



UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOLOGIA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GESTÃO HÍDRICA E AMBIENTAL

**“Os Efeitos da Variabilidade da Qualidade do Combustível, na
Emissão de Gases Efeito Estufa e Particulados nos Motores da Usina
Termoelétrica da Mineração Rio Do Norte S.A em Porto Trombetas- Pará”**

Autor: Jefferson Oliveira Rebouças

Orientador: Prof. Dr. Milton Antônio da Silva Matta

Porto Trombetas, 19/08/2010

**“Os Efeitos da Variabilidade da Qualidade do Combustível, na
Emissão dos Gases Efeito Estufa e Particulados nos Motores da Usina
Termoelétrica da Mineração Rio do Norte S.A em Porto Trombetas- Pará”**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Gestão Hídrica e
Ambiental, como requisito parcial à obtenção do título de especialista em Gestão
Hídrica e Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Milton Antônio da Silva Matta

Porto Trombetas – Pará

2010

**“Os Efeitos da Variabilidade da Qualidade do Combustível, na
Emissão de Gases Efeito Estufa e Particulados nos Motores da Usina
Termoelétrica da Mineração Rio do Norte S.A em Porto Trombetas- Pará”**

Banca Examinadora

Prof. Dr. Milton Antônio da Silva Matta- Orientador
Universidade Federal do Pará

Prof. Ms. José Fernando Pina Assis
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr Itabaraci Nazareno Cavalcante
Universidade Federal do Ceará

Porto Trombetas, 19/08/2010

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo determinar qual a correlação estatística que existe entre o consumo específico de combustível de um motor Diesel a quatro tempos, usado em usina termoelétrica, conhecido como estacionário marítimo e a concentração das emissões dos gases do efeito Estufa e Particulados, quando o mesmo queima um combustível pesado, ultra viscoso e de elevada densidade específica. A pesquisa foi desenvolvida em um motor estacionário de grande porte, pertencente à Mineração Rio do Norte S.A que se encontra localizado na sua usina Termoelétrica. O motor faz parte de um conjunto de cinco grupos-geradores, que possuem características operacionais idênticas. Existe por parte da empresa geradora uma grande preocupação na redução contínua destas emissões, já que ela vem promovendo diversos programas para a redução destes níveis de emissões. O estudo em questão é um destes exemplos, pois a aplicação dos resultados desta pesquisa vem sendo utilizado na operação e manutenção destes motores. Existe uma grande variabilidade na qualidade de combustível atualmente fornecido para as usinas termoelétricas em todo o mundo; a qualidade do óleo combustível está intimamente relacionada com o tipo do processo do refino do óleo combustível, o que vem dificultando o controle interno da qualidade pelos usuários. Com o crescente esgotamento das reservas mundiais de petróleo, os compostos de hidrocarbonetos aromáticos, que apresentam uma viscosidade e Índice Aromático de Carbono Calculado (CCAI) elevados são vendidos prioritariamente para as usinas termoelétricas. Nesta pesquisa foi usada a metodologia Seis Sigmas, que tem foco na resolução de problemas complexos. Foi então obtido uma equação empírica que relaciona as características físico-químicas do óleo combustível com o processo da combustão destes motores. Foi determinada ao final da pesquisa uma faixa de valores de consumo específico de combustível onde as concentrações dos gases do efeito estufa e particulados ficaram dentro de valores limites aceitáveis pelas normas vigentes. Palavras chave : Qualidade do óleo – Mineração Rio do Norte S.A- Gases Efeito Estufa.Variabilidade.

SUMÁRIO

1-INTRODUÇÃO	6
2-OBJETIVOS	6
2.1-OBJETIVO GERAL	6
2.2-OBJETIVO ESPECÍFICO	6
3-METODOLOGIA	7
4-RELEVÂNCIA DA PESQUISA	10
5-EMBASAMENTO TEÓRICO	10
5.1-INFLUÊNCIAS DO PROCESSO DE REFINO DO PETRÓLEO	11
5.1.1-Destilação atmosférica	13
5.1.2-Destilação a vácuo	13
5.1.3-Craqueamento(quebra das moléculas) térmico	14
5.1.4-Craqueamento(quebra da cadeia das moléculas) catalítico	15
5.2-PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO ÓLEO	15
5.2.1-Viscosidade	16
5.2.2-Densidade Específica	17
5.2.3-Relação carbono\asfalteno	18
5.2.4-Índice Aromático de Carbono Calculado (CCAI)	19
5.2.5-Poder Calorífico do Óleo Combustível(PCS)	20
6-O ESTUDO REALIZADO	21
6.1-ASPECTOS METODOLÓGICOS DA PESQUISA	21
6.1.1-Descrição das características da pesquisa científica	21
6.2-DELIMITAÇÕES DO UNIVERSO DOS DADOS	23
6.3-DETERMINAÇÃO DA EQUAÇÃO EMPÍRICA $Y=F(X_1,X_2,\dots,X_n)$	23
6.3.1-Determinação das variáveis de processo usando os Seis Sigmas	23
6.3.2-Correlação estatística: consumo específico x emissão de gases	29
7-CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	34
8-BIBLIOGRAFIA	35

1- INTRODUÇÃO

O presente trabalho foi desenvolvido face à importância do crescente aumento da poluição atmosférica causada em grande parte pelas emissões de gases de efeito estufa e particulados e a constante mudança dos valores máximos destes patamares, que são descritas em inúmeras legislações internacionais.

Empresas de nível mundial têm procurado empreender projetos tecnológicos a fim de manter estas emissões dentro de níveis aceitáveis em seus países. A poluição proveniente de motores a combustão interna e especialmente as usinas termoelétricas que usam os estes tipos de máquinas primárias de geração de energia elétrica, tem passado por um aumento gradativo da fiscalização destas emissões.

2- OBJETIVOS

2.1-OBJETIVO GERAL

Determinar uma equação matemática que correlacione estatisticamente as concentrações das emissões dos gases de efeito estufa, monóxido de carbono (CO) e Particulados, com o consumo específico do motor e assim delimitar uma faixa teórica aceitável de operação dos motores tipo MAN B&W 9L 48/60, criando um novo procedimento operacional para os motores.

2.2- OBJETIVO ESPECÍFICO

Para que o objetivo geral fosse atingido, foi preciso definir uma equação empírica que correlaciona o consumo específico de combustível dos motores com as suas principais variáveis, que impactam a qualidade do combustível (densidade, viscosidade, temperatura do ar de admissão, temperatura do combustível, pressão do combustível) e que tem influência direta no consumo de

combustível. Os dados coletados para a pesquisa foram os consumos específicos do motor em diferentes datas, os valores das concentrações das emissões atmosféricas e características físico-químicas do óleo combustível. Este trabalho definiu as seguintes propriedades e contaminantes, bem como suas influências na operação do motor Diesel:

- Gravidade específica ou densidade;
- CCAI;
- Poder Calorífica (PCI);
- Sódio;
- Resíduo de Carbono e Asfaltenos ;
- Cinzas;
- Água

3- METODOLOGIA

Os procedimentos adotados para a realização do experimento foram os seguintes:

1-Estudo bibliográfico da influência das propriedades físico-químicas do óleo pesado(BPF) no processo de queima do combustível dentro do motor.Este estudo corresponde aos itens 5.1.1 até 5.2.5.

2-Aplicação da metodologia Seis Sigma(Definir,Medir,Analisar,Melhorar e Controlar) com a finalidade de identificação das variáveis do processo da queima do combustível que mais influenciam o consumo específico de combustível.

3-Montagem do experimento científico para a confirmação dos valores estimados do consumo de combustível versus consumo específico medido, que foram baseados na influência das variáveis encontradas no item 2. Foi aplicado a ferramenta conhecida como DOE(Desenho estatístico do processo), que definiu uma equação que relacionou o consumo específico com estas variáveis.

4- Coleta de trinta amostras das emissões dos gases de exaustão do motor usando um medidor tipo opacímetro, em um período de 24 horas.

5-Coleta de trinta amostras dos consumos específicos dos motores na mesma data do item 4. Foi realizada então uma regressão linear entre os valores do consumo específico e as emissões de Monóxido de Carbono, para a verificação dos resultados.

6-Delimitação da melhor faixa operacional dos motores, considerando as propriedades do combustível que está sendo usado no momento e aquele que ainda será ainda transportado para a usina de Geração de Energia Elétrica.

Esta pesquisa foi realizada em um motor de ignição por compressão tipo MAN B&W 9L 48/60 quatro tempos, com injeção direta de combustível na câmara de combustão, que apresenta as seguintes características técnicas:

- a) Potência no eixo: 9930 KW
- b) Rotação nominal do motor: 514 rpm
- c) Pressão média efetiva do êmbolo: 22,6 bar
- d) Velocidade média do êmbolo: 10,3 m/s
- e) Diâmetro do cilindro: 480 mm
- f) Curso: 600 mm
- g) Cilindrada de um cilindro: 108,6 dm³
- h) Comprimento da Biela: 1.930 mm
- i) Disposição e quantidade de cilindros: 9 em linha
- j) Razão de compressão: 14:4

As medições das emissões de gases e particulados foram analisadas na chaminé do motor que foi ensaiado usando um equipamento, cujo princípio de funcionamento é um sensor de opacidade tipo OMD41, do fabricante SICK do Brasil.

Este equipamento funciona pelo princípio da transmitância autocolimatada, onde um feixe de luz atravessa as partículas de gás que se pretende medir, com uma pequena fração de absorção, garantindo uma leitura eficiente da amostra. Este princípio é baseado na espectro-fotometria que estuda e trata dos efeitos de absorção e dispersão de luz, segundo as leis de Lambert-Beer.

Como fonte de luz, utiliza o sistema com LED de alta frequência que além de ter uma vida útil de no mínimo 5 anos, contra 2 anos do sistema com luz alógena, possui a característica de inibir a influência de luz espúria (ambiente) na medição, e tem uma maior eficiência na correção dos valores de medição pelo ajuste automático do zero livre. :(Sick, 2010, p.35).

As análises efetuadas por este analisador nos fornecem as seguintes medições de gases: Monóxido de Carbono (CO), Monóxido de Nitrogênio (NO), Dióxido de Enxofre (SO₂), Óxido de Enxofre (SO), Dióxido de Nitrogênio (NO₂), Óxido de Nitrogênio (NO), Dióxido de Carbono (CO₂) e concentrações de particulados.

Equipado com mira microscópica para alinhamento do sistema e controle automático de ciclo integrado (Checa Cybele) para correção dos valores de medições em 4 pontos (zero livre, 30%, 70% e Span), conforme características técnicas abaixo:(Sick, 2010, p.95).

Princípio de medição: Transmitância autocolimatada;

Fonte de luz: LED;

Sensibilidade espectral: 500 - 600 nm;

Incidência de luz estranha: não há;

Faixa de medição máx: Transmissão Opacidade Extinção;

100 - 0 0 - 100% 0 – 2;

Faixa de medição mín: 100 - 80% 0 - 20% 0 - 0,1;

Concentração em mg/Nm³: Faixa mín. 0 - 200 mg/Nm³;

Faixa máx. 0 - 4000 mg/Nm³;

Precisão: ± 2% dos valores medidos;

Passo Óptico: 0,5 a 10 metros ou maior sob consulta;

Temperatura dos gases: Máximo 600 °C;

Temperatura ambiente: -20 a +55 °C;

Tempo de resposta: 1 - 360 segundos com passo de 1 segundo ajustáveis;

Sinais de entrada: 4 entradas binárias com isolamento galvânica.

Na metodologia científica empregada foram feitas diversas medições dos gases e particulados antes e após as manutenções programadas dos motores usando para isto um medidor on line de transmitância autocolimada de gases e os parâmetros operacionais dos motores foram analisados através da técnica do balanceamento dinâmica, conhecida internacionalmente como análise da assinatura dos motores, do fabricante Windrock.

Na análise dos dados foi usado o software estatístico intitulado Minitab 15, para se concluir sobre as hipóteses, já descritas acima a cerca do aumento ou diminuição das concentrações dos poluentes.

4- RELEVÂNCIAS DA PESQUISA

A importância desse trabalho refere-se a determinação de um valor de referência máximo para consumo específico de combustível dos motores do sistema de Geração de Energia Elétrica da Mineração Rio do Norte (Especificamente a Unidade Geradora II), que garantirá um valor de concentração de emissão do gases de efeito estufa e particulados, de tal modo a não ultrapassar os limites de tolerância em vigor pelo Órgão Regulamentador. A redução da emissão dos gases de efeito estufa, fica assim garantida e delimitada a uma faixa padrão característica para a operação de todos os motores desta usina.

5- EMBASAMENTO TEÓRICO

Um conjunto de fatores é importante para embasar a pesquisa aqui descrita e são tratados a seguir.

5.1- INFLUÊNCIAS DO PROCESSO DE REFINO DO PETRÓLEO

A qualidade do óleo pesado (HFO) é geralmente determinada pela qualidade do óleo cru e o processo de refinaria utilizado. Por esta razão, os óleos pesados, com a mesma viscosidade, dependendo do local de abastecimento de combustível, podem ser muito distintos. (Vermeire, 2005, p. 15).

Normalmente óleo pesado é uma mistura de óleo residual e de óleo destilado. Os componentes da mistura provêm muitas vezes de processos de refinaria moderno, como Visbreaker ou instalações de cracking catalíticas. Estes processos podem ter uma influência desvantajosa na estabilidade do óleo combustível, bem como nas características de combustão e ignição do combustível. (Vermeire, 2005, p. 43).

As empresas fornecedoras de óleo mineral fornecem óleos pesados de acordo com as especificações determinadas no nível das normas internas de cada país. A experiência revela que estas especificações são cumpridas em todo mundo e que se encontram dentro dos limites das especificações internacionais (por exemplo: ISO 8217, CIMAC 1990, British Standards MA-100). Os fabricantes de motores pressupõem normalmente que os combustíveis são usados segundo estas especifica.

Foi importante neste trabalho o estudo da influência dos contaminantes do óleo combustível queimado no motor, fornecido pelo Petróleo Brasileiro S.A conhecido comercialmente pela sigla OCCMA (O COMB CONTROLE METAL ATE), classificado como óleo pesado HFO, possuindo uma viscosidade cinemática máxima a 50°C de 1200 Cst.

Os óleos crus possuem uma grande variedade de hidrocarbonetos, que vão desde gases leves, voláteis até resíduos pesados. O óleo residual são de fato, os resíduos pesados que resultem do processo de refino. Quando refinamos o óleo primário, produzimos uma grande variedade de hidrocarbonetos que são bem aceitos no mercado de combustíveis e outros que não são bem aceitos.

Podemos classificar os hidrocarbonetos, que mais freqüentemente são encontrados nos óleo pesados em quatro classes principais: Parafínicos, Aromáticos, Naftênicos e Ofelinicos.

O hidrocarboneto Parafínico tem uma densidade especifica (API*) menor do que a encontrada nos compostos aromáticos, que possuem o mesmo ponto de ebulição, enquanto que os Naftênicos e as Ofelinas têm uma densidade especifica intermediária. Este composto possui uma combustão fácil, que são características desejáveis nos óleos destilados, tais como o óleo diesel.

Os hidrocarbonetos aromáticos possuem os maiores valores de densidade especifica dentre todos os hidrocarbonetos e também possui a maior proporção de carbono, o que ocasiona o aparecimento de fumaça, o que de certo modo limita o seu uso em motores a combustão interna.

Os compostos Naftênicos são extremamente estáveis e apresentam uma formula química em anel e em muitos casos são mais estáveis que as parafinas. Estes compostos são mais comumente encontrados nos óleos marítimos pesados do que nos óleos destilados.

Os hidrocarbonetos chamados de Ofelinas são mais quimicamente ativos, do que os outros três hidrocarbonetos e editam sujeitas à oxidação ou polimerização, formando borras. As Ofelinas não estão presentes em grandes quantidades nos óleos destilados, mas são freqüentemente encontrados em grande quantidade nos óleos que passaram pelo processo catalítico.

A qualidade do óleo combustível, está intimamente relacionada com o tipo do processo do refino do óleo combustível. Os quatro tipos principais de refino são:

- Destilação Atmosférica;
- Destilação a Vácuo;
- Craqueamento(Redução ou quebra das moléculas) térmico;
- Craqueamento(Redução ou quebra das moléculas) catalítico.

5.1.1 - Destilação Atmosférica

É o processo mais antigo e mais comum do refino do petróleo e consiste no aquecimento do óleo cru em uma torre de destilação atmosférica em uma temperatura que não ultrapassa 37°C. A torre de fracionamento, que pode ter 30 metros de altura, contém vários discos em intervalos de aproximadamente 0,5 m. Na torre os vapores quentes borbulham através de líquido condensado nos pratos, e o petróleo bruto é separado em várias frações.

Os compostos de ponto de ebulição mais elevado são condensados nos pratos inferiores, e os compostos de ponto de ebulição mais baixo nos pratos superiores, porque o nível de temperatura na torre diminui ao passar dos pratos inferiores ao superior. Em níveis arbitrários na torre de fracionamento, as porções condensadas são retiradas para tratamentos específicos a fim de fornecer os produtos desejados.

Os óleos residuais obtidos por este processo foram primeiramente usados como combustível em motores estacionários marítimos nas décadas de 50, 60 e 70. Eles fornecem uma combustão limpa, com baixa concentração de particulados e possuem uma grande facilidade no transporte, estabilidade e compatibilidade.

A densidade absoluta a 20°C destes óleos está frequentemente abaixo de 0,98 g/ml, o que é um fator muito importante nas usinas termoelétricas e navios, já que esta densidade facilita a centrifugação do óleo pesado e ultraviscoso, que deve estar livre de sedimentos e água quando é introduzido na câmara de combustão destes motores.

5.1.2 - Destilação a Vácuo

É uma variação do processo de destilação atmosférica. Quando a pressão dentro da torre de destilação ou condensação fica menor do que a pressão atmosférica, ele faz com que o óleo residual produzido contenha outros destilados pesados, que concentram impurezas e carbono que se depositarão no fundo da

torre a vácuo. O destilados a vácuo são normalmente vendidos para a indústria marítima, já que possuem uma alta viscosidade.

Os destilados depositados no fundo da torre a vácuo podem ser refinados em um processo conhecido com Visbreaking, onde o estoque deste destilado é aquecido em alta temperatura e pressão para que o craqueamento ocorra com mais facilidade. No final deste processo a viscosidade deste destilado é reduzido para que seja produzido um destilado com a viscosidade bem menor. Embora este produto possa ser utilizado como um combustível pesado, como é no caso do Brasil, este processo eleva em muito a densidade do óleo produzido e outras características indesejáveis do combustível , como um alto índice de resíduo de carbono e de Asfaltenos.

5.1.3 - Craqueamento Térmico

O craqueamento é um termo empregado para exprimir a degradação de grandes moléculas de hidrocarbonetos em compostos menos complexos de ponto de ebulição inferior. Entretanto, a reação de craqueamento usual sempre envolve recombinação ao lado de decomposição. Assim , os produtos de craqueamento não são apenas os desejados compostos de baixo ponto de ebulição , mas também alguns outros com pontos de ebulição superiores aos do produto original. Estes últimos compostos podem ser reciclados –isto é reconduzidos à câmara de craqueamento.

Este processo também produz óleo residual com alto índice de densidade, enxofre, Vanádio e Resíduos de Carbono, o impacto deste processo produz um óleo residual craqueado, que é mais difícil de queimar e tem um poder calorífico de baixo valor, provocando o aparecimento de borra, ocasionando a parada indevida do motor e custos de manutenção corretiva.

5.1.4 - Craqueamento Catalítico

Este processo é uma variação do craqueamento térmico. O craqueamento catalítico, incluindo o craqueamento catalítico fluídico (F.C.C) são processos no qual um catalisador químico é usado para acelerar o processo de craqueamento térmico. A presença de um catalisador granulado, que é adicionado ao processo permite que as longas cadeias de moléculas se quebrem em cadeias curtas, em baixas temperaturas e pressões. Este catalisador algumas vezes é chamado de “catalisador fino” e ele é extremamente duro e abrasivo e parecido como uma areia grossa que pode aumentar rapidamente o desgaste das bombas de injeção, válvulas de combustível, injetores, anéis dos pistões, camisas dos cilindros e as aletas dos turbo compressores.

5.2- PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO ÓLEO COMBUSTÍVEL

A qualidade do óleo combustível pode afetar imensamente o desempenho, operação e manutenção do motor Diesel.(Guzzella, 2004, p.101).

Para que possamos entender melhor a importância da qualidade do combustível, é necessário termos uma compreensão básica das características do combustível, propriedades e contaminantes que impactam a operação do motor Diesel. Este motor é muito eficiente em usinas termoelétricas e ele possui um alto grau de sensibilidade as características e contaminantes, bem como os serviços auxiliares da usina termoelétrica que realizam o aquecimento do óleo pesado.

Na análise feita nesta monografia, a propriedade do óleo é considerada uma característica que ocorre dentro do óleo, desde sua fonte crua ou resultante do seu processo de refino, do qual foi produzido. Um contaminante é considerado uma partícula estranha que foi introduzida dentro do óleo, como resultado do refino, transporte ou armazenagem.

5.2.1 - Viscosidade

Viscosidade é a medida da resistência que o óleo possui a fluir. Quando é expressa em segundos de Redwood 1 (SR1), é o tempo necessário para que uma quantidade fixa de combustível, passe em um orifício de tamanho fixo a 100 graus Fahrenheit. Quanto maior for a Viscosidade, geralmente será também a densidade específica do óleo combustível.

A viscosidade do óleo do petróleo aumenta, quando o óleo é esfriado e diminui quando ele é aquecido. Por esta razão o valor da Viscosidade de um óleo deve ser acompanhado, pelo valor da temperatura de amostra do ensaio.

Os dois métodos mais conhecidos de teste de Viscosidade são o Saybolt e método Cinemático (Cst). Destes métodos o Saybolt (ASTM D-88), é o mais freqüentemente encontrado em conjunção com a medição do óleo lubrificante. Hoje em dia o método Cinemático é mais usado, devido a ser mais preciso.

A Viscosidade é usada principalmente para ser informações referente ao manuseio, tratamento e atomização do combustível. Entretanto é um indicador aproximado do índice de carbono e Asfaltenos. Quanto menor for a Viscosidade do óleo pesado, mais fácil é separar a água e as partículas sólidas que entram no motor. Embora um valor alto de Viscosidade necessite um pré-aquecimento eficiente, isto não constitui um problema maior nas termoelétricas.

Cuidados devem ser tomados , quando óleo é aquecido a temperaturas superiores a 135 °C ,pois o craqueamento do óleo pode ocorrer e gases podem ser desprender e a água pode vaporizar, criando bolhas de gases dentro da linha de abastecimento.

Um aquecimento insuficiente pode resultar em uma atomização pobre do combustível e um atraso no ponto de ignição do combustível, o que pode provocar arranhões nos cilindros e falhas nos anéis dos pistões, incrementando o aumento gradativo do consumo de óleo combustível do motor. Quando temos um valor alto de Viscosidade, na maioria das vezes será necessário aumentar a pressão de bomba de combustível, para evitarmos a vaporização excessiva do combustível, provocada pelo pré-aquecimento anormal do mesmo antes de entrar no motor.

5.2.2 - Densidade Específica

A densidade específica é definida como a relação entre um determinado peso de um produto a 15 °C e o mesmo peso de água equivalente na mesma temperatura.

A importância da densidade específica em relação ao motor diesel e aos ensaios realizados residem no fato que as centrífugas de combustível, apresentam eficiências baseadas na diferença de densidade entre os dois produtos, ou seja, quando a densidade específica se aproxima do valor unitário, mais difícil será a remoção das partículas de água e sólidas nas condições operacionais das centrífugas.

Desde que os óleos pesados devem estar livres de água e do sal dissolvido nelas, uma capacidade anormal de operação da centrífuga será necessário para manter o sistema operacional e um desgaste excessivo do anel de vedação da mesma ocorrerá.

Valores elevados da densidade específica indicam que o óleo apresenta um grande craqueamento catalítico, ou seja, óleo terá fortes características aromáticas e baixa qualidade de combustão, o que pode levar a um desgaste da camisa do cilindro anormal. Este efeito será mais perceptível, quanto maior for a velocidade nominal do motor.

Quando aquecemos o óleo, estamos facilitando o processo de separação do combustível, porque a densidade do óleo combustível se modifica mais rapidamente com a variação da temperatura, do que a densidade da água. Quando a viscosidade decresce, ajuda o processo de centrifugação também. Um valor de densidade específica máxima de 0.991(15°C) pode ser tolerado satisfatoriamente, quando temos um valor acima deste patamar poderemos danificar o anel de selagem da centrífuga.(Guzzella, 2004, p.101).

A Densidade específica no futuro irá aumentar para valores acima de 0,995 Kg/m³. Esta tendência, também significa que teremos uma baixa relação de carbono/hidrogênio, o que aumentará a dificuldade de obtermos uma combustão

limpa e aumentará o depósito de resíduos de carbono dentro da câmara de combustão, aumento da concentração de particulados. Isto foi primariamente causado pelo aumento do processo de refino catalítico ou térmico.

5.2.3 - Relação Carbono/ Asfaltenos

O índice de Resíduo de Carbono Conradson (CCR) é a medida da tendência do óleo de favorecer a formação de depósitos de carbono durante a combustão e indica a tendência de formação de coque do óleo pesado.

Os óleos pesados que sejam ricos em carbono tem uma grande dificuldade de queimar e neste caso a combustão apresenta características que facilitam a formação de poeira e depósitos de carbono na câmara de combustão.

Desde que os depósitos de carbono são os principais fatores do desgaste por abrasão, o valor do CCR é um importante parâmetro do motor para o funcionamento com óleo pesado ou Diesel. O tipo de carbono também pode provocar o desgaste por abrasão.

O índice de carbono é obtido quando uma amostra do produto é submetida à alta temperatura, como é feito nos métodos ASTM D189 ou D-524 (Ramsbottom).

Quando temos um valor elevado da relação CCR/Asphaltano significa que encontraremos um alto nível de resíduo decorrente do processo de combustão, o que pode levar a um atraso da ignição do combustível. Durante o processo da expansão dos gases, teremos a formação de fuligem e desgaste por abrasão.

Normalmente, uma parte significativa do óleo combustível injetado deverá queimar entre o ponto morto superior do cilindro e 90° depois do ponto morto superior, quando então os gases gerados na expansão agem no pistão para completar o curso de expansão.

O efeito da queima tardia do combustível pesado tem importância fundamental, porque o tempo extra que se leva para a combustão completa do

produto expõe uma grande área da camisa do cilindro às chamas, sujeitando o lubrificante do cilindro às altas pressões e temperaturas, o que provoca o aparecimento de pontos quentes e queima da película do óleo lubrificante. Com o passar do tempo, começará a aparecerão os desgastes dos cilindros e os depósitos de carbono.

5.2.4 – Índice Aromático de Carbono Calculado (CCAI)

A dificuldade de ignição do combustível é bem conhecida de todos os técnicos que operam as termoelétricas e usam óleos residuais. Por muitos anos a qualidade da ignição dos combustíveis destilados, foi calculada através do número de Cetano do combustível para os motores Diesel. No entanto este procedimento, não pode ser aplicado, quando os motores queimam os óleos residuais, ultra viscosos, como é o caso de nossa pesquisa.

Foi desenvolvida pelos pesquisadores da Shell uma fórmula empírica que possibilita que seja avaliada com um grau de precisão aceitável, a qualidade da ignição do combustível. Ambas as propriedades físicas e químicas do óleo combustível, são importantes na ignição do combustível. As propriedades físicas são a Viscosidade e a temperatura do óleo. A qualidade da atomização é grandemente afetada pela Viscosidade do combustível, ou seja, quando temos um valor elevado de Viscosidade, para as especificações operacionais dos motores, os tamanhos das gotas de combustível ficam demasiadamente grandes e então a mistura de ar e combustível, dentro da câmara de combustão não fica bem definido. (Colin, 2007, p. 25)

A relevância da composição química do combustível, já foi comentada logo no início deste trabalho, onde frisamos que a aromaticidade ou tipo de hidrocarboneto do combustível era fundamental. Como a maioria das usinas termoelétricas no Brasil não possui um laboratório capacitado a medir a aromaticidade do combustível, usa-se o CCAI como meio de avaliar a ignição do combustível.

O Índice Aromático de carbono Calculado (CCAI) pode ser calculado usando os valores de Viscosidade e densidade. Ele pode ser calculado através da fórmula:

$$\text{CCAI} = D-81-141 \text{ Log}[\text{Log}(V+0,85)]- 483 \text{ log} [\text{Log } T+273/323];$$

Onde V = Viscosidade Cinemática (mm²/s);

Medição do ensaio T= °C(graus Celsius).

Nos ensaios amostrados nesta monografia este índice variou

De 860 até 990.

“Quanto menor for o valor calculado, mais fácil será realizada a queima do combustível”.

5.2.5- Poder Calorífico do Óleo (PCS)

Quando compramos uma batelada de óleo, temos que observar com cuidado qual o valor do poder calorífico inferior do mesmo, conhecido como PCI (Kcal/kg). A mudança no desempenho operacional dos motores advém da variação do PCI (Kcal/kg) do combustível, já que ocorre uma redução significativa da energia térmica disponível para a produção de trabalho útil no eixo do motor, durante a combustão de óleo.

Estas mudanças podem ser notadas, quando o consumo específico de combustível do motor se eleva bruscamente e eficiência operacional do motor também é reduzida. Quando temos uma amostra com o poder calorífico inferior baixo, também teremos um aumento da emissão de CO e CO₂, conforme mostraremos adiante.

A densidade específica do óleo também esta correlacionada com o seu poder calorífico inferior PCI (Kcal/kg). O valor do poder calorífico inferior está correlacionado positivamente com o valor da relação entre a quantidade de carbono e hidrogênio da amostra, ou seja, quando esta relação aumenta, a

densidade específica aumenta e o poder calorífico inferior diminui. O outro fator importante é a porcentagem de Enxofre, pois quando esta porcentagem aumenta a relação de H/C também aumenta e o resultado é que existe uma quantidade menor de hidrogênio na queima e assim o poder calorífico inferior PCI (kcal/kg) diminui. (Colin, 2007, p. 35)

6.0- O ESTUDO REALIZADO

6.1- ASPECTOS METODOLÓGICOS DA PESQUISA

6.1.1- Descrições das características da pesquisa científica.

Nesta monografia, foi usada a metodologia Seis Sigma, com o objetivo de estimar uma equação matemática que correlacionasse a resposta do processo em questão,(consumo específico de combustível), com as variáveis que mais impactassem no mesmo, ou seja, as características físicas do óleo residual consumido no motor.

É descrito sucintamente as características de cada fase da metodologia Seis Sigma com o propósito de demonstrar objetivamente o resultado da equação empírica final, a partir das seguintes etapas:

- Define (Definir);

- Measure (Medir);

- Analyse (Analisar);

- Improve (Melhorar);

- Control (Controlar).

Na etapa DEFINIR foi fixado a meta operacional do projeto, que passaram a fazer parte do mesmo. Pretendia-se alcançar um consumo específico de combustível para o motor que não ultrapasse o valor de 216,0 Kg/MWh, visto que acreditava-se que os níveis das emissões atmosféricas ficariam dentro dos patamares aceitáveis pelas normas brasileiras nesta situação. O baseline line do projeto estava então em 221,0 kg/MWh.

Na etapa MEDIR, todo o sistema de medição do projeto é validado e o planejamento da coleta de dados é iniciado.

Na etapa ANALISAR foi pesquisada a causa principal dos problema, onde foram usadas as seguintes ferramentas estatísticas para este fim: método dos 5 porquês, FMEA, métodos de comparação, intervalos de confiança da média.

Na etapa MELHORAR, foram geradas as soluções para modificar o processo a fim de aperfeiçoá-lo, com o intuito de identificar a necessidade de melhorias específicas no sistema de produção. Nesta fase foram usadas várias técnicas estatísticas como a correlação múltipla entre as variáveis, regressão simples e DOE (Delineamento do experimento), para se chegar as variáveis que mais influenciam o consumo específico do motor.

Na etapa CONTROLAR, foi estabelecida e validada um sistema para monitorar continuamente o processo, de modo a garantir que sua capacidade estatística fosse mantida. O monitoramento dos X's críticos é fundamental não só para manter a capacidade do processo estabelecida, mas também para indicar melhorias futuras. O Y (saída do processo) deve ser controlado para garantir que os resultados sejam conforme planejado.(Montgomery, 2005, p. 67).

6.2- DELIMITAÇÕES DO UNIVERSO DOS DADOS

Os dados coletados para a pesquisa foram os consumos específicos do motor em diferentes datas, os valores das emissões atmosféricas e características físico-químicas do óleo combustível que impactavam o seu consumo específico.

A idéia do trabalho é verificar os quais os procedimentos operacionais que deveriam ser modificados, ou introduzidos para se garantir que a meta fosse atingida. Os dados foram coletados durante o ano de 2009.

Através da técnica de análise estatística da metodologia Seis Sigma se chegou a um grupo de variáveis que melhor representam a variabilidade do consumo específico do motor. (Cervo, 1983, p.13).

6.3- DETERMINAÇÃO DA EQUAÇÃO EMPÍRICA $Y=F(X_1,X_2,\dots,X_n)$

6.3.1- Determinação das variáveis de processo usando as etapas Definir, Medir, Analisar e Controlar.

No desenvolvimento do trabalho, inicialmente na etapa Definir, foi construído o mapa de raciocínio do processo para que as variáveis que influenciam o consumo específico do motor fossem identificadas e analisadas de forma sistêmica. A figura abaixo representa o mapa geral do processo em análise com suas respectivas variáveis.

Vemos neste gráfico que as causas principais para o alto consumo de combustível foi dividido em duas vertentes, as perdas físicas e as perdas devidas a qualidade do combustível. As perdas físicas foram relacionadas com o sistema de manutenção preventiva dos motores e a operação dos mesmos dentro da faixa econômica. A vertente qualidade do combustível foi tratada usando a equação empírica do DOE, que leva em consideração as características de qualidade do combustível. A cada variável foi atribuído uma codificação (Y_1, Y_2, Y_3, \dots).

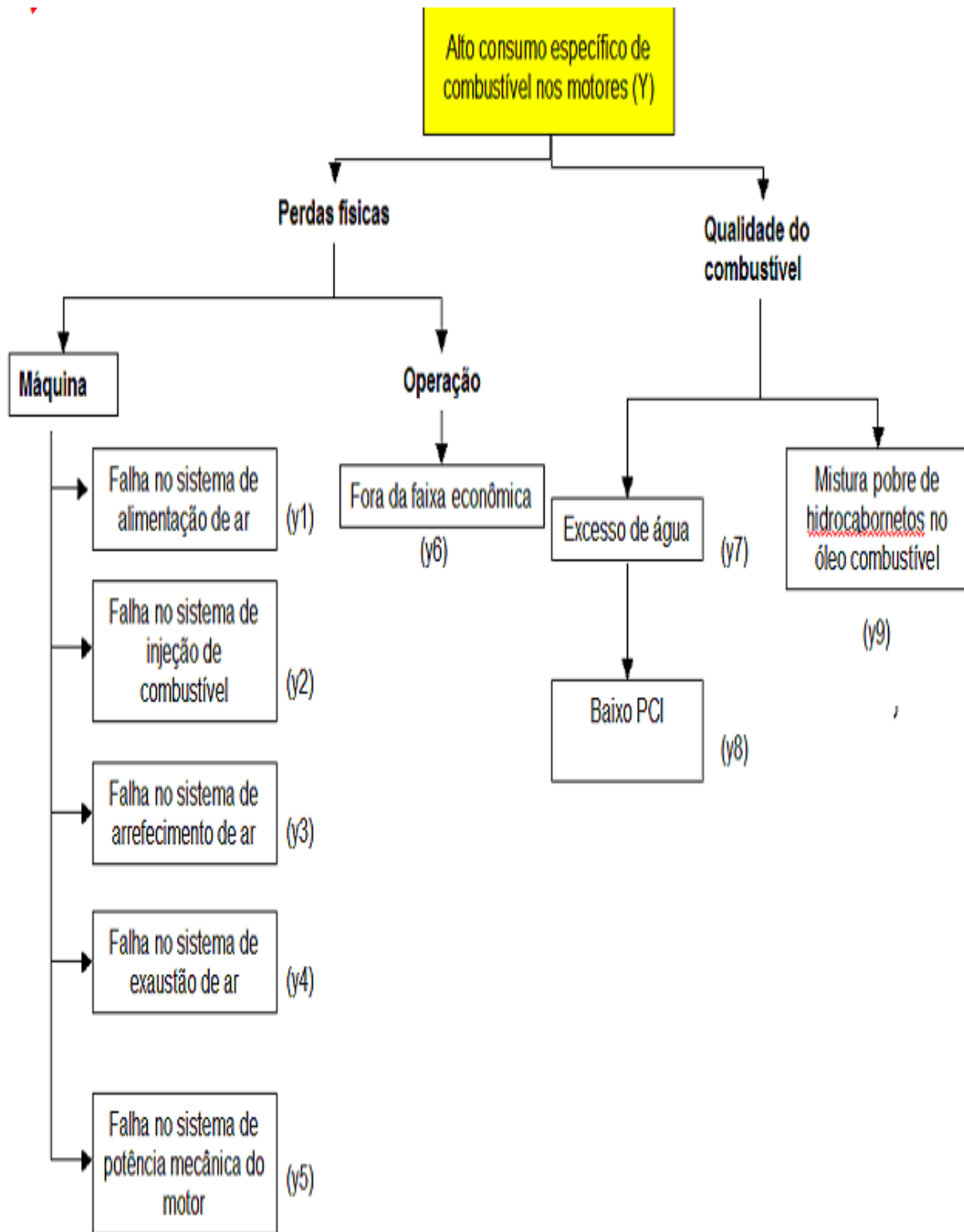


Figura 1- Mapa de variáveis do Processo do Consumo Específico do Motor
Fonte : Autor

Na Etapa Medir, foi idealizada a figura 2 conhecida como diagrama de causa-efeito que é uma ferramenta utilizada para apresentar a relação existente entre o alto consumo específico de combustível e os diversos fatores (causas) que podem influenciar neste resultado.

Verificamos nesta figura que temos quatro ramos relacionados ao problema principal (alto consumo específico de combustível), mas a pesquisa se concentrou apenas nos ramos da qualidade do combustível e operação, visto que a emissão dos gases de efeito estufa aumenta consideravelmente quando o motor não possui um faixa de operação delimitada ou não se sabe como as propriedades físico-químicas do combustível podem afetar o consumo do mesmo.

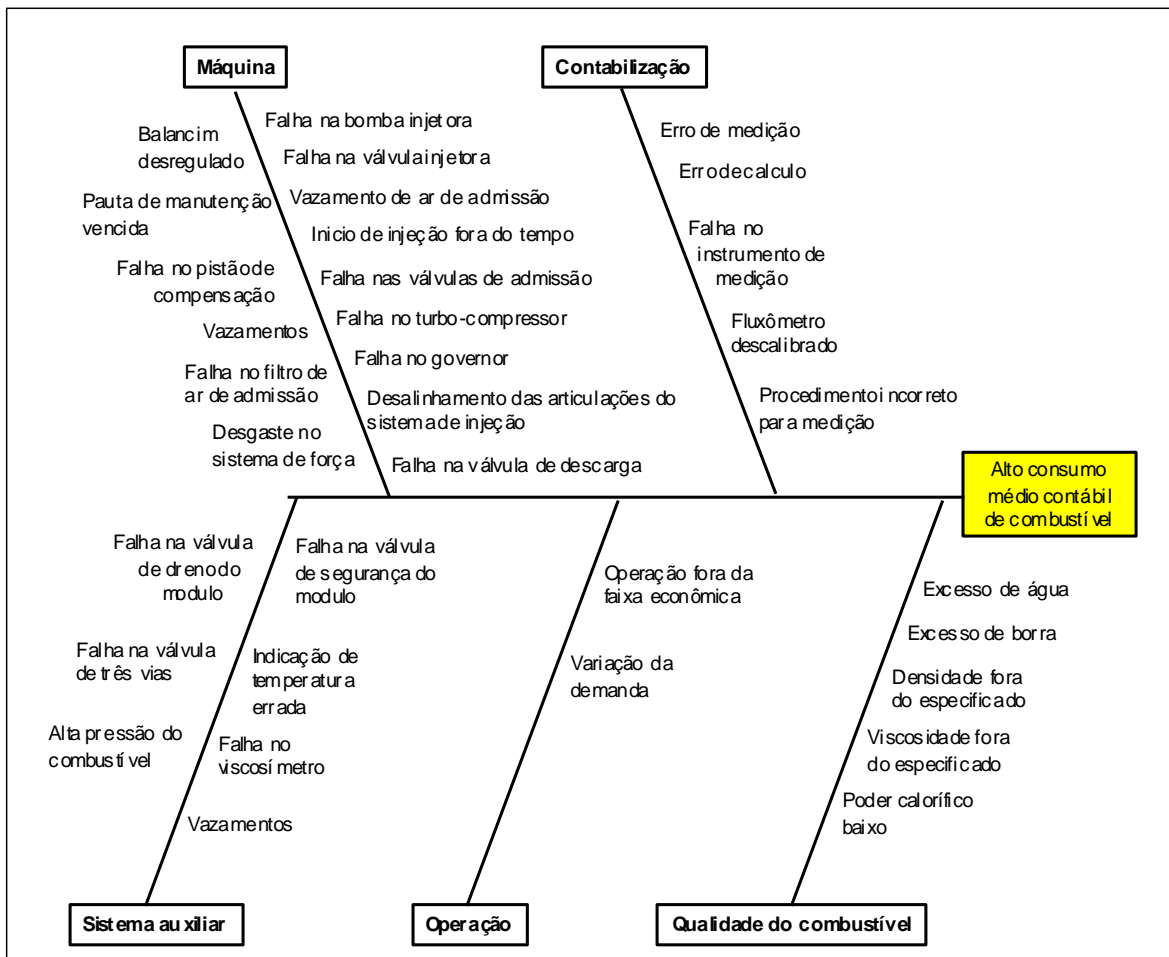


Figura 2- Estratificação de variáveis de Processo

Fonte : Autor

Na etapa Analisar além de serem usadas as ferramentas tradicionais da qualidade, as ferramentas estatísticas são usadas para identificar as causas óbvias (Xs) e não óbvias (Xs) do alto consumo específico de combustível, que leva a uma emissão de gases e particulados além do previsto em norma específica.

Podemos pensar nas etapas da metodologia Seis Sigma, como um funil, aonde vamos eliminando a cada etapa as variáveis, que não são críticas para o consumo específico de combustível, como esta demonstrado na figura abaixo.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

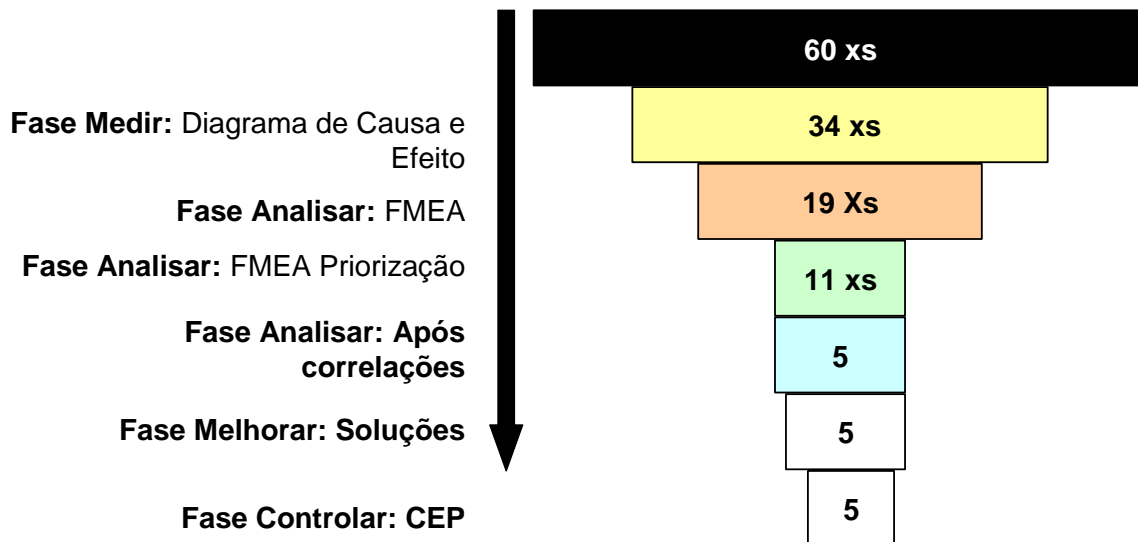


Figura 3-Análise de variáveis de Processo

Fonte : Autor

Ao final da etapa analisar de todas as correlações estatísticas, ficamos com apenas 5 variáveis críticas para o processo: **Pressão de óleo combustível do motor, temperatura do ar admissão do motor, viscosidade do óleo combustível, densidade do óleo combustível, temperatura do óleo combustível.**

A etapa Melhorar aprofunda ainda mais a descoberta das causas raízes usando técnicas de regressão e correlação combinadas com o planejamento do experimento (DOE). O termo DOE, significa Delineamento de Experimentos e foi desenvolvido pelo estatístico britânico Ronald Fischer, ele tem sido aplicado a diversas situações, na agricultura, na indústria, na medicina, visando como ajustar os fatores (X's), de modo que a resposta Y tenha o valor desejado.

Posteriormente se trabalha para transformar a descoberta das causas raízes em soluções que conseguem resolver o problema do projeto. As soluções pré-selecionadas são testadas sob a forma de pilotos e o conhecimento adquirido nos pilotos é utilizado para trabalhar o plano de implementação. O plano de implementação inclui cronograma, requerimentos de recursos, estratégia de relacionamento, comunicação e gerenciamento de mudanças e análises de riscos.

No DOE todas as variáveis controladas são modificadas simultaneamente e mede-se o resultado nas variáveis de saída com o objetivo de obter um modelo empírico da relação $y=f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$.

Na figura 4 temos a planilha que foi usada para realizar o DOE , onde vemos que o experimento Fatorial Completo foi escolhido para se fazer os ensaios. Dentre as diversas categoriais de experimentos existentes, os fatoriais completos desempenham importante papel na busca de melhorias no processo, uma vez que identificam quais são os fatores cujo efeito tem maior impacto na variável resposta.

DOE para o consumo específico de óleo combustível			
1) Processo:	Usina de geração de energia II		
2) Process owner:	Jefferson		
3) Time (líder, integrantes):	Líder: Jefferson-BB Integrantes: João Vasconcelos -Mecânico III Raimundo Quaresma -Técnico em Instrumentação Ricardo Soares- Gerente técnico -Mecânica Nilton Ferreira - técnico em produção Jose Maria- Gerente técnico- Operações.		
4) Objetivo do experimento:	Identificação das variáveis mais importantes para o consumo específico de combustível para o motor número 1		
5) Data prevista	Início: 4/10/09	Fim: 16/10/2009	
6) Respostas	Unidades	% RR?	Processo sob controle?
Consumo específico	Kg/MWh	0,8	OK
Custo	US\$	OK	OK
7) Fatores controlados	Unidades	Níveis (maximize o range)	Processo sob controle?
x1: densidade	Kg/l	0,92 – 0,93	OK
x2: Temperatura do módulo de combustível	graus	80 – 168	OK
x3: Temperatura do ar de admissão.	graus	45-58	OK
x4: Viscosidade	Cst	10 a 14	OK
x5: Pressão do módulo de combustível	Bar	5 a 8	OK
8) Fatores não controlados, previsíveis ou imprevisíveis:	Variação da carga do gerador, paradas das máquinas para a manutenção		
9) Total de ensaios (n ≥ 16, excluindo os centrais):	16 ensaios + 6 pontos centrais. O ensaio completo será repetido 2 vezes.		
10) Randomização (total/ restrita):	Será feita randomização total dos ensaios para diminuir a influência da		
11) Uso de blocos:	2 blocos		

Figura 4- Planilha de ensaio do DOE

Fonte : Autor

As etapas utilizadas para o cálculo da equação matemática foram;

1-Avaliar Outliers (valores extremos);

2-Análise das correlações entre as variáveis;

3-Ajustar o modelo de regressão/escolher o modelo mais apropriado;

4-Análise de resultados.

6.3.2 Correlação estatística Entre Consumo de Combustível e emissões de gases efeito estufa.

Seguindo os passos anteriores, chegamos então à equação empírica abaixo relacionada, onde vemos que existem variáveis que são correlacionadas:

Análise do ensaio usando o modelo fatorial completo indica que não existem os termos de segunda ordem:

temp.adm*temp.adm

viscosidade*viscosidade

Os termos estimados para a equação do DOE são :

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	213,499	0,06008	3553,372	0,000
pressão	-0,756	0,06445	-11,730	0,000
temp.admissão	0,536	0,06999	7,666	0,000
viscosidade	0,071	0,05469	1,304	0,215
densidade	0,012	0,10714	0,113	0,911
temp.oleo	0,056	0,07922	0,705	0,494
pressão*pressão	0,436	0,08888	4,906	0,000
pressão*densidade	-1,400	0,21898	-6,393	0,000
pressão*temp.oleo	-0,316	0,10632	-2,969	0,011
temp.admissão*viscosidade	-0,149	0,06378	-2,340	0,036
temp.adm*densidade	0,886	0,27426	3,232	0,007
temp.adm*temp.oleo	0,292	0,11483	2,541	0,025
viscosidade*dens	-1,011	0,20160	-5,015	0,000

R-Sq = 95,23% R-Sq(pred) = 74,51% R-Sq(adj) = 90,83%

O Software estatístico Minitab versão 15, cuja representante no Brasil é a empresa Líder Software, nos mostra que o efeito quadrático do termo temperatura de admissão e a Viscosidade foram removidos do modelo empírico, já que os seus efeitos são desprezíveis

A equação se encontra bem ajustada, pois $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 90,83\%$

A equação abaixo satisfaz 88 % dos casos, já que os óleos residuais apresentam características bastante diferentes entre si. Como o PCI e o CCAI, são variáveis que dependem diretamente da Viscosidade e Gravidade específica do combustível, optou-se em não inferir os seus efeitos.

$$Y = 213,499 + P^2 \cdot 0,436 - P \cdot 0,756 - P \cdot TC \cdot 0,316 - P \cdot D \cdot 1,4 + D \cdot 0,012 + TA \cdot 0,368 - TA \cdot V \cdot 0,149 + TA \cdot D \cdot 0,886 + TC \cdot 0,056 + TA \cdot TC \cdot 0,292 + V \cdot 0,071 - V \cdot D \cdot 1,011$$

$$R\text{-Sq}(\text{pred}) = 74,51\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 90,83\%$$

Onde:

P= Pressão do óleo combustível

TA= Temperatura do ar admissão

V= Viscosidade do óleo combustível

D= Densidade do óleo combustível

TC= Temperatura do óleo combustível

Os valores obtidos na figura 5 mostram que ao modificarmos os valores das variáveis do modelo e medirmos os valores do consumo específico do ensaio, obtemos valores próximos aos valores do consumo empírico, o que afirma que a equação está bem ajustada aos dados.

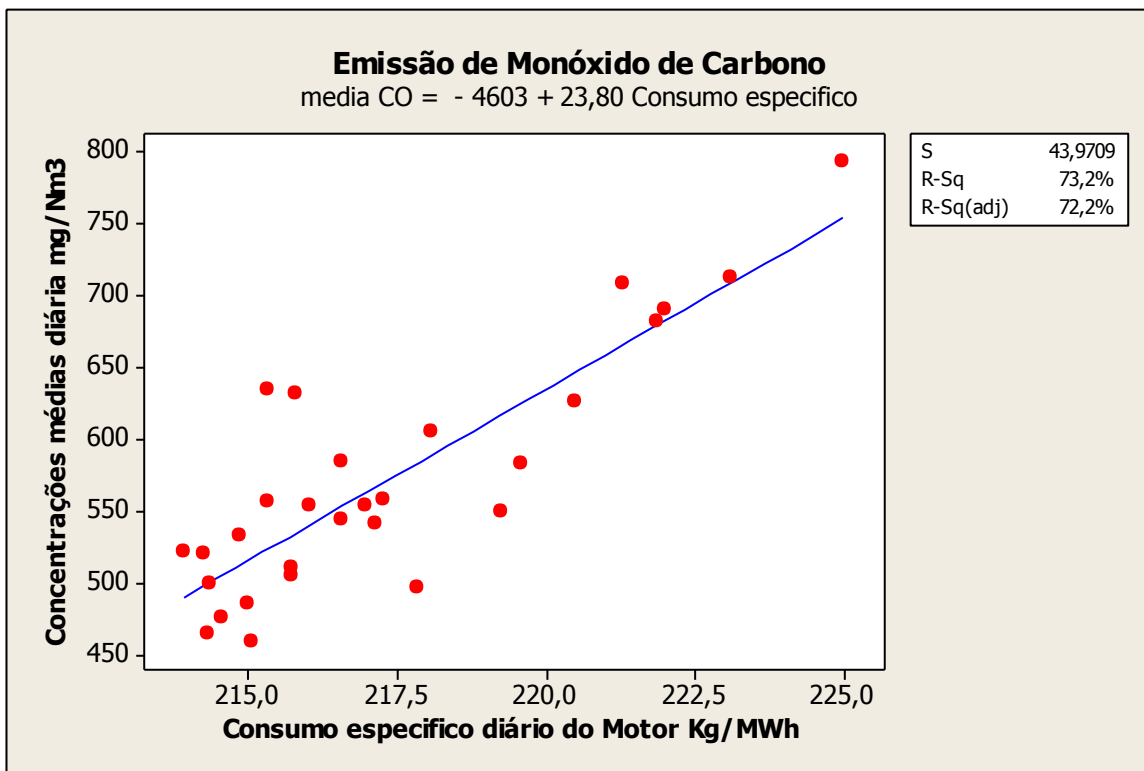
**Figura 5 : Planilha de confirmação dos dados, obtidos com a
Equação do DOE.
Fonte: Autor**

DATA	Consumo empírico	Consumo específico do ensaio	Pressão do ensaio (BAR)	temperatura de admissão do motor ensaio(°C)	Viscosidade do ensaio cSt
01/11/2009	212,37	212,42	4	45	12
02/11/2009	212,5	212,54	5	45	12
03/11/2009	212,91	212,82	6	45	12
04/11/2009	213,28	213,21	7	45	12
05/11/2009	213,45	213,4	8	45	12
06/11/2009	213,33	213,39	4	47	12
07/11/2009	214,18	214,25	4	50	12
08/11/2009	213,52	213,68	4	53	12
09/11/2009	215,4	215,49	4	55	12
10/11/2009	214,2	214,54	4	45	13
11/11/2009	214,42	214,65	4	45	14
12/11/2009	214,93	214,88	4	45	12
13/11/2009	213,34	213,45	5	45	13
14/11/2009	212,24	212,3	6	45	14
15/11/2009	211,3	211,45	6	45	14
16/11/2009	215,53	215,65	4	45	12
17/11/2009	213,25	213,38	5	50	13
18/11/2009	213,37	213,43	5	50	13
19/11/2009	214,19	214,35	6	50	14
20/11/2009	214,28	214,39	7	50	14

Os dados acima se referem aos valores de consumo específico do motor ensaiado. O valor empírico é o valor estimado pela equação empírica e consumo específico do ensaio, foi o obtido quando as variáveis críticas foram modificadas.

Figura 6- Correlação Emissão de Monóxido de Carbono X Consumo Específico do Motor

Fonte : Autor

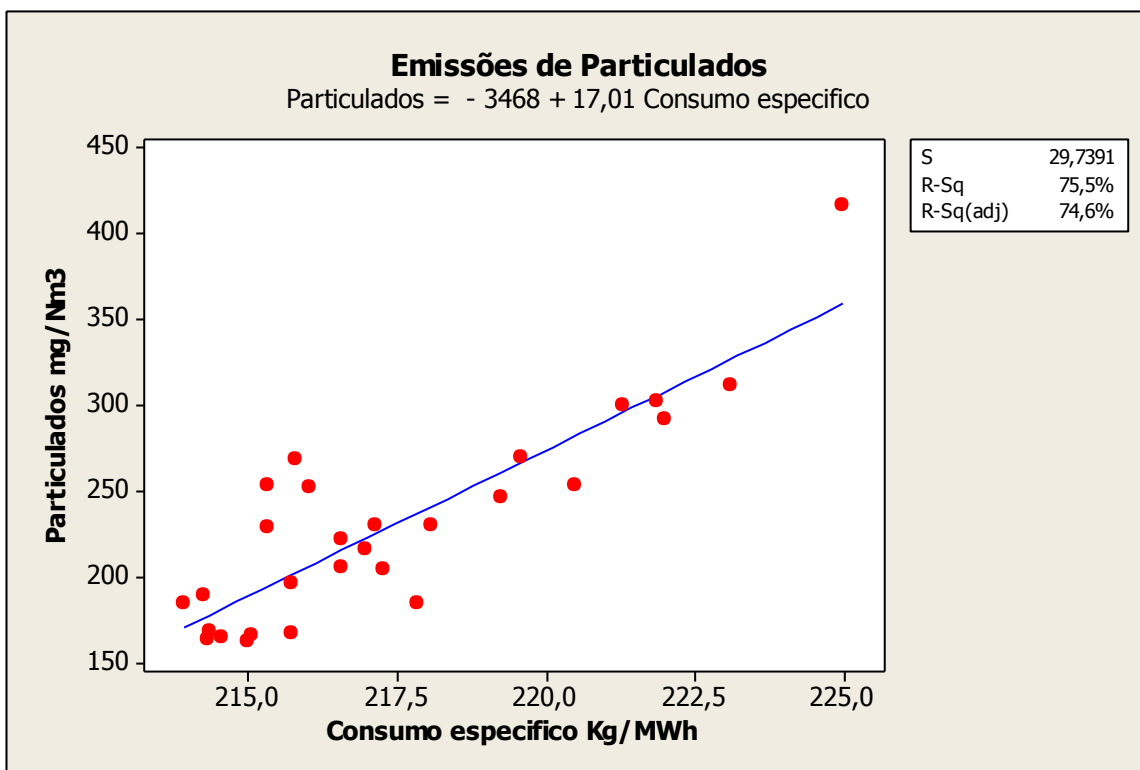


O gráfico acima foi obtido em período de 30 dias consecutivos, do mês de janeiro de 2010. O controle das emissões de Monóxido de Carbono, medidas indicam que as concentrações das emissões podem ser bem representadas por uma reta linear, pois temos um R-Sq(adj) de aproximadamente 72,2%.

O projeto mecânico do motor de ignição por compressão do combustível, preconiza que o motor deve estar trabalhando em faixa de 75 % a 80 % da plena carga para obter o melhor rendimento térmico, o que neste caso está na faixa entre 213,0 kg/Mwh e 216,0 kg/Mwh. Observa-se que valores de consumo específico fora desta faixa aumentam significativamente as emissões de CO.

Figura 7- Correlação Emissão de Particulados X Consumo específico do Motor

Fonte : Autor



O material particulado é considerado todo material sólido ou líquido, em mistura gasosa, que se mantém neste estado na temperatura do meio filtrante. Os mesmos comentários do gráfico anterior podem ser feitos para este caso.

Não existe uma legislação específica no Brasil para as emissões de gases de efeito estufa, que provém de motores estacionários marítimos, que são objeto deste estudo, no entanto adota-se a Resolução CONAMA 382 de 26 de Dezembro de 2006 e seus limites conforme descrito abaixo :

Figura 8-Valores de Referência – Fonte : Portaria Conama

Potência térmica nominal (MW)	MP ⁽¹⁾	NO _x ⁽²⁾ (como NO ₂)	SO _x ⁽³⁾ (como SO ₂)
Menor que 10	300	1600	2700
Entre 10 e 70	250	1000	2700
Maior que 70	100	1000	1800

Ficam estabelecidos os limites máximos acima para poluentes atmosféricos, provenientes de processos de geração de calor, a partir da combustão externa de óleo combustível.

Para sistemas com potência de até 10 MW, poderá o órgão ambiental licenciador aceitar a avaliação periódica apenas de monóxido de carbono, sendo que neste caso, o limite máximo de emissão deste poluente será de 80 mg/Nm³.

7- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A pesquisa científica desenvolvida nesta monografia mostra a necessidade do controle dos poluentes atmosféricos emitidos pelos motores estacionários marítimos. As emissões destes resíduos, podem ser bem planejadas e executadas, já que a predição e controle do consumo específico de combustível pode ser antecipado antes mesmo da batelada de combustível ter sido recebido pela unidade de geração de energia elétrica.

A densidade do combustível e o poder calorífico inferior podem ser definidos no momento da negociação entre as partes. A equação do DOE, vem sendo usada com sucesso para este fim e é parte integrante deste processo.

8-BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS(ABNT).Informação e documentação. Sumário-Apresentação. NBR 6027:2003.Rio de Janeiro : ABNT, Maio de 2003, esta norma substitui a NBR 6027:1989 Informação e documentação-citações em documentos-Apresentação.NBR 10520:2002.Rio de Janeiro: ABNT,Ago.2002

Apresentação de relatórios técnicos e científicos.NBR 10719:1989.Rio de Janeiro:ABNT,Ago.1989 Referências bibliográficas.NBR 6023:1989.Rio de Janeiro.Outubro 1989

-Análise dos motores de Combustão Interna.Charles F.Taylor.Edgar Bluncher. 1988

Bastos, Lília da Rocha.Manual para a elaboração de projetos e relatórios de pesquisa, teses e dissertações.Rio de Janeiro.Zahar, 1979

Cervo, Amado Luiz ; BERVIAN,Pedro Alcino.Metodologia científica.MacGraw-Hill do Brasil,1983

Colin R. Ferguson and Alan T. Kirkpatrick. John Wiley and Sons.Inc, 2005.Second Edition.March 2007

-Everything you Need to Know about Marine Fuels. Monique B. Vermeire.Chevron,2005

-Ferreira,Aurélio Buarque de Holanda.Novo dicionário da língua portuguesa.Segunda edição.

-Garcia,Othon Moacir.Comunicação em prosa moderna:aprenda a escrever,aprendendo a pensar.Segunda edição.

-L.Guzzella and C.H. Onder. Introduction to Modeling and Control Of - - Internal Combustion Engine Systems. Springer.April 2004

-Motores de Combustão Interna. Edward S.Robert.Editora Globo.1971

-Montgomery,Douglas Design and Analysis of Experiments. John Wiley and Sons.Inc, 2005

-Sick Brasil – Manual de Operação e Manutenção Analisador Industriais- 2010.