879, 2016.

POULOPOULOS, S. G.; SAMARAS, D. P.; PHILIPPOPOULOS, C. J. Regulated and unregulated emissions from an internal combustion engine operating on ethanol-containing fuels. **Atmospheric Environment**, Oxford, v. 35, n. 26, p. 4399-4406, 2001.

QUIROGA, C. R. **Avaliação da relação entre a energia de ativação e a energia útil para diferentes misturas de etanol e gasolina aplicadas a motores de ignição por centelha**. 2016. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista -UNESP, Guaratinguetá, 2016.

RIBEIRO, N. S. **Estudo termogravimétrico da combustão e oxidação de misturas carvão mineral-biomassa**. 2017. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá, 2017.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos: uma estratégia sequencial de planejamentos**. Campinas: Casa do Pão Editora, 2005.

SANTOS, A. C.; PEIXOTO, R. A. Effect of the addition of ethanol into gasoline in the emission of greenhouse gases. **Science & Engineering Journal**, Uberlândia, v. 17, n. 1, p.33-41, 2008.

STÉFANI, L. B. V; GOMES, R. J. N.; SANTOS, S. C. Projeto didático de um motor monocilíndrico. XXV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 9, 2007, Curitiba. **Anais...** Paraná: COBENGE, 2007.

STUMP, F. D.; KNAPP, K. T. **Influence of oxygenated fuels on the emissions from three pre-1985 light-duty passenger vehicles**. n. abr. 2013, p. 37-41, 1985.

VIEIRA, S. **Análise de variância (ANOVA)**. São Paulo: Editora Atlas, 2006. 204 p.

VLASSOV, D. **Fundamentos de combustão**. Curso de Especialização em Motores e Combustíveis. Curitiba: UTFPR, 2008. Disponível em: < <http://www.damec.ct.utfpr.edu.br/motores/downloads/fundamentos%20da%20combustão.pdf>>. Acesso em: 4 jun. 2014.

YAO, Y. C.; TSAI, J. H.; WANG, I. T. Emissions of gaseous pollutant from motorcycle powered by ethanol-gasoline blend. **Applied Energy**, London, v. 102, p. 93-100, 2013.

YÜKSEL, F.; YÜKSEL, B. The use of ethanol–gasoline blend as a fuel in an SI engine. **Renewable Energy**, Oxford, v. 29, n. 7, p. 1181-1191, 2004.

APÊNDICE A - Descrição detalhada da aplicação do método estatístico de Superfície de Resposta

Primeiramente com os dados obtidos durante o experimento e com os dados determinados na Tabela 8, pode-se montar a Tabela 19.

Tabela 19 - Matriz codificada, matriz de valores e de resultados obtidos

Matriz Codificada		Matriz de Valores		Matriz Y
Carga	% de Etanol	Carga	% de Etanol	%CO ₂
-1,06	-1,06	1	20	11,40
1,06	-1,06	7	20	11,60
-1,06	1,06	1	80	10,30
1,06	1,06	7	80	12,50
-1,41	0,00	0	50	11,30
1,41	0,00	8	50	11,10
0,00	-1,41	4	10	11,80
0,00	1,41	4	90	11,60
0,00	0,00	4	50	11,80
0,00	0,00	4	50	11,70
0,00	0,00	4	50	11,30

Fonte: Produção do Próprio Autor.

As 2 primeiras colunas da Tabela 19 representam os valores da matriz codificada para a carga aplicada e para a porcentagem de etanol presente na mistura gasolina-etanol, tendo como base os valores codificados podem-se encontrar os respectivos valores de carga e % de etanol que devem ser utilizados durante cada um dos testes pré-determinados. A quinta coluna, que representa a matriz Y é obtida a partir dos testes realizados no motogerador. A matriz Y pode ser qualquer resultado obtido durante os testes, nesse exemplo utilizou-se a porcentagem de CO₂.

Tem-se que a matriz X nesse caso é uma matriz 11x6. As 6 colunas são correspondentes aos seis termos do modelo quadrático. A primeira coluna é composta apenas pelo número 1, a segunda e a terceira são compostas pelos valores da matriz codificada, ou

seja, x_1 e x_2 respectivamente, já as três últimas colunas representam os valores de x_1^2 , x_2^2 e x_1x_2 respectivamente.

Tabela 20 – Matriz X

X					
1	-1,06	-1,06	1,125	1,125	1,125
1	1,06	-1,06	1,125	1,125	-1,125
1	-1,06	1,06	1,125	1,125	-1,125
1	1,06	1,06	1,125	1,125	1,125
1	-1,41	0,00	2	0	0
1	1,41	0,00	2	0	0
1	0,00	-1,41	0	2	0
1	0,00	1,41	0	2	0
1	0,00	0,00	0	0	0
1	0,00	0,00	0	0	0
1	0,00	0,00	0	0	0

Fonte: Produção do Próprio Autor.

Posteriormente realiza-se a multiplicação da matriz X pela sua transposta. Seguindo o exemplo, tem-se:

Tabela 21 - Cálculo da matriz X^tX

X^tX					
11	0	0	8,5	8,5	0
0	8,5	0	0	0	0
0	0	8,5	0	0	0
8,5	0	0	13,0625	5,0625	0
8,5	0	0	5,0625	13,0625	0
0	0	0	0	0	5,0625

Fonte: Produção do Próprio Autor.

Também pode-se calcular a multiplicação da matriz X pela Y:

Tabela 22 - Cálculo da matriz $X'y$

$X'y$
126,4
2,2627
42
-
0,4949
7
96,325
98,325
2,25

Fonte: Produção do Próprio Autor.

O procedimento diz que deve-se calcular a matriz inversa de X^tX e multiplicá-la pela matriz X^ty , obtendo-se a seguinte matriz:

Tabela 23 - Cálculo da matriz $(X^tX)^{-1}X^ty$

$(X^tX)^{-1}X^ty$
11,59863
0,266205
-
0,058232
-
0,194704
0,055296
0,444444

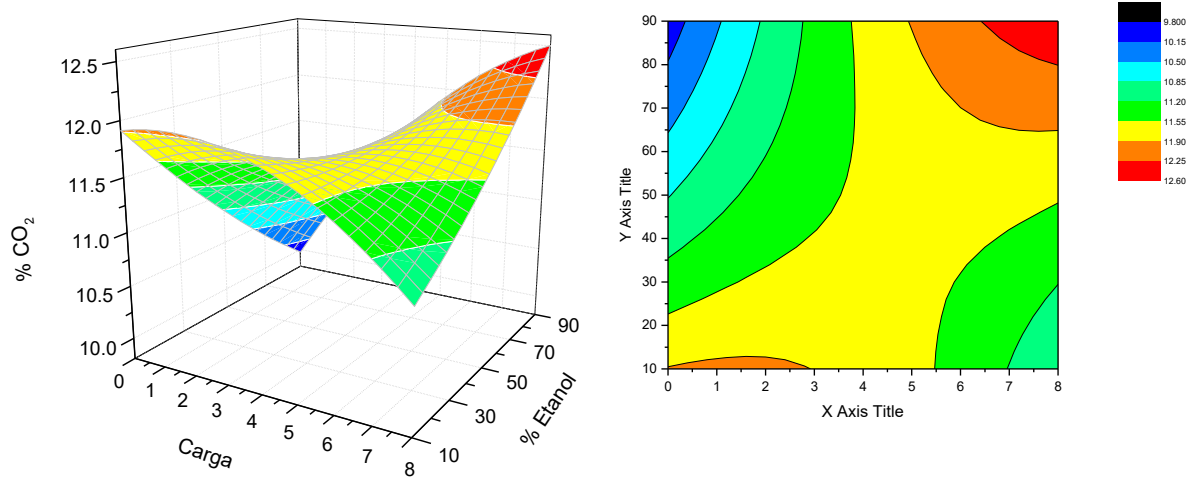
Fonte: Produção do Próprio Autor

Os valores obtidos dessa matriz são respectivamente b_0 , b_1 , b_2 , b_{11} e b_{22} e b_{12} . Portanto utilizou-se a equação (9) para montar a superfície de resposta.

$$\hat{y} = 11,60 + 0,27x_1 - 0,06x_2 - 0,19x_1^2 + 0,06x_2^2 + 0,44x_1x_2 \quad (9)$$

A partir dessa equação traçou-se a seguinte superfície de resposta e de contorno conforme Figura 11.

Figura 11 - Superfície de Resposta: Concentração de CO₂ em função da carga e percentual de etanol.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

Esse método é aplicado para cada um dos fatores avaliados nesse trabalho, levando em conta os dados obtidos durante cada um dos experimentos.