

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DOS EFEITOS DA MANUTENÇÃO PERIÓDICA DE TRATORES
AGRÍCOLAS ATRAVÉS DO MÉTODO DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

por

Luís Eduardo Accordi Ferrari

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, dezembro de 2015

ANÁLISE DOS EFEITOS DA MANUTENÇÃO PERIÓDICA DE TRATORES
AGRÍCOLAS ATRAVÉS DO MÉTODO DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

por

Luís Eduardo Accordi Ferrari
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Aprovada por:

Prof. Dr. Luiz Alberto de Oliveira Rocha, PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Charles Rech, ULBRA

Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula, DEMEC / UFRGS

Prof. Dr. Luiz Alberto de Oliveira Rocha
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 22 de dezembro de 2015

“Conhecer os outros é inteligência, conhecer a si próprio é a verdadeira sabedoria.

Controlar os outros é força, controlar a si próprio é o verdadeiro poder”

(Lao Tsé)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Paulo Smith Schneider, pela sua sapiência, por nunca ter desistido de mim, pela sua paciência e pelo apoio incondicional.

Agradeço ao PROMEC, em especial ao Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha, pela compreensão e pela paciência.

Agradeço, em especial, à minha amada esposa, Tamara Pellizzari Ferrari, pelo amor, paciência, cumplicidade, incentivo e todos outros adjetivos possíveis ao longo de todo mestrado. Sem seu apoio nada disso seria possível.

Agradeço, em especial, ao amigo e colega Vitor Kuhn, que foi fundamental na execução deste trabalho. Infelizmente nos deixou muito cedo, mas continua vivo e sorrindo em nossas memórias. Nesse momento, com certeza, está consertando tratores em algum campo distante.

Agradeço a minha família, pelo incentivo dado ao longo de todo mestrado.

À UFRGS pela oportunidade de realizar este trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de quantificar os efeitos da manutenção periódica de motores de tratores agrícolas sobre a potência medida na sua tomada de potência - TDP, e sobre o consumo de combustível. Para isso, utiliza-se o método de planejamento de experimentos, com um fatorial completo 2^5 sem repetição, totalizando 32 ensaios independentes. Para o experimento, utiliza-se um trator agrícola de rodas, com motor 6 cilindros, de 6,8 litros, com sistema de combustível de injeção direta, com uma bomba injetora rotativa, turboalimentado e com intercooler. Os parâmetros de controle são escolhidos com base na experiência do autor e seus níveis são definidos experimentalmente. São eles: a) condição externa do radiador, b) condição do filtro de combustível, c) condição do filtro de ar, d) qualidade do combustível e e) condição do óleo de motor. É possível constatar que os parâmetros com maior influência na potência são a condição do filtro de ar, condição do óleo do motor e uma interação de segunda ordem entre a qualidade do combustível e o óleo do motor. Eles são responsáveis por variações na potência de, respectivamente, 2,7%, 2,4% e 1,7%, referenciados na condição ideal de teste. O consumo de combustível não apresenta variação significativa em relação a nenhum dos fatores estudados, o que leva a concluir que não existe relação entre ele e a manutenção periódica do trator nos termos propostos por este trabalho. Por fim, mostra-se que a correta manutenção, desde sua condição extrema até sua condição ideal, aumenta em até 7% a potência útil disponibilizada pelo equipamento para o trabalho do campo.

Palavras-chave: tomada de potência, planejamento de experimentos, manutenção periódica, trator agrícola

ABSTRACT

This study aims to quantify the effects of periodic maintenance of agricultural tractors' engines on the power measured at its power takeoff - PTO, and its fuel consumption. To do this, we use the design of experiments method, 2^5 full factorial without replication, totaling 32 independent assays. For the experiment, we use an agricultural wheel tractor, with 6 cylinder engine, 6,8 liters, rotary fuel pump and direct injection fuel system, turbocharged with intercooler. The control parameters are chosen based on the author's experience and their levels are defined experimentally. They are: a) external condition of radiator, b) fuel filter condition, c) air filter condition, d) quality of the fuel and e) engine oil condition. It can be seen that the parameters with the greatest influence on power are the air filter condition, engine oil condition and a second-order interaction between fuel quality and engine oil. They are responsible for variations in power, respectively of, 2.7%, 2.4% and 1.7%, results based on ideal condition. Fuel consumption presents no significant variation in relation to any of the factors studied, which leads to the conclusion that there is no relation between it and the periodic maintenance of the tractor the way it is proposed by this work. Finally, it is shown that with the correct maintenance, since the extreme condition to the ideal condition, increases up to 7% the power provided by the equipment to work in the field.

Keywords: power takeoff, design of experiments, periodic maintenance, tractor

ÍNDICE

1	Introdução	1
1.1	Revisão Bibliográfica	2
1.2	Objetivos	7
2	Fundamentos de Projeto de Experimentos	8
2.1	Terminologia Básica	10
2.1.1	Unidade Experimental	10
2.1.2	Parâmetros	10
2.1.3	Fatores de Ruído	10
2.1.4	Níveis de um Parâmetro.....	10
2.1.5	Resposta.....	11
2.1.6	Efeito Principal	11
2.1.7	Efeito de Interação	11
2.1.8	Ensaio ou Tratamentos	11
2.1.9	Resíduo	11
2.1.10	Análise de Variância ou ANOVA (Analysis of Variance).....	12
2.1.11	Matriz de Experimentos.....	12
2.2	Fatorial 2 ^k	12
3	Método Experimental	16
3.1	Descrição da Estrutura Laboratorial	16
3.2	Descrição do Sistema de Medição de Consumo de Combustível.....	18
3.3	Instrumentação.....	22
3.4	Máquina Agrícola Ensaçada.....	23
3.5	Fatores e Níveis Analisados.....	26
3.5.1	Condição Externa do Radiador	26
3.5.2	Filtro de Combustível	28
3.5.3	Filtros de Ar	29
3.5.4	Óleo diesel	31
3.5.5	Óleo do motor	32
3.6	Softwares Utilizados	32
3.7	Matriz Experimental	33
4	Resultados e Discussão	36
4.1	Estudo da Influência dos Fatores na Potência Medida na TDP	37
4.2	Estudo da Influência dos Fatores no Consumo de Combustível	44
5	Conclusão e Sugestões de Futuros Trabalhos	52
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
	APÊNDICE A – Incertezas de medição dos instrumentos.....	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Diagrama de potenciais efeitos relacionados a oxidação do óleo lubrificante degradado pelo excessivo número de horas sob utilização em condições normais. (Adaptado de Lacey et al., 2003).....	4
Figura 2.1 - Modelo geral de um processo ou sistema. (Adaptado de Montgomery, 2005)	9
Figura 3.1 - Desenho esquemático da sala de testes dinamométricos	16
Figura 3.2 - Desenho esquemático do sistema de medição de consumo mássico de combustível.....	19
Figura 3.3 - - Desenho esquemático do atenuador de pulsação utilizado durante os ensaios. .	22
Figura 3.4 - Cultivador de cana-de-açúcar para uso em 2 linhas com desarme automático marca Dria.	25
Figura 3.5 - Trator acoplado a duas carretas de transbordo marca Antoniosi, cada uma com capacidade de 10,5 toneladas de carga, trabalhando ao lado de uma colhedora de cana-de-açúcar (fonte: site da Antoniosi).....	25
Figura 3.6 - Restrição artificial propositalmente deslocada lateralmente para mostrar sua forma de montagem e posição no trator. Durante operação a mesma foi deslocada para frente do radiador, cobrindo-o completamente	27
Figura 3.7 - Indicador analógico de temperatura demonstrando entrada em região crítica de temperatura.	28
Figura 3.8 - Sensor de pressão e válvula gaveta instalados no cabeçote do filtro final de combustível, regulando e mensurando pressão da saída do combustível em direção ao motor.	29
Figura 3.9 – Admissão de ar em condição ideal (livre de restrições e com filtros novos) a esquerda, e em condição extrema a direita.	30
Figura 3.10 – Sinal luminoso do painel de instrumentos aceso, indicando que o limite de restrição indicado foi atingido.	31
Figura 4.1 - Gráfico de Pareto com efeitos principais e interações de segunda ordem da variável de interesse Potência na TDP, com nível de significância de 5%. Valores expressos em % da condição ideal referenciada no ensaio 31.....	40

Figura 4.2 - Histograma dos resíduos relacionados ao ensaio de Potência na TDP.....	41
Figura 4.3 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ensaio de Potência na TDP.....	41
Figura 4.4 - Distribuição dos resíduos da medida de potência em função da ordem de execução dos ensaios.....	42
Figura 4.5 – Efeitos principais dos parâmetros de controle sobre Potência na TDP, dados referenciados na condição ideal representada pelo ensaio 31.....	43
Figura 4.6 – Interações de segunda ordem dos parâmetros de controle sobre Potência na TDP, dados referenciados na condição ideal representada pelo ensaio 31.....	44
Figura 4.7 – Gráfico de Pareto com efeitos principais e interações de segunda ordem da variável de interesse consumo de combustível, com nível de significância de 5%. Valores expressos em % da condição ideal referenciada no ensaio 31.....	47
Figura 4.8 – Histograma dos resíduos relacionados à medida de consumo de combustível, onde fica evidenciada a distribuição não normal dos resíduos de parte dos ensaios.....	48
Figura 4.9 – Distribuição de probabilidade normal dos resíduos na medida de consumo de combustível.....	49
Figura 4.10 – Distribuição dos resíduos da medida de consumo de combustível em função da ordem de execução dos ensaios.....	50
Figura 4.11 – Efeitos principais dos parâmetros de controle sobre o consumo de combustível, dados referenciados na condição ideal representada pelo ensaio 31.....	50
Figura 4.12 – Gráfico das interações de segunda ordem sobre as medidas de consumo de combustível. Valores expressos em % da condição ideal referenciada no ensaio 31.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Medições de potência, torque e consumo de combustível realizadas em um motor de combustão interna padrão, de um único cilindro, na rotação de 1000 rpm. (Adaptado de Burnete, Moldovanu e Baldean, 2013).....	5
Tabela 1.2 - Apresenta três óleos com a mesma viscosidade cinemática a 100 °C e indicando que óleos com alto Índice de Viscosidade apresentam menores valores de viscosidade cinemática a temperaturas mais baixas (adaptado de Taylor, Morgan e Mainwaring, 2014).....	6
Tabela 2.1 – Distribuição dos níveis dos fatores para um experimento fatorial 2 ³ (Fonte: Donni, 2011).....	14
Tabela 3.1 - Matriz experimental escolhida, com destaque para a condição ideal de teste representada no ensaio 31.....	34
Tabela 3.2 - Resumo das condições utilizadas para determinar os níveis superior e inferior de cada um dos fatores escolhidos.....	35
Tabela 4.1 - Resultados medidos de potência e consumo de combustível em 32 ensaios independentes, com valores referenciados no ensaio 31.....	36
Tabela 4.2 - Resultado da análise ANOVA para o fatorial completo 2 ⁵ , avaliando a variável de interesse potência na TDP, com nível de significância de 5%.....	38
Tabela 4.3 - Resultado da análise de efeitos principais e de segunda ordem da variável potência na TDP considerando um nível de significância de 5%. Valores referenciados na condição ideal, representada pelo ensaio 31.....	39
Tabela 4.4 – Resultado da análise ANOVA para o fatorial completo 2 ⁵ , avaliando a variável de interesse consumo de combustível, com nível de significância de 5%.....	45
Tabela 4.5 – Resultado da análise de efeitos principais e de segunda ordem da variável consumo de combustível considerando um nível de significância de 5%. Valores referenciados na condição ideal, representada no ensaio 31.....	46

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANOVA	Análise de Variância
<i>DoE</i>	<i>Design of Experiments</i>
<i>EGR</i>	Sistema de recirculação de gases de combustão em motores.
<i>FLRS</i>	<i>Full load at Rated Speed</i> , condição na qual, sob aceleração máxima, é aplicada carga ao trator diminuindo sua rotação até a nominal.
<i>Limit Load</i>	Exaustor centrífugo
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil
<i>Outlier</i>	Ponto fora da curva segundo o ponto de vista estatístico
TDP	Tomada de Potência do Trator
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

IV	Índice de Viscosidade
\dot{m}	Taxa de consumo real de combustível
m_a	Massa de combustível alimentada
m_r	Massa de combustível retornada
t	Tempo
ε	Componente do erro de ajuste
γ_k	Efeito j-ésimo nível do parâmetro C
τ_i	Efeito do i-ésimo nível do parâmetro A
β_j	Efeito do j-ésimo nível do parâmetro B
μ	Efeito médio geral

1 Introdução

O agronegócio representou em 2012 uma fatia de 22,15% do Produto Interno Bruto Brasileiro, sendo responsável por 37% dos empregos formais e por 39% das exportações. De acordo com Garib et al., 2015, desde o final da década de 90 poucos países no mundo cresceram tanto dentro do cenário internacional do agronegócio quanto o Brasil.

No mercado interno, os destaques ficam relacionados às culturas de soja, milho, arroz, feijão, algodão e cana-de-açúcar. No mercado externo, o país lidera a produção e exportação de café, açúcar, etanol e suco de laranja, além de também ser o primeiro colocado em exportações do complexo soja, que compreende desde o grão, até farelo e óleo.

Segundo estimativas de Garib et al., 2015, em 2010, um em cada quatro produtos de agronegócio circulando pelo mundo era brasileiro e a projeção é que até 2030 esse número aumente para a proporção de um terço do total de produtos comercializados.

De acordo com a consultoria EcoAgro, 2015, nos últimos 20 anos foi registrado um forte aumento da produtividade agrícola, neste período, a área plantada de grãos cresceu 37%, porém a produção aumentou 176%. Tamanho aumento de eficiência no campo deve-se a diversos fatores, com destaque para o desenvolvimento de novas técnicas de plantio, sementes de maior qualidade, renovação e aumento da frota mecanizada e agricultura de precisão.

Para que vultosos números como estes fossem possíveis fez-se necessária a profissionalização do agricultor. Atualmente os grandes produtores rurais têm suas fazendas com estruturas organizacionais similares a indústrias, contando com divisão interna em setores, como financeiro, recursos humanos, almoxarifado, manutenção, entre outros.

Esta nova estrutura trouxe, também, um maior controle sobre os gastos relacionados a insumos, manutenção de equipamentos e estoque, gerando novos desafios a indústria de máquinas agrícolas como um todo, a qual foi demandada a produzir equipamentos que tenham maior velocidade de operação, com menor consumo de combustível e menor tempo de manutenção. Sendo este aumento da produtividade com diminuição dos gastos o foco do agronegócio atual.

Neste sentido, os produtores e a indústria apostam no aumento da tecnologia embarcada e nas manutenções periódicas dos equipamentos, as quais devem ser realizadas dentro de quantidades de horas de trabalho pré-determinadas, garantindo o desempenho,

evitando falhas prematuras de componentes e também mantendo a garantia de fábrica oferecida.

A partir deste contexto surgiram os chamados frotistas, empresas que tem em sua frota de máquinas agrícolas predominância de um fabricante sobre os outros. Dessa forma, torna-se possível a otimização dos custos relacionados a estoque de peças de reposição, e também permite uma atuação personalizada do concessionário da região em seus equipamentos, agilizando as eventuais intervenções corretivas e diminuindo os tempos de parada de máquina.

Como forma de determinar os benefícios gerados pela correta manutenção, esse estudo tem como objetivo quantificar os efeitos no consumo de combustível, e na potência útil em tratores agrícolas, quando utilizados sob adequadas condições de manutenção periódica.

1.1 Revisão Bibliográfica

Para este trabalho realizou-se uma pesquisa, focada na influência dos parâmetros relacionados ao consumo de combustível e à potência dos motores de tratores, por se tratar uma área tecnológica, com informações sobre os produtos consideradas como estratégicas para seus desenvolvedores, a literatura é restrita e confidencial.

As pesquisas no assunto são realizadas ou patrocinadas por companhias privadas em sua maioria, e os resultados são empregados na melhoria de seus produtos. Assim sendo, sua publicação poderia prejudicar seus interesses frente aos concorrentes.

Os parâmetros identificados como relevantes para o desempenho dos motores dizem respeito às seguintes condições: a) condição externa do radiador, b) filtro de combustível, c) filtro de ar, d) qualidade do combustível e e) óleo de motor. Desses, apenas as referências aos itens c) e e) foram encontrados na literatura, e são apresentados a seguir.

1.1.1 Condição do Óleo do Motor

Segundo Lacey et al., 2003, é esperado que longos intervalos entre as trocas de óleo lubrificante de motores resultem em mensuráveis aumentos de consumo de combustível do veículo assim como um acréscimo no nível de emissões de CO². Esta condição é acentuada

quando se utilizam óleos lubrificantes de base mineral, sendo atenuada com a utilização de óleos com base sintética.

Este fenômeno é decorrente do desgaste natural causado pelo movimento relativo de componentes móveis do motor sob condições normais de temperatura e pressão, causando a oxidação e consequente degradação do óleo lubrificante.

Conforme mostrado na Figura 1.1, a oxidação pode causar uma série de potenciais efeitos sobre o sistema, como formação de depósitos, aumento da viscosidade do óleo, perda da eficiência de seus aditivos e aumento de sua acidez. Os resultados desta combinação de fatores variam entre aumento das emissões, desgaste prematuro dos componentes, aumento do consumo de combustível e corrosão dos rolamentos.

De acordo com Singh, 2011, a economia de combustível depende da qualidade do combustível e do lubrificante, sendo esse último fundamental na diminuição da fricção entre as superfícies dos componentes do motor. Por sua vez, a fricção é influenciada pela velocidade de rotação do motor, carga, topografia da superfície dos componentes, viscosidade do óleo, temperatura do óleo e o tipo de aditivo modificador de fricção utilizado.

Para determinar os fatores que mais influenciam a fricção do motor, Singh realizou um ensaio experimental utilizando a metodologia de *Design of Experiments*, fatorial completo, selecionando como parâmetros controlados a velocidade, carga e viscosidade do óleo, cada um deles sendo variados em dois níveis. A partir desta análise, o autor observa que velocidade do motor e a interação de segunda ordem entre velocidade e carga são os fatores que influenciam mais significativamente na perda por atrito no motor.

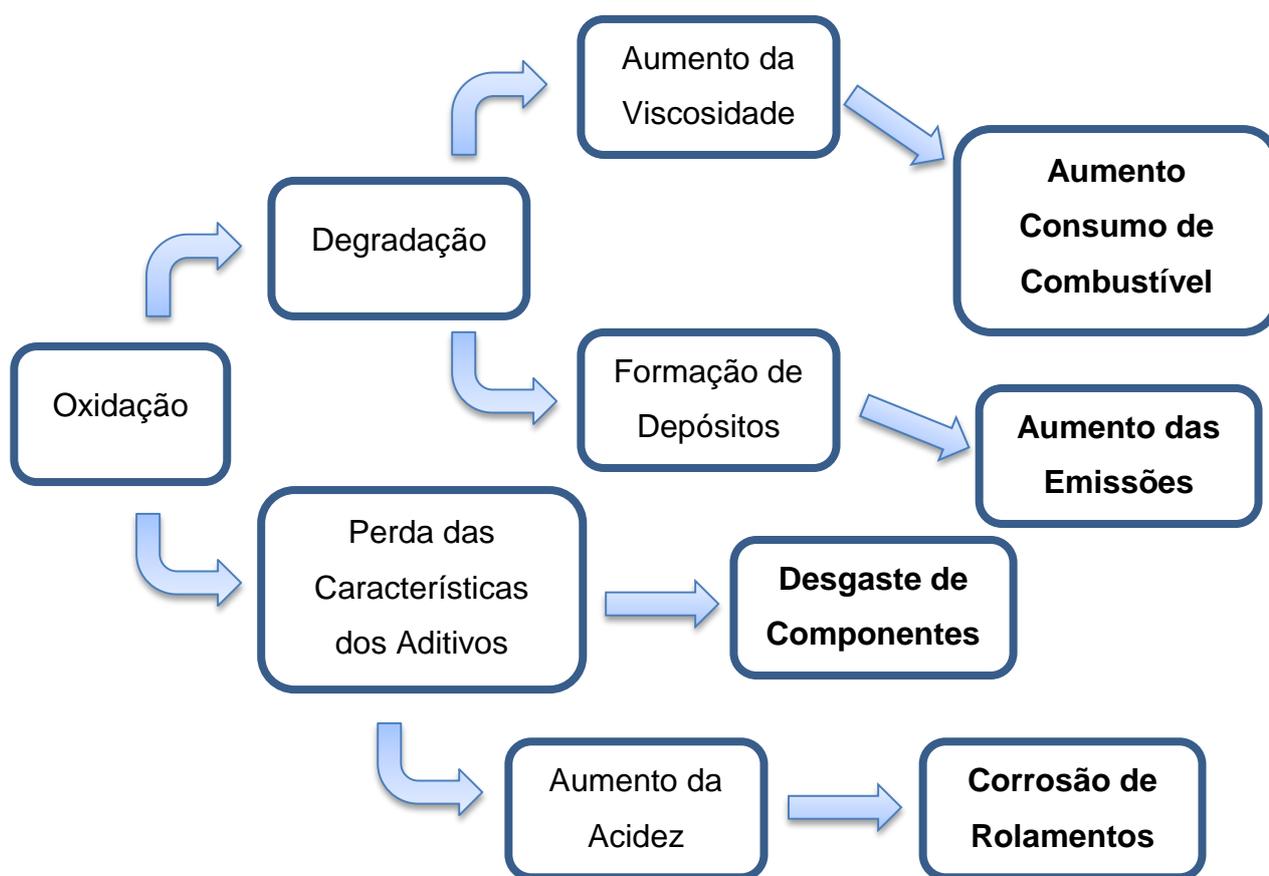


Figura 1 - Diagrama de potenciais efeitos relacionados a oxidação do óleo lubrificante degradado pelo excessivo número de horas sob utilização em condições normais. (Adaptado de Lacey et al., 2003)

Considerando que velocidade e carga são inerentes a utilização do motor em sua aplicação e, portanto, difíceis de serem alterados pelo consumidor, resta a seleção do óleo lubrificante mais adequado em termos de viscosidade para maior economia de combustível, menor perda por atrito e por consequência maior potência útil.

Taylor et al., 2014, realizaram ensaios experimentais em motores diesel e afirmam que a utilização de óleos com menor viscosidade apresenta menor consumo de combustível. Salientaram que esta propriedade é afetada por parâmetros como temperatura, taxa de cisalhamento, pressão, características elastohidrodinâmicas e aditivos superficiais adicionados ao óleo.

A informação de que baixa viscosidade diminui o consumo de combustível é corroborada por Burnete et al., 2013. A partir do ensaio de um motor de combustão interna padrão, com um único cilindro, estudaram a influência da temperatura do óleo lubrificante na potência, torque e consumo, cujos resultados são apresentados na Tabela 1.1.

Temperatura Óleo Lubrificante	Potência	Torque	Consumo de Combustível
(°C)	(kW)	(Nm)	(kg/h)
30	1,55	15,9	0,75
35	1,76	18,0	0,70
40	1,85	18,7	0,66
45	1,96	19,1	0,64
50	2,05	19,4	0,60
55	2,13	20,3	0,58
60	2,21	21,2	0,55
65	2,35	22,6	0,53

Tabela 1.1 - Medições de potência, torque e consumo de combustível realizadas em um motor de combustão interna padrão, de um único cilindro, na rotação de 1000 rpm. (Adaptado de Burnete et al., 2013).

Pode-se inferir a partir dessa Tabela que um aumento de 35 °C no óleo lubrificante causou um aumento de 51% na potência e uma queda de 29% no consumo.

Taylor et al., 2014, destaca, entretanto, que a sensibilidade da viscosidade a variações de temperatura varia entre os diferentes óleos a disposição no mercado. Esta sensibilidade é avaliada a partir do Índice de Viscosidade, que quanto maior seu valor, menor a variação da viscosidade, conforme mostra a Tabela 1.2.

		Índice de Viscosidade (IV)		
		Óleo 1 IV = 100	Óleo 2 IV = 125	Óleo 3 IV = 150
Viscosidade Cinemática (cSt)	40°C	108,0	90,4	77,7
	70°C	29,5	27,7	26,2
	100°C	12,0	12,0	12,0

Tabela 1.2 - Exemplo de três óleos com a mesma viscosidade cinemática a 100 °C e indicando que óleos com alto Índice de Viscosidade apresentam menores valores de viscosidade cinemática a temperaturas mais baixas (adaptado de Taylor et al., 2014).

1.1.2 Condição do Filtro de Ar

O suprimento de ar em quantidade e qualidade adequadas é um aspecto crítico nos motores diesel. De acordo com Jääskeläinen e Khair, 2011, este processo deve garantir que o ar atenda, em todas as condições operacionais, os seguintes requerimentos mínimos:

- Uma quantidade suficiente de oxigênio deve ser disponibilizada para garantir que a combustão seja completa.
- Caso o motor seja equipado com um sistema *EGR (Engine Gas Recirculation)* ele deve ser capaz de controlar a temperatura de combustão através da reinserção de adequada quantidade de gás de exaustão na admissão.
- A temperatura e pressão do ar admitido devem ser controlados.
- O sistema de filtragem deve garantir que o tamanho e a concentração das impurezas admitidas nas câmaras de combustão são aceitáveis.

Além dessas condições, as trocas de ar do motor devem garantir a renovação do conteúdo das câmaras de combustão com ar fresco e também dissipar o calor remanescente através da expulsão dos gases provenientes da queima.

Thomas et al., 2013, estudaram os efeitos da condição do filtro de ar em veículos com motores diesel, com enfoque na possível economia de combustível e efeitos na performance da máquina obtidas a partir da correta manutenção deste item. Segundo os autores, estudos anteriores realizados em motores a gasolina, carburados, indicaram que a troca de filtros de ar entupidos gera uma significativa redução no consumo de combustível. Porém essa afirmação era válida para veículos produzidos nos Estados Unidos na década de 70. Partindo deste

pressuposto, foram ensaiados três motores diesel, turbinados, de veículos de passageiros também produzidos nos Estados Unidos entre os anos de 2007 e 2009. Para determinação da condição de máximo entupimento do filtro de ar, os autores adicionaram toalhas de pano na tomada de ar, de forma a gerar uma perda de carga distribuída ao longo da área de admissão. Elas foram empilhadas até que o sinal de alerta de troca de filtro do painel acendesse, sendo essa a condição de teste desejada. Como resultado de seus ensaios, verificaram uma modesta perda de desempenho dos automóveis, verificada através do aumento do tempo necessário para acelerar os veículos de 20 a 80 milhas por hora. Por outro lado, constataram que o efeito na economia de combustível era muito pequeno, apresentando-se inferior a sensibilidade do equipamento de medição utilizado.

Mesmo resultado foi verificado através de simulação numérica de duas dimensões, e experimentalmente por Goud et al., 2014, que mostraram, em veículos produzidos na Índia, que a troca de filtros de ar comprometidos por excesso de poeira melhora o desempenho do motor e conseqüentemente o consumo específico (relação entre consumo de combustível e potência útil do motor, medido em g/kWh).

1.2 Objetivos

Nesta dissertação, objetivou-se analisar de forma quantitativa o impacto que a correta manutenção preventiva em tratores agrícolas tem sobre a potência útil disponibilizada na tomada de potência e também sobre o consumo de combustível.

Para isso, foi utilizada a metodologia estatística de Planejamento de Experimentos, ou *DoE – Design of Experiments*, em inglês, com um fatorial completo 2^5 sem replicação, realizando-se um total de 32 experimentos.

Como parâmetros de análise escolheram-se itens de rápida intervenção pelo operador da máquina, não sendo necessária participação de concessionários para realização. São eles:

- Condição externa do radiador
- Condição do filtro de combustível
- Condição do filtro de ar
- Óleo diesel
- Óleo do motor

2 Fundamentos de Projeto de Experimentos

A metodologia conhecida como projeto de experimentos (*Design of Experiments – DoE*) foi introduzida em 1935 por Sir Ronald Fisher, geneticista e estatístico inglês, nascido em Londres em 1890 e falecido em Adelaide, na Austrália, em 1962, deixando um legado incomensurável a ciência [Ribeiro e Caten, 2011].

Segundo Rosário, 2009, o trabalho desenvolvido por Fisher ao longo de sua carreira recebeu muitos elogios. Citações significativas proferidas por diversos autores, tais como: “Eu, ocasionalmente, encontro geneticistas que me perguntam se é verdade que o grande geneticista R. A. Fisher era também um importante estatístico.” [Savage, 1976]; “Um gênio que criou de maneira simples as bases para a moderna estatística.” [Hald, 1998].

Ainda segundo Rosário (*op. cit.*), Fisher fez publicações diversas nos campos da estatística e genética, realizou estudos e criou conceitos sobre pequenas amostras, delineamentos experimentais (blocos, fatorial), casualização, análise de variância, estudos relacionados às distribuições t, χ^2 , N, z e F, máxima verossimilhança, teste de significância, análise multivariada, regressões múltiplas, dentre outros.

O planejamento de experimentos é um método estatístico, que tem como objetivo a obtenção de resultados confiáveis com o menor número possível de ensaios. Para isso, ele propõe uma metodologia de planejamento, execução e análise de resultados que é considerado por Ribeiro e Caten, 2011, como superior a qualquer outro método e sequência não estruturados.

Na Figura 2.1, apresenta-se um esquema de funcionamento de um sistema, cujo objetivo é quantificar as relações de transformação da entrada em saída, recebendo durante este processo a influência de parâmetros controlados e fatores de ruído.

Parâmetros controlados, como o próprio nome identifica, são aqueles que tem sua variação controlada pelo operador e podem ser divididos em fatores constantes e fatores variáveis. Os fatores variáveis são os escolhidos pelo operador como objeto de estudo, e são aplicados dentro de determinadas faixas pré-determinadas, chamadas níveis. Os fatores constantes são mantidos sem variação durante o ensaio e não são objeto de estudo.

Fatores de ruído são àqueles fatores os quais não é possível ter controle, são intrínsecos ao sistema ou climáticos, como por exemplo a umidade relativa do dia do ensaio.

Estes fatores são responsáveis pelo erro experimental, juntamente as incertezas de medição dos instrumentos.

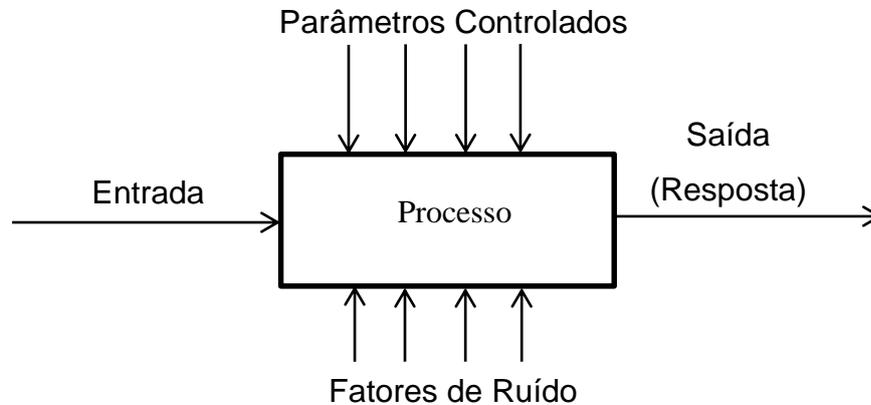


Figura 2.1 - Modelo geral de um processo ou sistema. (Adaptado de Montgomery, 2005)

De acordo com Montgomery, 2005, os objetivos de um experimento planejado realizado de acordo com o tema proposto podem incluir:

- Determinar quais parâmetros são mais influentes no resultado da variável de resposta,
- Determinar a magnitude dos níveis escolhidos para os parâmetros de forma a obter um valor de resposta mais próximo possível do desejado para o ensaio,
- Determinar a magnitude dos níveis escolhidos para os parâmetros de forma a obter uma pequena variabilidade na resposta,
- Determinar a magnitude dos níveis escolhidos para os parâmetros de forma a reduzir ao máximo a influência dos fatores de ruído,

Ribeiro e Caten, 2011, também indicam que o experimento deve ser delineado de forma a:

- Maximizar o desempenho do sistema,
- Minimizar os custos com ensaios,
- Tornar o sistema pouco sensível ao efeito dos fatores de ruído,

Para que isso seja possível, deve-se definir uma sequência de ensaios econômica e eficiente, assim como proceder uma embasada avaliação estatística dos resultados, de forma a assegurar o respaldo científico e maximizar as informações obtidas.

2.1 Terminologia Básica

Segundo Werkema, 1996, é importante que, antes de iniciar-se um experimento, toda equipe envolvida tenha pleno conhecimento da terminologia utilizada em um projeto de experimentos. Portanto, e também para um melhor entendimento do texto, os termos utilizados ao longo deste trabalho serão definidos a seguir.

2.1.1 Unidade Experimental

Trata-se da unidade básica na qual serão realizados os ensaios correspondentes ao projeto de experimentos e que fornecerá um conjunto de observações como variável de resposta.

2.1.2 Parâmetros

São os fatores variados de forma controlada durante o experimento com a finalidade de avaliar seus efeitos sobre as variáveis de resposta e assim determinar quais tem maior e menor influência sobre o processo estudado. Podem ser tanto qualitativos como quantitativos.

2.1.3 Fatores de Ruído

São todos e quaisquer fatores, conhecidos ou não, que influenciam nas variáveis de resposta avaliadas. Estes podem ser controlados ou não e deve-se ter cuidado redobrado durante os ensaios para garantir que eles não mascarem os efeitos dos fatores de controle. Caso seja possível, é interessante monitorá-los para posterior análise.

2.1.4 Níveis de um Parâmetro

Trata-se dos diferentes valores escolhidos para os parâmetros ao longo do experimento.

2.1.5 Resposta

A variável de resposta é o valor de saída de um experimento, a qual será utilizada para análise posterior dos efeitos dos parâmetros em seus diferentes níveis.

2.1.6 Efeito Principal

É a mudança da variável de resposta produzida a partir da mudança do nível do parâmetro no experimento.

2.1.7 Efeito de Interação

É a mudança na variável de resposta causada pela atuação conjunta de dois ou mais parâmetros, ocasionando uma influência diferente da gerada pela atuação independente dos efeitos principais de cada parâmetro.

2.1.8 Ensaios ou Tratamentos

Segundo Montgomery, 2005, as combinações específicas dos níveis de diferentes parâmetros são denominados tratamentos. No presente trabalho os tratamentos serão os ensaios realizados durante a experimentação.

2.1.9 Resíduo

O resíduo é a diferença entre uma observação e a média das observações em um determinado ponto. Tem importância na análise da validade dos resultados quando utilizado em ANOVA.

2.1.10 Análise de Variância ou ANOVA (*Analysis of Variance*)

Técnica estatística básica para avaliação de médias de diferentes populações fazendo uso da variância de seus resultados. Dessa forma é possível quantificar a influência dos parâmetros na variável de resposta de forma comparativa.

2.1.11 Matriz de Experimentos

Trata-se do plano formal de experimentação, nela constam os ensaios com os diferentes parâmetros e níveis escolhidos, conta também com a ordem de execução.

2.2 Fatorial 2^k

Segundo Montgomery, 2005, o fatorial 2^k é largamente utilizado em experimentos envolvendo parâmetros diversos onde é necessário estudar a influência, seja como efeito principal ou como efeito de interação, destes parâmetros em uma variável de resposta. Trata-se da única forma de detecção de interação entre parâmetros.

De acordo com Werkema, 1996, um planejamento fatorial completo é aquele no qual, para cada réplica completa do experimento, são executadas todas possíveis combinações entre níveis e parâmetros, por exemplo, caso existam n níveis para o fator hipotético A e m níveis para o fator também hipotético B , então cada réplica deste ensaio conterà todos AB ensaios possíveis.

No presente trabalho foi abordado com maior profundidade somente o fatorial 2^k com dois níveis, visto que esta foi a estratégia adotada para execução dos experimentos, porém é comum encontrar na literatura planejamentos de ensaios contando com três ou mais níveis. A teoria aplicada no fatorial 2^k é a mesma para todos casos.

Segundo Montgomery, 2006, devido à utilização neste método de somente dois níveis para cada parâmetro deve-se assumir que a resposta será aproximadamente linear entre os limites dos níveis. Este efeito pode ser melhor identificado através da inserção de pontos centrais entre os limites dos níveis. Como mencionado anteriormente, este trabalho conta somente com dois níveis, não sendo possível, portanto, identificação de não linearidades.

Segundo Donni, 2011, podemos tomar a Tabela 2.1 como um experimento fatorial com três parâmetros, dois níveis e suas respectivas respostas observadas. Trata-se de uma matriz de experimentos para um caso genérico 2^3 , ou seja, três parâmetros selecionados com variação em dois níveis.

A codificação + e – empregada denota a variação dos níveis superior e inferior respectivamente, de cada um dos parâmetros e o termo y_{ijkl} é a resposta do ijk -ésimo ensaio na l -ésima repetição, formando, assim, uma matriz experimental fatorial completa com oito ensaios sem replicação.

Considerando que os parâmetros tenham efeitos fixos ao longo dos ensaios pode-se utilizar a seguinte expressão para observação das respostas.

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad \text{com} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, c \\ l = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2.1)$$

onde:

μ : é o efeito médio geral.

τ_i : é o efeito do i -ésimo nível do parâmetro A.

β_j : é o efeito do j -ésimo nível do parâmetro B.

γ_k : é o efeito do k -ésimo nível do parâmetro C.

$(\tau\beta)_{ij}$: é o efeito da interação entre A e B.

$(\tau\gamma)_{ik}$: é o efeito da interação entre A e C.

$(\beta\gamma)_{jk}$: é o efeito da interação entre B e C.

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$: é o efeito da interação entre A, B e C.

ε_{ijkl} : é o componente do erro ou resíduo aleatório.

i, j e k : são o número de níveis de cada parâmetro.

Ensaio	Parâmetros			Resposta de Ensaio (Y_{ijk})
	A	B	C	
1	-	-	-	Y_{1111}
2	+	-	-	Y_{2111}
3	-	+	-	Y_{1211}
4	+	+	-	Y_{2211}
5	-	-	+	Y_{1121}
6	+	-	+	Y_{2121}
7	-	+	+	Y_{1221}
8	+	+	+	Y_{2221}

Tabela 2.1 – Distribuição dos níveis dos fatores para um experimento fatorial 2^3

(Fonte: Donni, 2011)

Segundo Werkema, 1996, antes que as conclusões obtidas através da análise de variância sejam utilizadas é necessária a realização de uma análise de resíduos dos dados experimentais.

O modelo de análise de variância assume que todos os experimentos tenham sido realizados de forma independente e que sua variância seja normalmente distribuída a cada ensaio com média zero. Para verificação da adequação destas prerrogativas faz-se necessária a análise de resíduos.

O resíduo é calculado através da seguinte expressão, a qual demonstra que o resíduo é a diferença entre uma observação e média das respostas do ensaio correspondente.

$$\varepsilon_{ijk} = x_{ijk} - \bar{x}_{ij} \quad (2.2)$$

Ainda segundo Werkema, 1996, a verificação da adequação do modelo de análise de variância deve ser feita através da análise de gráficos. Para este trabalho foram realizadas análises independentes para cada variável de resposta, dessa forma foram selecionados os seguintes gráficos:

- Histograma dos resíduos:
 - Através de sua análise é verificado se os resíduos têm distribuição normal com média aproximada a zero ao longo do ensaio.

- Distribuição de probabilidade normal dos resíduos:
 - Tem como objetivo verificar a adequação dos resíduos sob uma distribuição normal. Eles devem estar em sua maioria dispostos sob ou muito próximos à linha indicada.
- Gráfico de resíduos por ordem de observação:
 - Os resíduos devem ter distribuição aleatória quando confrontados com a ordem de execução dos ensaios, de forma a comprovar a independência entre as observações.

Segundo Montgomery, 2005, qualquer violação das suposições apresentadas anteriormente invalidará o modelo adotado, exigindo, portanto, modelos e metodologias alternativas para sua análise.

onde:

- A – Entrada de ar externo;
- B – Resfriador evaporativo direto;
- C – Dispersor de ar insuflado;
- D – Máquina agrícola em teste;
- E – Conjunto de eixos;
- F – Dinamômetro de corrente de Foucault;
- G – Coletor do exaustor de ar;
- H – Saída de ar e gases aquecidos para ambiente externo;
- I – Exaustor de gases de combustão;
- J – Sistema mássico de medição de consumo de combustível;
- L – Porta de entrada e saída de equipamentos;

O ar externo, a temperatura e umidade relativa ambientes, foi succionado a partir de “A” com o uso de um ventilador industrial tipo *limit load* de dupla aspiração, e insuflado através do dispersor de ar “C” para a região frontal da máquina agrícola, de forma a obter um volume uniforme e constante de vento na região de interesse. Caso a temperatura do ar externo estivesse muito elevada podia-se utilizar o resfriador evaporativo direto “B”, retirando calor e aumentando sua umidade relativa.

A máquina agrícola “D” foi então conectada ao dinamômetro “F” através do conjunto de eixos “E”. Este último é dividido em três eixos menores: o primeiro um eixo cardan com extensão telescópica para conexão a tomada de potência (TDP) do equipamento; o segundo um eixo rígido, mancalizado em ambas extremidades e amortecido por borrachas fornecidas pelo fabricante do dinamômetro, que tem como objetivo absorver vibrações provenientes de eventuais desalinhamentos entre a TDP e o eixo do dinamômetro; e o terceiro curto e rígido, o qual aplica a carga motriz ao dinamômetro e finaliza o conjunto.

O dinamômetro, por sua vez, trabalha com o conceito de cargas parasíticas, também chamado de corrente de Foucault. Foi comandado através de uma saída analógica conectado ao sistema supervisorio da sala e arrefecido através de um sistema independente de água fria proveniente de torre de refrigeração. Ambos os sistemas supracitados serão descritos em maiores detalhes na sequência deste trabalho.

O ar proveniente de “C”, já aquecido pelo calor gerado durante a operação em alta carga da máquina “D”, foi então sugado pelo coletor “G” e devolvido ao ambiente externo através da saída “H”. A exaustão foi realizada por um ventilador axial industrial, de menor potência que o insuflador, instalado na linha de descarga.

Os gases de combustão, provenientes da queima de combustível no motor do equipamento “D”, possuíam uma linha independente de exaustão, que contava com um ventilador do tipo siroco de pequeno porte, ligado diretamente ao escapamento do veículo através de um longo tubo metálico flexível, e foram despejados ao ambiente externo conforme mostrado em “I”, de forma a garantir que não houvesse resquícios de gases perigosos no local, impedindo que a saúde dos operadores fosse colocada em risco.

A medição de consumo de combustível foi realizada através do painel “J”, o qual utilizou reservatórios, células de carga e válvulas proporcionais, comandados por um módulo específico do software supervisor. Este sistema, sua lógica e características serão detalhados na sequência deste trabalho.

3.2 Descrição do Sistema de Medição de Consumo de Combustível

O sistema de medição de consumo de combustível contabilizou a taxa real de consumo de combustível utilizada pelo motor da máquina agrícola, utilizando em seu cálculo a diferença mássica de combustível enviado para o motor, subtraindo a massa retornada pela bomba injetora e bicos injetores em um determinado tempo.

Para isso, utilizou-se uma lógica de monitoramento, através de um sistema supervisor, da massa dos reservatórios ao longo do tempo, fornecendo assim resultados na unidade de gramas por segundo. Importante ressaltar que o consumo informado é obtido através de bateladas, ou seja, com uma massa de combustível previamente estabelecida, como será explicado a seguir.

A taxa de consumo real \dot{m} em g/s, foi obtida aplicando-se a seguinte equação:

$$\dot{m} = \frac{(m_a - m_r)}{t} \quad (5.1)$$

onde:

m_a = massa de combustível alimentada;

m_r = a massa de combustível retornada;

t = tempo.

Na Figura 3.2, segue o desenho esquemático do sistema de medição de combustível utilizado durante os ensaios:

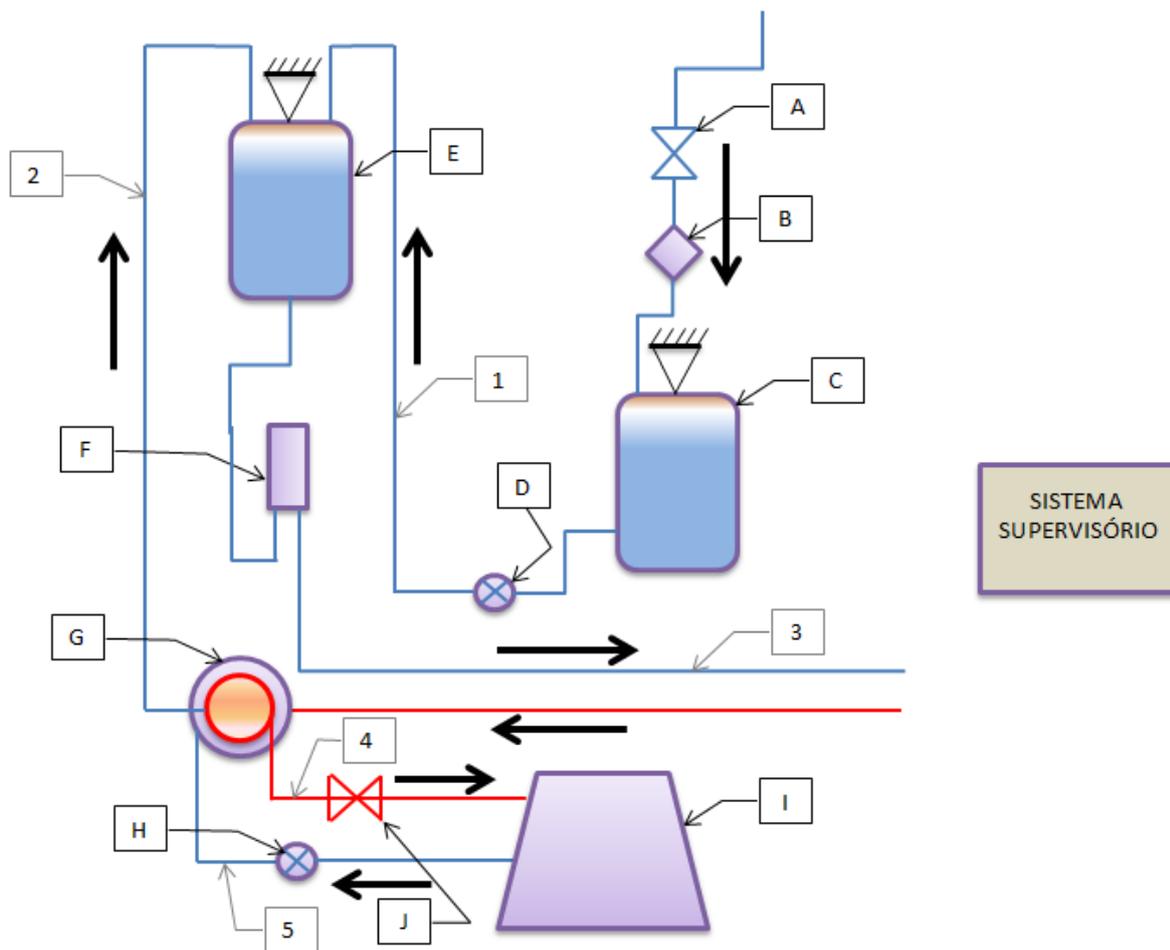


Figura 3.2 - Desenho esquemático do sistema de medição de consumo mássico de combustível.

onde:

- A – Válvula de esfera com atuador proporcional 24 V
- B – Filtro combustível
- C – Conjunto pré-tanque de combustível suspenso por célula de carga
- D – Bomba de recalque de combustível
- E – Conjunto tanque principal de combustível suspenso por célula de carga
- F – Atenuador de pulsação
- G – Trocador de calor combustível / água
- H – Bomba de recirculação de água da torre de resfriamento
- I – Torre de resfriamento de água.
- J – Válvula de esfera com atuador proporcional 24 V

Caracterizam-se as diversas linhas de vazão, também mostradas da Figura 3.2, com a seguinte nomenclatura:

- Linha 1 – Combustível proveniente de tanque externo ao laboratório
- Linha 2 – Combustível de retorno do motor
- Linha 3 – Combustível de alimentação
- Linha 4 – Corrente de água aquecida do trocador de calor
- Linha 5 – Corrente de água arrefecida do trocador de calor

Antes de iniciar o ensaio, conectam-se as linhas 2 e 3 ao motor da máquina agrícola, respectivamente no retorno e na entrada do pré-filtro de combustível, fazendo com que o sistema de medição tomasse o lugar do tanque original do veículo.

A lógica de funcionamento baseou-se na medida contínua, pelo sistema supervisor, da massa dos reservatórios “C” e “E” ao longo do tempo. Cada um destes tanques foi montado suspenso dentro de um painel, ligados por cabos de aço à células de carga tipo GL, da marca Alfa Instrumentos.

Combustível foi admitido a partir de um tanque externo através da linha 1, tendo sua passagem permitida ou barrada pela válvula “A”, filtrado por “B” e despejado dentro do reservatório “C”. A válvula “A” foi comandada de forma autônoma pelo sistema supervisor.

Este baseia sua decisão na medida da massa do reservatório “C”, o qual foi mantido dentro de uma faixa determinada previamente.

O reservatório “C”, chamado de pré-tanque, serve como um amortecedor da vibração gerada pelo fluido proveniente do tanque externo, o qual estava sob uma pressão não controlada pelo sistema do laboratório e, portanto, poderia apresentar variações na sua velocidade de despejo.

Dando seguimento, o tanque “E” é o principal componente do sistema, e nele ocorreram as medidas de consumo utilizados para o ensaio, que recebeu as linhas 1 e 2, vindas respectivamente do pré-tanque e do retorno do motor. Desta junção resultou a linha 3, a qual estava conectada ao pré-filtro da máquina agrícola.

A lógica implementada no sistema supervisorio aciona ou não a bomba de recalque “D” a partir da massa de “E”, que varia dentro de uma faixa determinada previamente. Para o cálculo de consumo não foram contabilizadas os primeiros 100 gramas, visto que, logo após o desligamento de “D” ocorreu uma pequena instabilidade na medida, a qual foi descartada com este ajuste. Portanto todo cálculo deu-se através da medida do tempo necessário para que a massa de “E” variasse dentro da faixa determinada, subtraindo-se os 100 gramas iniciais, conforme equação 5.1.

Conforme esquema apresentado na Figura 3.3, o atenuador de pulsação “F”, localizado logo após “E”, atuou eliminando pulsações geradas pela bomba de transferência do motor. Essa condição foi verificada ao longo dos primeiros ensaios e solucionada através deste dispositivo, composto por um tubo, fechado em ambas as extremidades e com duas conexões hidráulicas em sua base, onde foi conectada a Linha 3. Durante a utilização, o mesmo encheu-se de combustível até pouco acima da metade de sua altura, mantendo a parte superior preenchida com ar ambiente, o qual atuou como um amortecedor das pulsações advindas do motor.

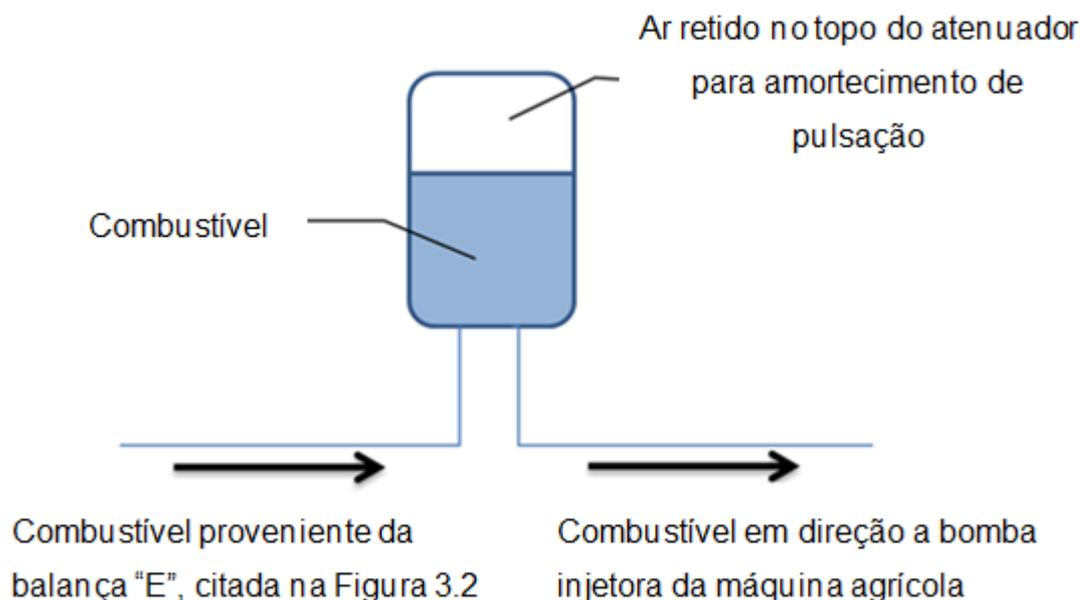


Figura 3.3 - Desenho esquemático do atenuador de pulsação utilizado durante os ensaios

O trocador de calor “G” tem como função arrefecer o combustível de retorno do motor. Para isso, a água da torre de refrigeração “I” entra em seu lado frio através da Linha 5 e retorna para “I” pela Linha 4, vazão esta garantida pela atuação da bomba independente “H” e controlada pela válvula de atuação proporcional “J”, que por sua vez é controlada pelo sistema supervisor a partir da temperatura do combustível na entrada do pré-filtro do motor.

3.3 Instrumentação

Para conduzir um experimento com sucesso, muitos fatores precisam ser avaliados ao longo do período de interesse. Por isso a instrumentação utilizada durante o ensaio foi selecionada de forma a mensurar a interação entre diversos outros fatores, tais como temperatura da água de arrefecimento do motor, temperatura do óleo do motor, entre outros.

A instrumentação foi composta basicamente por sensores de temperatura do tipo PT100, sensores de pressão diferencial e absoluta, sistema de medição de consumo mássico de combustível e um freio dinamométrico.

A distribuição utilizada foi a seguinte:

- Sensores tipo PT100

- 6 unidades distribuídas uniformemente na grade frontal do trator;
- 1 unidade no cárter do motor, mensurando a temperatura do óleo;
- 1 unidade na transmissão, mensurando a temperatura do óleo hidráulico;
- 1 unidade na entrada da bomba injetora de combustível;
- 2 unidades um metro e meio a frente do trator, realizando medidas de temperatura de bulbo úmido e seco do ar ambiente;
- 1 unidade na admissão de ar do motor;
- 2 unidades na camisa do motor, na entrada e saída do líquido de arrefecimento, respectivamente;
- 1 unidade no turbo compressor do motor, mensurando a temperatura do ar pós-turbo.

- Sensores de pressão

- 1 unidade mensurando restrição do filtro de ar;
- 1 unidade logo após o filtro final de combustível, mensurando a depressão gerada pela bomba injetora na linha;
- 1 unidade mensurando a pressão atmosférica da sala.

- Medição de consumo mássico de combustível:

- 1 unidade de sistema de medição de consumo mássico descrito anteriormente neste trabalho.

- Medição de potência / torque:

- 1 unidade de freio dinamométrico tipo corrente de Foucault, acoplado a tomada de potência traseira do trator.

A taxa de aquisição adotada para os ensaios foi de 2 Hz.

3.4 Máquina Agrícola Ensaída

Neste trabalho foi realizada a avaliação de um trator agrícola de rodas, conta com um motor 6 cilindros, de 6,8 litros, com sistema de combustível de injeção direta, com uma bomba injetora rotativa Delphi DP300, turboalimentado e com intercooler.

O trator tem uso diversificado dentro de culturas agrícolas diversas, destacando-se a cana-de-açúcar, onde é utilizado principalmente em operações de cultivo e transbordo de cana-de-açúcar, neste último caso atuando dentro de uma frente composta por outros equipamentos.

A operação de cultivo consiste na fertilização do solo após a colheita. Um implemento chamado cultivador abre um sulco no solo entre linhas de cana-de-açúcar e deposita, de forma constante, fertilizante ao longo do percurso. Logo após este sulco é fechado pelo próprio implemento. Esta operação deve ser realizada uma vez a cada colheita, ou seja, em torno de uma vez ao ano.

Na Figura 3.4 é apresentado um cultivador da marca Dria, o qual pode ser utilizado em conjunto com o trator.

A operação de transbordo é realizada em uma frente de colheita, a qual é composta por diversas máquinas, como colhedoras de cana-de-açúcar, tratores, carretas de transbordo e carretas convencionais (caminhões). O trator conduz uma ou duas carretas de transbordo ao lado da colhedora, a qual deposita, através de um sistema de esteiras, toda cana-de-açúcar colhida dentro da carreta de transbordo. Após o enchimento completo da carreta de transbordo, o trator desloca-se até uma carreta convencional e descarrega seu conteúdo, logo após volta para a lateral da colhedora e repete este ciclo. Na Figura 3.5 observa-se um conjunto de duas carretas transbordo acopladas a um trator.



Figura 3.4 - Cultivador de cana-de-açúcar para uso em 2 linhas com desarme automático marca Dria. (fonte: site da Dria)



Figura 3.5 - Trator acoplado a duas carretas de transbordo marca Antoniosi, cada uma com capacidade de 10,5 toneladas de carga, trabalhando ao lado de uma colhedora de cana-de-açúcar (fonte: site da Antoniosi)

3.5 Fatores e Níveis Analisados

A definição dos fatores e níveis analisados ao longo do trabalho baseou-se nas informações contidas no manual de instruções do operador, fornecido junto ao equipamento pelo fabricante para o proprietário, juntamente com a experiência prática do autor do presente trabalho com tratores agrícolas em aplicações junto aos produtores brasileiros.

No manual do operador constam todas as informações referentes a manutenções periódicas e intervenções especiais em caso de eventos específicos, como, por exemplo, superaquecimento do motor por acúmulo excessivo de palhada no radiador, ou entupimento prematuro do filtro de ar ou combustível, entre outros.

Os fatores escolhidos foram determinados de forma a atingir um balanço entre as manutenções frequentes e simples e as menos frequentes e caras, ambas por vezes ignoradas pelos proprietários por motivos diversos, que variam entre negligência com a condição do equipamento até uma suposta economia de dinheiro atingida com a não obediência dos períodos estabelecidos pela fábrica, mesmo que com isso fique exposto a uma possível perda da garantia do trator.

Dentro deste contexto, definiram-se cinco fatores principais: condição do filtro de ar, condição externa do radiador de líquido de arrefecimento do motor, condição do filtro de combustível, quantidade de horas de uso do óleo do motor e presença ou não de água no óleo diesel utilizado.

Os níveis foram definidos empiricamente, nomeados como condição ideal e condição extrema, conforme exposto a seguir.

3.5.1 Condição Externa do Radiador

Culturas agrícolas como soja possuem uma fina penugem sobre seus caules, que durante o processo de colheita a planta é sacudida e esta penugem é liberada para o ar, ficando suspensa por um curto período. Existem diversos relatos de tratores que, trabalhando logo atrás destas colheitadeiras, apresentaram um forte acúmulo deste material em seus radiadores, causando rapidamente um superaquecimento do motor.

Esta condição também é verificada em condições de plantio direto em campo nativo, modalidade agrícola onde a semente é plantada sem qualquer preparo prévio do solo. Para

esta ação são necessários dois tratores, um a frente com uma grade aradora e outro, logo atrás, com uma plantadeira, caso o terreno conte com espécies nativas que liberem algum tipo de penugem o segundo trator acaba também, como no caso da soja, apresentando restrição a passagem de ar no radiador, causando os mesmos efeitos observados anteriormente.

A orientação dada pelo fabricante aos proprietários, nestas ocasiões, é limpar tantas vezes quantas forem necessárias o radiador, evitando danos ao equipamento.

Neste nível a condição ideal foi definida como um radiador completamente limpo e livre de obstruções anormais, e sua condição extrema foi determinada de forma empírica, simulando uma total obstrução e conseqüente superaquecimento do motor.

Para determinação do nível extremo, uma restrição controlada foi montada sobre uma grade removível, encaixada na frente do radiador, conforme a seguir:

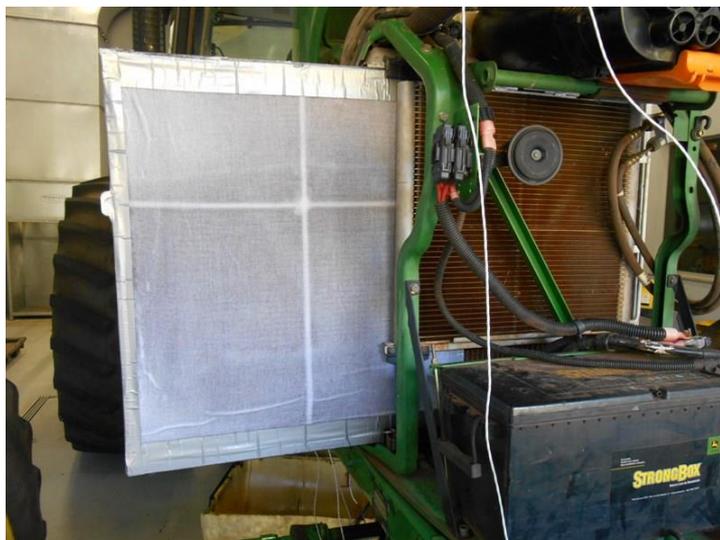


Figura 3.6 - Restrição artificial propositalmente deslocada lateralmente para mostrar sua forma de montagem e posição no trator. Durante operação a mesma foi deslocada para frente do radiador, cobrindo-o completamente

Esta restrição foi aumentada gradualmente até que a temperatura do motor atingisse o nível vermelho do painel de instrumentos, conforme ilustra a Figura 3.7.



Figura 3.7 - Indicador analógico de temperatura demonstrando entrada em região crítica de temperatura.

3.5.2 Filtro de Combustível

Filtros de combustível obstruídos estão entre uma das falhas de manutenção mais comuns verificadas no campo. Apesar da indicação da maioria dos fabricantes de troca a cada 250 horas do filtro final e 500 horas do pré-filtro, muitas vezes devido as más condições de estocagem do combustível e também de ineficientes sistemas de filtração nos reservatórios externos, este período mostra-se insuficiente.

A condição ideal para este nível foi considerada como sendo filtros limpos e, novamente, o nível extremo foi determinado de forma empírica, desta vez baseado em um conjunto de filtros com 300 horas de uso, vindo de um trator utilizado na cultura da soja.

Conforme ilustra a Figura 3.8, instalou-se uma válvula tipo gaveta, manual e de passo fino, na saída do filtro final, em paralelo com um sensor de pressão que também foi instalado com o intuito de mensurar a pressão pós-filtro, sendo este colocado juntamente ao cabeçote distribuidor do filtro.

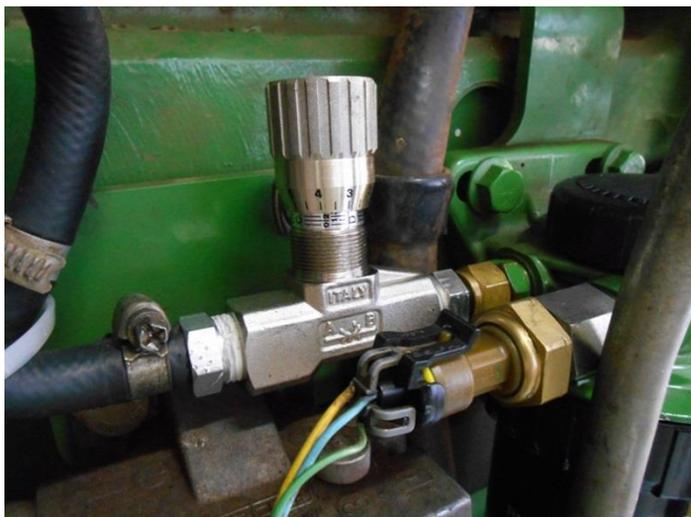


Figura 3.8 - Sensor de pressão e válvula gaveta instalados no cabeçote do filtro final de combustível, regulando e mensurando pressão da saída do combustível em direção ao motor.

Logo após, colocou-se o trator em funcionamento, em condição de *FLRS (Full Load at Rated Speed)* e, com a temperatura de diesel mantida constante, mensurou-se a queda de pressão na saída em duas situações, com filtros novos e com os filtros coletados do campo com 300 horas de uso.

O termo *Full load at rated speed* significa, em tradução livre, carga máxima em velocidade nominal, o que consiste em acelerar totalmente o motor até atingir a sua rotação máxima livre, e então aplicar gradativamente a carga na tomada de potência, baixando a rotação do motor até o seu valor nominal.

Estes valores, definidos como ideal e extremo, foram então aplicados artificialmente, através da válvula de gaveta, conforme necessário ao longo do teste.

3.5.3 Filtros de Ar

O filtro de ar é um componente essencial para garantir o bom funcionamento do motor, pois impede que partículas sólidas, tais como poeira, entrem na câmara de combustão e causem desgastes prematuros em peças móveis, como pistões e anéis. Em máquinas agrícolas esta situação é ainda mais complicada, visto que o ar em uma lavoura durante operação contém em torno de 500 vezes mais pó que o encontrado sobre uma estrada pavimentada [Márquez, 2011].

O sistema de filtragem adotado pelo fabricante é o de cartucho seco, trata-se de dois filtros de celulose montados em sequência (pré e final), que segundo o site do fabricante apresentam eficiência de filtragem de 99,95% (ensaiado sob a norma ISO 5011).

Um sistema de ciclone é montado na face externa plástica da admissão, como apresentado na Figura 3.9. Este sistema retira em torno de 15% das partículas maiores antes delas atingirem o filtro propriamente dito [Márquez, 2011]. Esta poeira é então aspirada pelo ventilador do trator e expelida para fora da máquina. Dessa forma, espera-se um aumento da vida útil dos filtros de ar, sendo que este aumento já é considerado nos períodos de troca propostos pelo fabricante da máquina agrícola.

Sua escolha como fator para este ensaio deve-se ao fato de tratar-se de um componente de fácil substituição, que pode ser realizado pelo próprio operador no campo, sem a necessidade de intervenção de uma concessionária ou mecânico especializado, e que pode afetar seriamente o desempenho e vida útil do equipamento.

Sua condição ideal foi definida como sendo a de filtros novos e sua condição extrema foi definida de forma empírica. Para reproduzi-la, uma restrição controlada foi aplicada na admissão de ar do motor até o ponto em que o indicador luminoso do painel de instrumentos acendeu. Este alarme serve para informar ao operador sobre a necessidade de troca/limpeza do filtro.

A forma de aplicação da restrição foi com uso de um tecido, aplicado uniformemente ao longo de toda superfície de admissão. Ambas as condições, ideal e extrema, podem ser vistas na Figura 3.9.



Figura 3.9 – Admissão de ar em condição ideal (livre de restrições e com filtros novos) a esquerda, e em condição extrema a direita.

Na condição extrema, o indicador luminoso do painel de instrumentos foi acionado, conforme ilustrado na Figura 3.10.



Figura 3.10 – Sinal luminoso do painel de instrumentos aceso, indicando que o limite de restrição indicado foi atingido.

Durante esta etapa do ensaio, o trator foi mantido em condição de *FLRS – Full Load at Rated Speed* e a temperatura do ar de admissão foi mantida constante.

3.5.4 Óleo diesel

São frequentes os relatos por parte dos produtores agrícolas da ocorrência de contaminação por água no óleo diesel armazenado nos tanques de suas fazendas. Este fenômeno ocorre principalmente devido à condensação da água contida no ar armazenado junto ao diesel, e em frequência menor, devido as más condições dos caminhões-tanque das distribuidoras.

O ciclo de temperatura normal do dia (calor mais acentuado durante o dia do que a noite) faz com que, durante a noite, a água contida no ar condense nas paredes e escorra para dentro do diesel. Esta água não se mistura completamente com o óleo diesel, ficando em sua maior parte acumulada no fundo do tanque como água livre. De acordo com comunicação interpessoal com profissional experiente da área ligado a empresa Ipiranga [Garcia, 2015], parte da água é dissolvida podendo atingir um valor de até 2% do volume total do óleo diesel.

Para mitigação deste problema é necessária a instalação de um sistema de filtragem por recirculação com filtros separadores de água e também à drenagem periódica do material contido no fundo do tanque.

Neste fator, novamente foram utilizados dois níveis para análise, o primeiro, considerado ideal, foi o diesel S500 B7 (7% de biodiesel adicionado ao diesel puro) comercial, fornecido pela bandeira Latina. Para o extremo água foi adicionada até seu ponto de saturação. A legislação brasileira, através da resolução ANP N°69, de 23/12/2014, permite até 500 ppm de água misturada ao óleo diesel.

3.5.5 Óleo do motor

Com capacidade de cárter de 22 litros e indicação de troca de filtro e óleo a cada 250 horas, é comum produtores agrícolas estenderem por conta própria o período de troca do óleo, especialmente em épocas de colheita e plantio, onde as janelas de trabalho proporcionadas por cada cultura são bastante curtas e evita-se ao máximo paradas nos equipamentos.

Dois níveis foram definidos para este fator. Como nível ideal, óleo de motor indicado pelo fabricante, e filtro de óleo novos foram utilizados, e como nível extremo foi coletado o óleo e filtro de óleo motor de um trator com 300 horas de uso em cultura de soja, (mesmo equipamento utilizado para aquisição de dados a respeito dos filtros de combustível em fim de vida).

3.6 Softwares Utilizados

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados três softwares, sendo dois comerciais e um livre. São eles:

- Microsoft Excel 2010 – empregado na aleatorização dos ensaios definidos na matriz experimental a seguir.
- Statsoft Statistica 12 – utilizado no cálculo das tabelas ANOVA e na criação dos gráficos de interação
- R versão 3.1.2 – empregado para confecção dos gráficos de análise de resíduos.

3.7 Matriz Experimental

A correta manutenção periódica de máquinas agrícolas demanda atenção e tempo consideráveis por parte de seu operador, sendo executada em “pacotes” propostos pelo fabricante, definidos a partir de quantidade de horas trabalhadas. Como consequência, o operador experimenta a dificuldade de identificar a importância individual dos itens trocados no desempenho e consumo da máquina, já que ele trocará diversas peças ao mesmo tempo, tendo um resultado combinado ao final.

A matriz experimental foi montada de forma a procurar o maior número possível de interações entre os fatores selecionados, utilizando um fatorial completo 2^5 , resultando em um total de 32 experimentos. Seguindo a prescrição do método DoE, os experimentos foram conduzidos de forma aleatória, com exceção do fator óleo do motor.

A aleatorização foi realizada através de função específica do software Microsoft Excel, sendo aplicada considerando somente os quatro primeiros fatores, ou seja, condição do radiador, condição do filtro de diesel, condição do filtro de ar e qualidade do diesel.

Optou-se por não tornar aleatória a troca do óleo do motor devido à natureza desta operação, visto que não é possível garantir que ele tenha sido completamente drenado das câmaras internas do motor a cada troca. Esse fato poderia ocasionar uma mistura entre óleo novo e usado a cada experimento, gerando ao final do fatorial completo um terceiro óleo, nem novo nem usado, fruto da combinação acidental entre os dois, o qual geraria resultados pouco confiáveis. A Tabela 3.1 apresenta a matriz de experimentos utilizada

A Tabela 3.1 apresenta a matriz de experimentos utilizada, enquanto a Tabela 3.2 apresenta o resumo das características dos fatores utilizados para o experimento.

Ordem Execução	Radiador	Filtro de Combustível	Filtro de Ar	Óleo Diesel	Óleo do Motor
1	Obstruído	Obstruído	Obstruído	Contaminado	Usado
2	Limpo	Obstruído	Obstruído	Comum	Usado
3	Limpo	Obstruído	Limpo	Comum	Usado
4	Obstruído	Limpo	Limpo	Comum	Usado
5	Limpo	Obstruído	Limpo	Contaminado	Usado
6	Limpo	Limpo	Limpo	Contaminado	Usado
7	Obstruído	Obstruído	Limpo	Contaminado	Usado
8	Obstruído	Limpo	Obstruído	Contaminado	Usado
9	Limpo	Limpo	Obstruído	Comum	Usado
10	Limpo	Limpo	Limpo	Comum	Usado
11	Obstruído	Obstruído	Limpo	Comum	Usado
12	Obstruído	Obstruído	Obstruído	Comum	Usado
13	Limpo	Limpo	Obstruído	Contaminado	Usado
14	Obstruído	Limpo	Obstruído	Comum	Usado
15	Obstruído	Limpo	Limpo	Contaminado	Usado
16	Limpo	Obstruído	Obstruído	Contaminado	Usado
17	Limpo	Limpo	Obstruído	Comum	Novo
18	Limpo	Obstruído	Obstruído	Comum	Novo
19	Obstruído	Limpo	Obstruído	Contaminado	Novo
20	Obstruído	Limpo	Limpo	Contaminado	Novo
21	Limpo	Obstruído	Limpo	Contaminado	Novo
22	Limpo	Limpo	Obstruído	Contaminado	Novo
23	Obstruído	Obstruído	Limpo	Contaminado	Novo
24	Limpo	Limpo	Limpo	Contaminado	Novo
25	Obstruído	Obstruído	Obstruído	Contaminado	Novo
26	Limpo	Obstruído	Limpo	Comum	Novo
27	Obstruído	Limpo	Obstruído	Comum	Novo
28	Obstruído	Obstruído	Limpo	Comum	Novo
29	Obstruído	Obstruído	Obstruído	Comum	Novo
30	Obstruído	Limpo	Limpo	Comum	Novo
31	Limpo	Limpo	Limpo	Comum	Novo
32	Limpo	Obstruído	Obstruído	Contaminado	Novo

Tabela 3.1 – Matriz experimental escolhida, com destaque para a condição ideal de teste representada no ensaio 31.

Condição Ideal

	Radiador	Filtro Diesel	Filtro Ar	Qualidade do Diesel	Óleo de Motor
Condição Ideal	Limpo e desobstruído	Limpo e desobstruído	Limpo e desobstruído	Limpo	Novo
Condição Extrema	Obstruído de forma a aquecer o líquido refrigerante até o ponteiro atingir a zona vermelha no painel indicador.	Restrição aplicada na linha de combustível para gerar diferença de pressão equivalente 300 horas de uso.	Restrição aplicada na admissão para gerar diferença de pressão suficiente para acender a luz de alerta no painel de instrumentos.	Contaminado com água até seu ponto de saturação.	Óleo e filtro de óleo com 300 horas de uso.

Tabela 3.2 - Resumo das condições utilizadas para determinar os níveis superior e inferior de cada um dos fatores escolhidos.

4 Resultados e Discussão

A partir da matriz experimental proposta, concebida no formato de fatorial completo, foram gerados 32 conjuntos de dados experimentais, organizados de forma a analisar respostas da máquina em consumo de combustível e potência medida na TDP do equipamento. Os resultados do ensaio 31, da Tabela 3.1, foram utilizados como referência para expressar o restante dos demais ensaios. Essa condição foi nomeada no presente trabalho como ideal, visto que tem todos seus fatores na melhor situação de ensaio. A Tabela 4.1 apresenta estes resultados.

A incerteza propagada foi calculada considerando os dados apresentados no Apêndice A, sendo de +/- 0,2% para a potência e de +/- 0,03% para o consumo de combustível. Estes valores são constantes para todos os 32 ensaios executados.

Ordem de Execução	Potência na TDP (%)	Consumo Combustível (%)
1	93,3	99,1
2	91,7	97,6
3	94,3	97,7
4	94,8	96,4
5	96,0	100,0
6	96,4	98,9
7	96,2	97,9
8	93,5	97,0
9	91,3	96,1
10	94,8	97,6
11	96,6	97,9
12	93,8	97,4
13	94,5	98,7
14	91,5	97,0
15	95,1	97,9
16	93,6	98,4
17	93,7	98,2
18	94,6	99,0
19	94,6	97,6
20	96,9	96,9
21	95,7	97,4

	22	93,7	97,5
	23	96,0	96,7
	24	96,5	97,6
	25	97,4	99,5
	26	98,9	98,6
	27	97,1	98,2
	28	99,7	99,1
	29	97,3	99,2
	30	100,1	99,4
Condição Ideal →	31	100,0	100,0
	32	93,1	98,1

Tabela 4.1 - Resultados medidos de potência e consumo de combustível em 32 ensaios independentes, com valores referenciados no ensaio 31.

4.1 Estudo da Influência dos Fatores na Potência Medida na TDP

A Tabela 4.2 apresenta os resultados analisados através de ANOVA sobre os dados medidos experimentalmente, com o objetivo de identificar os fatores mais significativos individualmente e também as interações de segunda ordem mais influentes sobre o sistema.

Um *p-value* inferior a 0,05 indica que, probabilisticamente, o fator em questão tem influência direta sobre o resultado medido, ou seja, sua variação causa um efeito no resultado. Esta avaliação aplica-se também para interações de segunda ordem, também apresentadas na mesma Tabela.

Parâmetros	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	Teste de F	<i>p-value</i>
Radiador	8,925	1	8,925	9,78	0,007
Filtro Combustível	0,633	1	0,633	0,69	0,417
Filtro Ar	74,725	1	74,725	81,86	0,000
Qualidade Diesel	2,365	1	2,365	2,59	0,127
Óleo de Motor	56,978	1	56,978	62,42	0,000
Radiador - Filtro Combustível	3,850	1	3,850	4,22	0,057
Radiador - Filtro Ar	3,713	1	3,713	4,07	0,061
Radiador - Qualidade Diesel	2,475	1	2,475	2,71	0,119
Radiador - Óleo de Motor	4,575	1	4,575	5,01	0,040
Filtro Combustível - Filtro Ar	1,488	1	1,488	1,63	0,220
Filtro Combustível - Qualidade Diesel	0,525	1	0,525	0,58	0,459
Filtro Combustível - Óleo de Motor	0,475	1	0,475	0,52	0,481
Filtro Ar - Qualidade Diesel	6,938	1	6,938	7,60	0,014
Filtro Ar - Óleo de Motor	0,090	1	0,090	0,10	0,757
Qualidade Diesel - Óleo de Motor	29,453	1	29,453	32,27	0,000
...
Erro	14,605	16	0,913	-	-
Total	211,815	31	-	-	-

Tabela 4.2 - Resultado da análise ANOVA para o fatorial completo 2^5 , avaliando a variável de interesse potência na TDP, com nível de significância de 5%.

A Tabela 4.3 apresenta os efeitos principais com valores referenciados no ensaio ideal número 31 (apresentado anteriormente), e considerando um intervalo de confiança de 95%. Nela foi possível verificar que os efeitos principais mais influentes são, respectivamente, filtro de ar, óleo de motor e radiador, enquanto que os outros dois principais, qualidade do diesel e filtro de combustível, mostraram pouca ou nenhuma influência sobre a potência medida, essas afirmações podem ser verificadas através da análise dos valores de efeito apresentados, quanto maior seu valor (em módulo), maior a influência, e vice-versa.

Quanto às interações de segunda ordem, aquelas que apresentaram maior relevância estatística foram, respectivamente, entre qualidade do diesel / óleo do motor e entre filtro de ar / qualidade do diesel. Todas as demais apresentaram valores estatisticamente irrelevantes.

Fator	Efeito (%)	Limites de Confiança	
		-95% (%)	95% (%)
Média	95,39	95,07	95,71
Radiador	-0,94	-1,58	-0,30
Filtro Combustível	-0,25	-0,89	0,39
Filtro Ar	2,72	2,08	3,36
Qualidade Diesel	0,48	-0,15	1,12
Óleo de Motor	2,37	1,74	3,01
Radiador - Filtro Combustível	0,62	-0,02	1,25
Radiador - Filtro Ar	0,61	-0,03	1,24
Radiador - Qualidade Diesel	-0,49	-1,13	0,14
Radiador - Óleo de Motor	-0,67	-1,31	-0,04
Filtro Combustível - Filtro Ar	0,38	-0,25	1,02
Filtro Combustível - Qualidade Diesel	-0,23	-0,87	0,41
Filtro Combustível - Óleo de Motor	0,22	-0,42	0,85
Filtro Ar - Qualidade Diesel	0,83	0,19	1,47
Filtro Ar - Óleo de Motor	0,09	-0,54	0,73
Qualidade Diesel - Óleo de Motor	1,71	1,07	2,34

Tabela 4.3 - Resultado da análise de efeitos principais e de segunda ordem da variável potência na TDP considerando um nível de significância de 5%. Valores referenciados na condição ideal, representada pelo ensaio 31.

A Figura 4.1 traz os efeitos principais dos parâmetros e suas interações de segunda ordem em uma representação em gráfico de Pareto, ordenados em grau de importância.

Com objetivo de certificar a validade estatística dos dados analisados, é necessário que alguns pressupostos sejam confirmados. Segundo Montgomery, 2005, a suposição inicial a ser satisfeita é a de que os erros experimentais devem apresentar uma distribuição normal uniforme centrada em zero quando visualizados através de um histograma. Como erros experimentais entendem-se as incertezas de medição e variáveis menos significativas fora de controle ou comportamento esperado, também chamados de resíduos.



Figura 4.1 - Gráfico de Pareto com efeitos principais e interações de segunda ordem da variável de interesse Potência na TDP, com nível de significância de 5%. Valores expressos em % da condição ideal, referenciada no ensaio 31.

Observa-se na Figura 4.2 que esta condição foi satisfeita, pois a distribuição dos resíduos experimentais gerados apresentou um formato próximo ao da normal. Tal fato também é verificado na Figura 4.3, onde os resíduos estão, em sua maioria, dispostos sobre a reta que representa a linha de normalidade, apresentando dois pontos fora da curva, também chamados de *outliers*, os quais necessitam ser estudados com maior profundidade em um trabalho futuro.

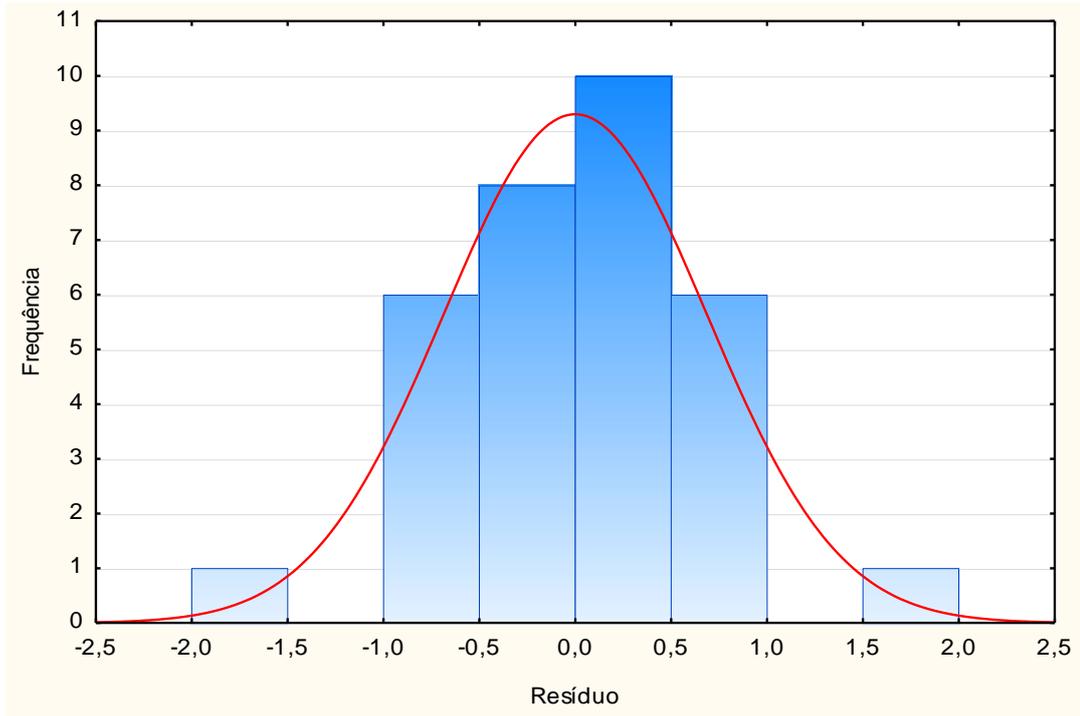


Figura 4.2 - Histograma dos resíduos relacionados ao ensaio de Potência na TDP.

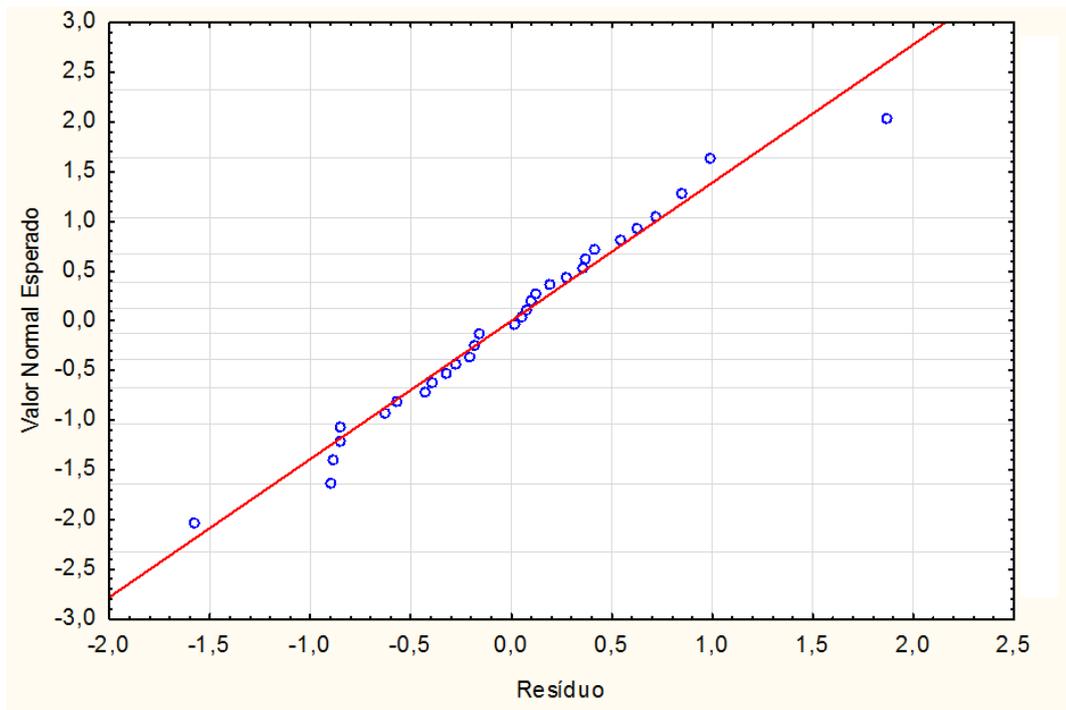


Figura 4.3 - Distribuição de probabilidade normal dos resíduos no ensaio de Potência na TDP.

Por fim, com base na Figura 4.4, é possível detectar uma relação entre os resíduos gerados e a ordem de execução dos ensaios. Este comportamento já era esperado devido ao fator óleo de motor não ter sido aleatorizado pelas razões citadas na seção 3.7. Esta condição foi representada através de uma angulação na linha de média de resíduos. Nesta mesma Figura é possível verificar também a presença dos dois *outliers* citados anteriormente.

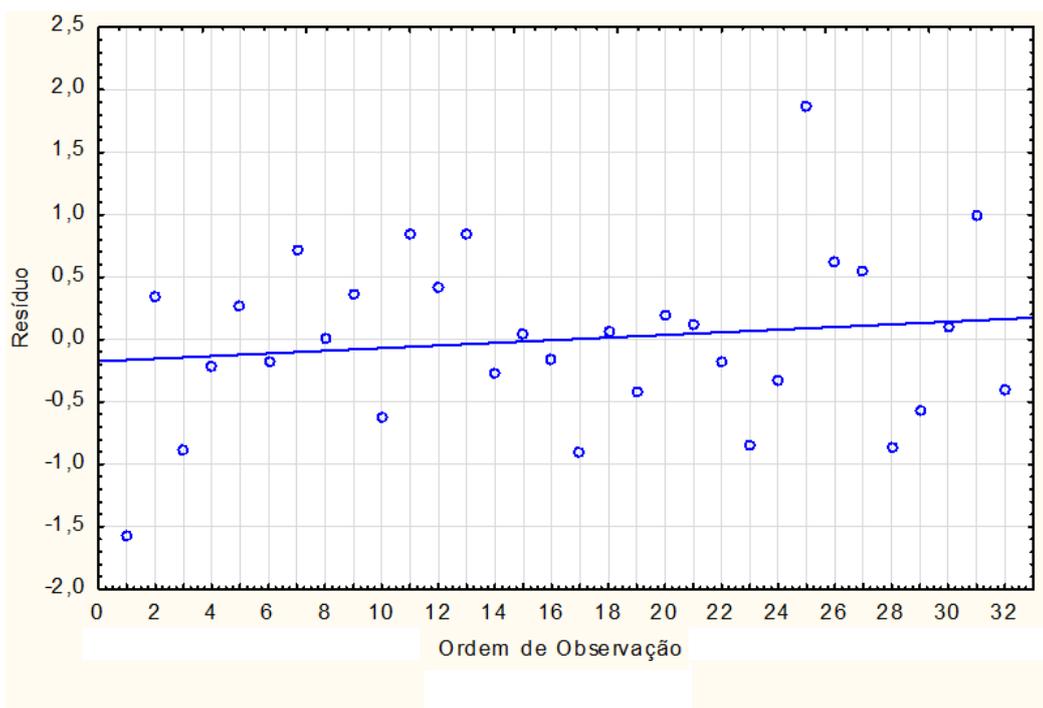


Figura 4.4 - Distribuição dos resíduos da medida de potência em função da ordem de execução dos ensaios

Os efeitos principais verificados sobre a Potência na TDP são apresentados na Figura 4.5. Foi possível identificar que todos os fatores têm alguma influência sobre os resultados, mas que dois entre eles tiveram papel de destaque nessa análise, a condição do filtro de ar, que apresentou uma variação de 2,7% no resultado final e o óleo do motor, com outros 2,4%, ambos referenciados na condição ideal. Outra constatação importante é que três fatores, dentre eles os dois mais significativos em termos de variação de potência, apresentaram comportamento dentro do esperado, ou seja, as condições ideais analisadas em cada parâmetro apresentaram potências maiores do que sua condição extrema (obstruída, contaminada ou com excesso de horas de uso), o que reforça a necessidade de manutenções periódicas nas máquinas agrícolas.

As exceções à regra ficam por conta do filtro de combustível, que apresentou uma leve piora quando em condição livre, no valor de 0,2%, valor este bastante pequeno que provavelmente foi gerado por incertezas de medição diversas; e ao radiador, que quando obstruído aumentou a potência na TDP em 0,9%, fato este que necessita ter seu estudo aprofundado em trabalhos futuros. Ambos valores também estão referenciados na condição ideal, representada no ensaio 31.

Vale ressaltar que a condição extrema escolhida para o filtro de combustível neste trabalho reproduz a situação equivalente à quantidade de horas máxima indicada pelo fabricante. O fato dele não estar afetando a potência mostra que o filtro apresentou boa margem de projeto em relação a sua vida útil.

Condições de combustível com muito baixa qualidade podem levar ao entupimento prematuro e obstrução completa da passagem de combustível, o que afetaria muito a potência fornecida pela máquina.

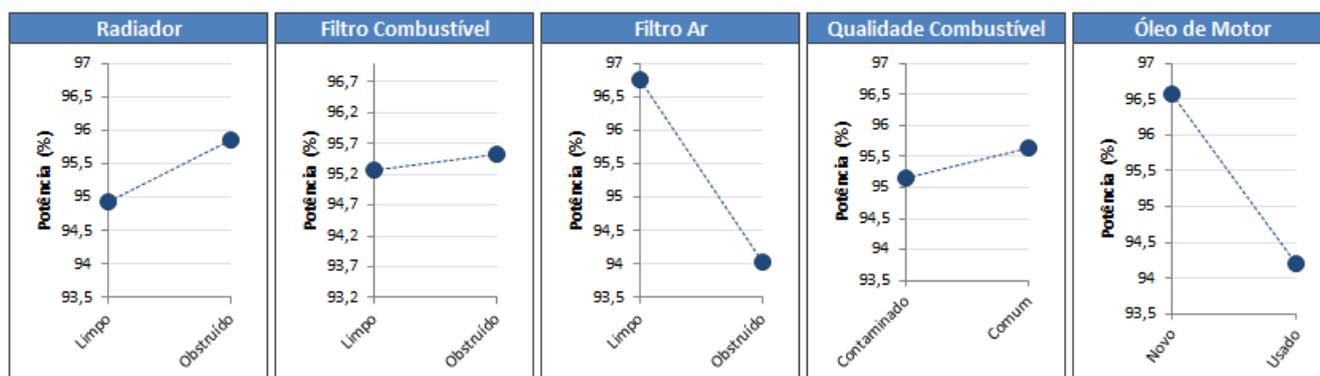


Figura 4.5 – Efeitos principais dos parâmetros de controle sobre Potência na TDP, dados referenciados na condição ideal, representada pelo ensaio 31.

A Figura 4.6 apresenta todas as interações de 2ª ordem, e verifica-se que praticamente todos os fatores tem interação entre si. Inclusive, conforme mostrado no Gráfico de Pareto da Figura 4.1, a interação entre qualidade do diesel e óleo do motor mostrou-se bastante significativa e, devido ao seu alto grau de significância no contexto, não é possível ignorá-la com o argumento da incerteza de medição. Este aprofundamento fica como sugestão para trabalhos futuros.

Os mesmos comentários podem ser estendidos para a próxima interação, também significativa, porém em menor proporção que a anterior. Trata-se da qualidade do diesel e do filtro de ar.

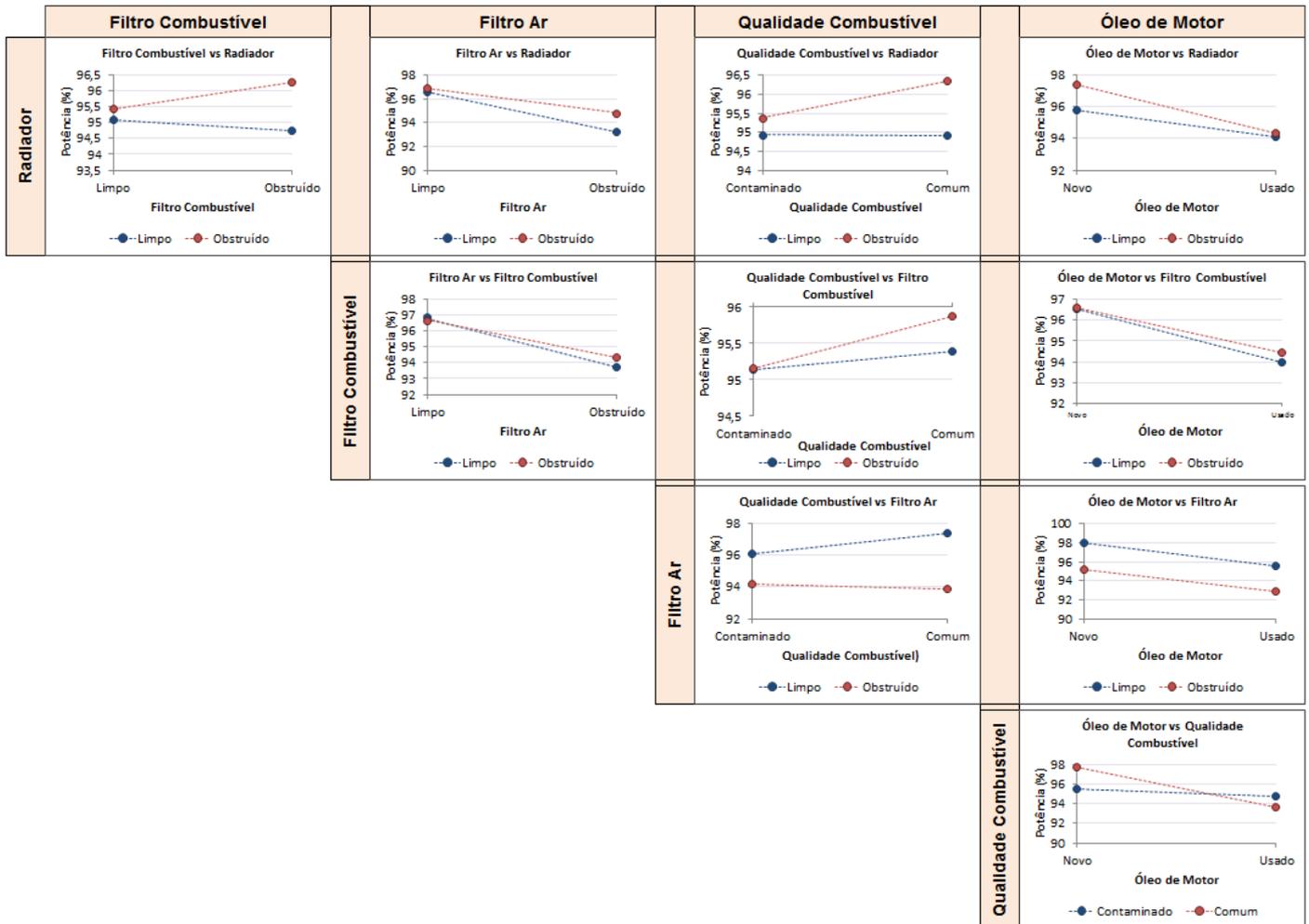


Figura 4.6 – Interações de segunda ordem dos parâmetros de controle sobre Potência na TDP, dados referenciados na condição ideal representada pelo ensaio 31.

4.2 Estudo da Influência dos Fatores no Consumo de Combustível

Uma análise similar a da potência foi executada para o consumo de combustível. É importante ressaltar que tanto a potência quanto o consumo de combustível foram avaliados durante o mesmo fatorial completo de 32 experimentos, ou seja, não houveram pacotes de ensaios independentes.

A Tabela 4.4 mostra a análise ANOVA dos resultados obtidos na medida de consumo de combustível. De forma similar ao elaborado anteriormente, devem-se observar os valores *p-value* inferiores à 0,05, que indicam o efeito direto sobre o resultado.

Parâmetros	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média dos Quadrados	Teste de F	<i>p-value</i>
Radiador	1	0,004	0,004	1,59	0,226
Filtro Combustível	1	0,015	0,015	6,17	0,024
Filtro Ar	1	0,000	0,000	0,10	0,750
Qualidade Diesel	1	0,000	0,000	0,01	0,915
Óleo de Motor	1	0,012	0,012	4,82	0,043
Radiador - Filtro Combustível	1	0,004	0,004	1,59	0,226
Radiador - Filtro Ar	1	0,010	0,010	4,21	0,057
Radiador - Qualidade Diesel	1	0,003	0,003	1,09	0,312
Radiador - Óleo de Motor	1	0,005	0,005	1,97	0,180
Filtro Combustível - Filtro Ar	1	0,010	0,010	4,21	0,057
Filtro Combustível - Qualidade Diesel	1	0,000	0,000	0,16	0,697
Filtro Combustível - Óleo de Motor	1	0,003	0,003	1,41	0,252
Filtro Ar - Qualidade Diesel	1	0,009	0,009	3,64	0,075
Filtro Ar - Óleo de Motor	1	0,004	0,004	1,77	0,202
Qualidade Diesel - Óleo de Motor	1	0,085	0,085	35,27	0,000
...
Erro	16	0,039	0,002	-	-
Total	31	0,203	-	-	-

Tabela 4.4 – Resultado da análise ANOVA para o fatorial completo 2⁵, avaliando a variável de interesse consumo de combustível, com nível de significância de 5%.

A Tabela 4.5 apresenta as variações absolutas dos valores mensurados na forma de efeitos principais, ou seja, a efetiva diferença medida em relação a cada fator e interação de segunda ordem considerados.

Fator	Efeito (%)	Limites de Confiança	
		-95% (%)	95% (%)
Média	98,09	97,86	98,32
Radiador	0,27	-0,19	0,73
Filtro Combustível	-0,54	-1,00	-0,08
Filtro Ar	0,07	-0,39	0,53
Qualidade Diesel	0,02	-0,44	0,48
Óleo de Motor	0,48	0,02	0,94
Radiador - Filtro Combustível	0,27	-0,19	0,73
Radiador - Filtro Ar	0,45	-0,01	0,91
Radiador - Qualidade Diesel	-0,23	-0,69	0,23
Radiador - Óleo de Motor	-0,31	-0,77	0,16
Filtro Combustível - Filtro Ar	0,45	-0,01	0,91
Filtro Combustível - Qualidade Diesel	0,09	-0,37	0,55
Filtro Combustível - Óleo de Motor	0,26	-0,20	0,72
Filtro Ar - Qualidade Diesel	0,41	-0,05	0,88
Filtro Ar - Óleo de Motor	-0,29	-0,75	0,17
Qualidade Diesel - Óleo de Motor	1,29	0,83	1,75

Tabela 4.5 – Resultado da análise de efeitos principais e de segunda ordem da variável consumo de combustível considerando um nível de significância de 5%. Valores referenciados na condição ideal, representada no ensaio 31.

A partir de um grau de significância de 5% constata-se que os efeitos principais mais importantes foram a condição do filtro de combustível e a condição do óleo do motor, enquanto que os outros três fatores (radiador, filtro de ar e qualidade do combustível) mostraram pouca influência no contexto.

Mesmo liderando a lista, tanto o filtro de combustível quanto o óleo de motor apresentaram média de efeitos principais com variações inferiores a 0,6% na média e, portanto, podem ser atribuídas à incertezas de medição. Em vista disso, este trabalho não vai alongar-se na discussão das causas destes fenômenos, e sim na demonstração estatística da validade dos ensaios realizados.

Para as interações de segunda ordem, mostrou-se importante a relação entre qualidade do diesel e óleo do motor, a qual afetou em quase 2% o valor medido, impacto este maior que a soma do segundo e terceiro colocados do ordenamento.

Este ordenamento dos efeitos mais significativos pode ser verificado através do Gráfico de Pareto mostrado na Figura 4.7.

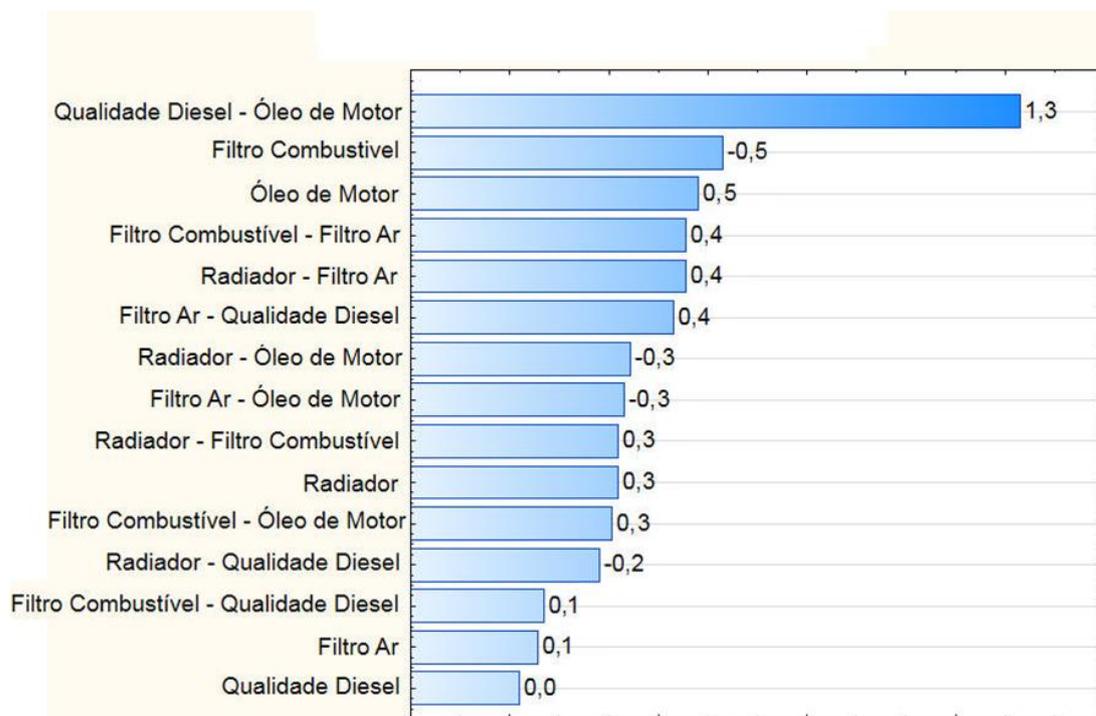


Figura 4.7 – Gráfico de Pareto com efeitos principais e interações de segunda ordem da variável de interesse consumo de combustível, com nível de significância de 5%. Valores expressos em % da condição ideal referenciada no ensaio 31.

Do mesmo modo que realizado anteriormente, é necessário confirmar o pressuposto estatístico para avaliar a qualidade das medições realizadas ao longo do ensaio. O primeiro trata da distribuição normal uniforme, centralizada em zero, dos resíduos em um histograma. Esta condição foi parcialmente satisfeita, como pode-se observar na Figura 4.8.

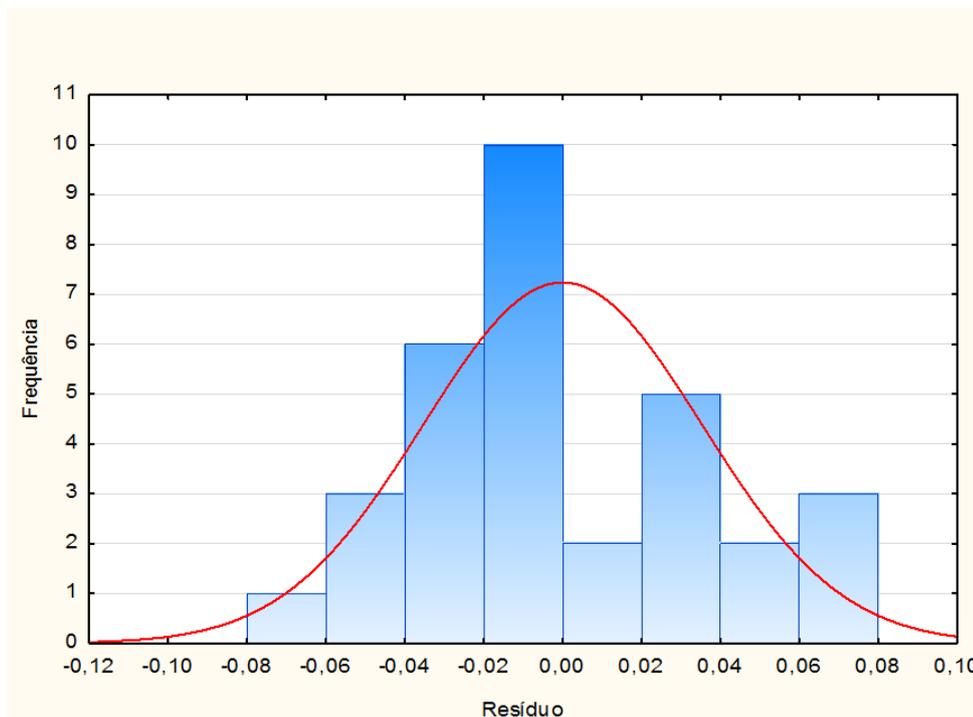


Figura 4.8 – Histograma dos resíduos relacionados à medida de consumo de combustível, onde fica evidenciada a distribuição não normal dos resíduos de parte dos ensaios.

A distribuição está em parte comprometida pelos resíduos com valor em torno de 0,01 e 0,03 que não obedeceram a distribuição normal. Isso provavelmente deve-se ao método de medição adotado, baseado, conforme apresentado na seção 3.2, em um sistema de balanças que medem a variação de massa de um reservatório em um determinado período de tempo. Com base nos resultados obtidos conclui-se que este sistema, com suas características atuais, não é o mais adequado para mensurar variações com resolução de centésimos de grama por segundo.

É importante ressaltar que isso não significa que as medidas realizadas estejam incorretas, e sim que o sistema não conta com resolução suficiente para detectar variações tão pequenas quanto as geradas pelos fatores utilizados. Também é importante citar que os fatores, em geral, foram pouco relevantes em relação à medida em questão.

Esta afirmação é corroborada também na análise da Figura 4.9, que mostra a linha normal de resíduos esperada. Mesmo que muitos resíduos estejam próximos à linha, poucos estão dispostos efetivamente sobre ela, indicando que esse sistema necessita de aprimoramentos.

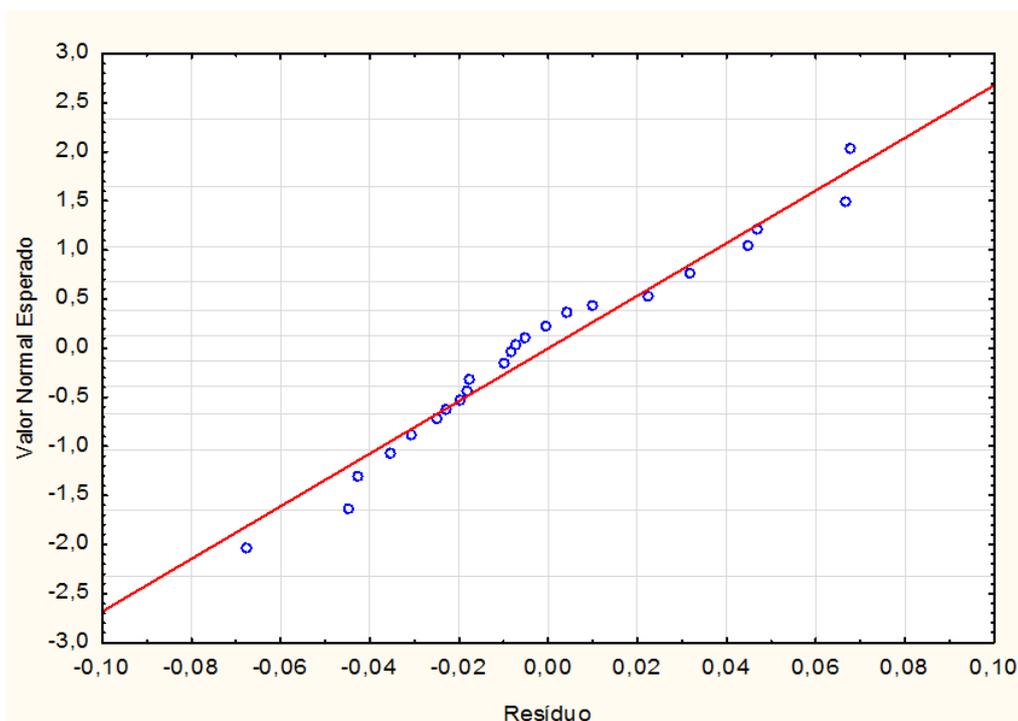


Figura 4.9 – Distribuição de probabilidade normal dos resíduos na medida de consumo de combustível.

Apesar das limitações do sistema de medição, obteve-se uma satisfatória relação de aleatoriedade na distribuição dos resíduos em função da ordem de execução, próxima a identificada na análise de potência, conforme pode ser verificado na Figura 4.10. Como constatado anteriormente, apresentou uma variação no valor central, provavelmente devido a não aleatorização do fator óleo de motor.

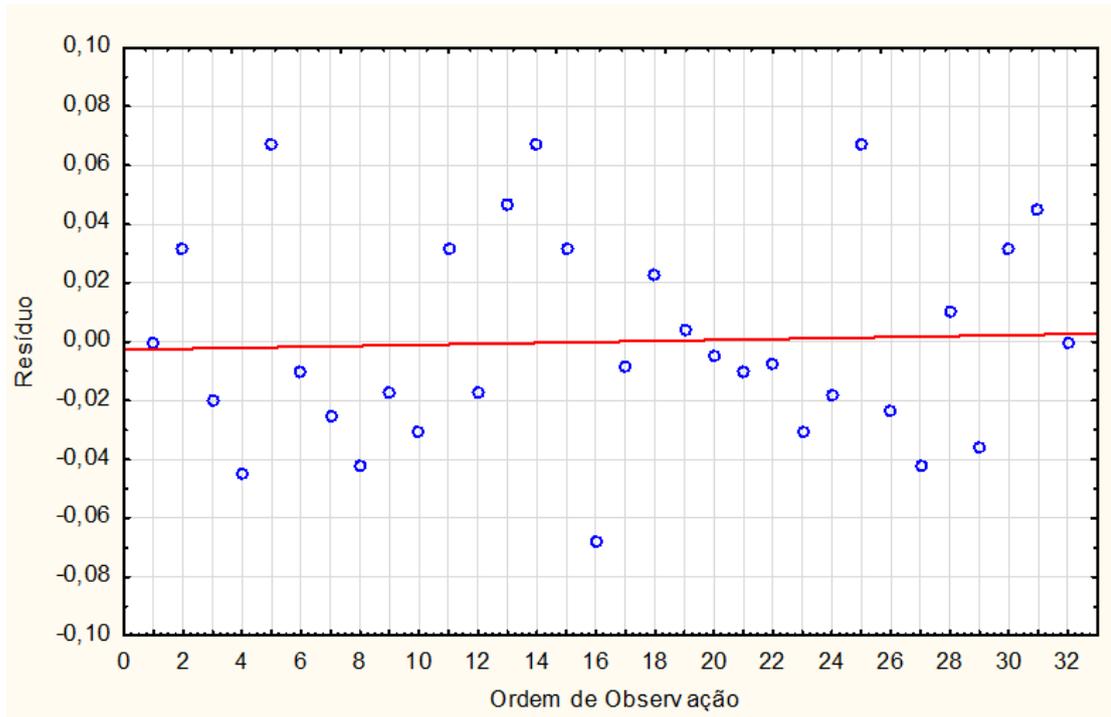


Figura 4.10 – Distribuição dos resíduos da medida de consumo de combustível em função da ordem de execução dos ensaios.

Na Figura 4.11, pode-se analisar a magnitude dos efeitos principais identificados, que foram o filtro de combustível e óleo do motor, conforme já descrito anteriormente. Os dois parâmetros apresentam valores pouco significativos em relação às médias encontradas.

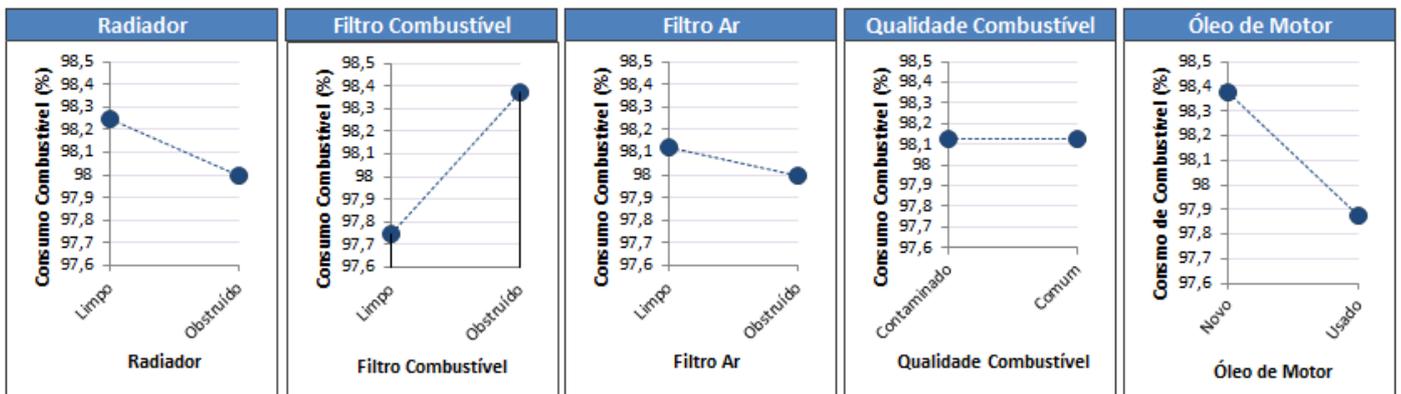


Figura 4.11 – Efeitos principais dos parâmetros de controle sobre o consumo de combustível, dados referenciados na condição ideal, representada pelo ensaio 31.

Já na Figura 4.12, que descreve os efeitos de interações de segunda ordem, está mostrado de forma quantitativa o fator destacado. Trata-se da relação entre a qualidade do diesel e o óleo do motor. Pode-se notar a partir do cruzamento entre as linhas que existe uma forte interação entre ambos, a qual necessita ser estudada em trabalhos futuros.

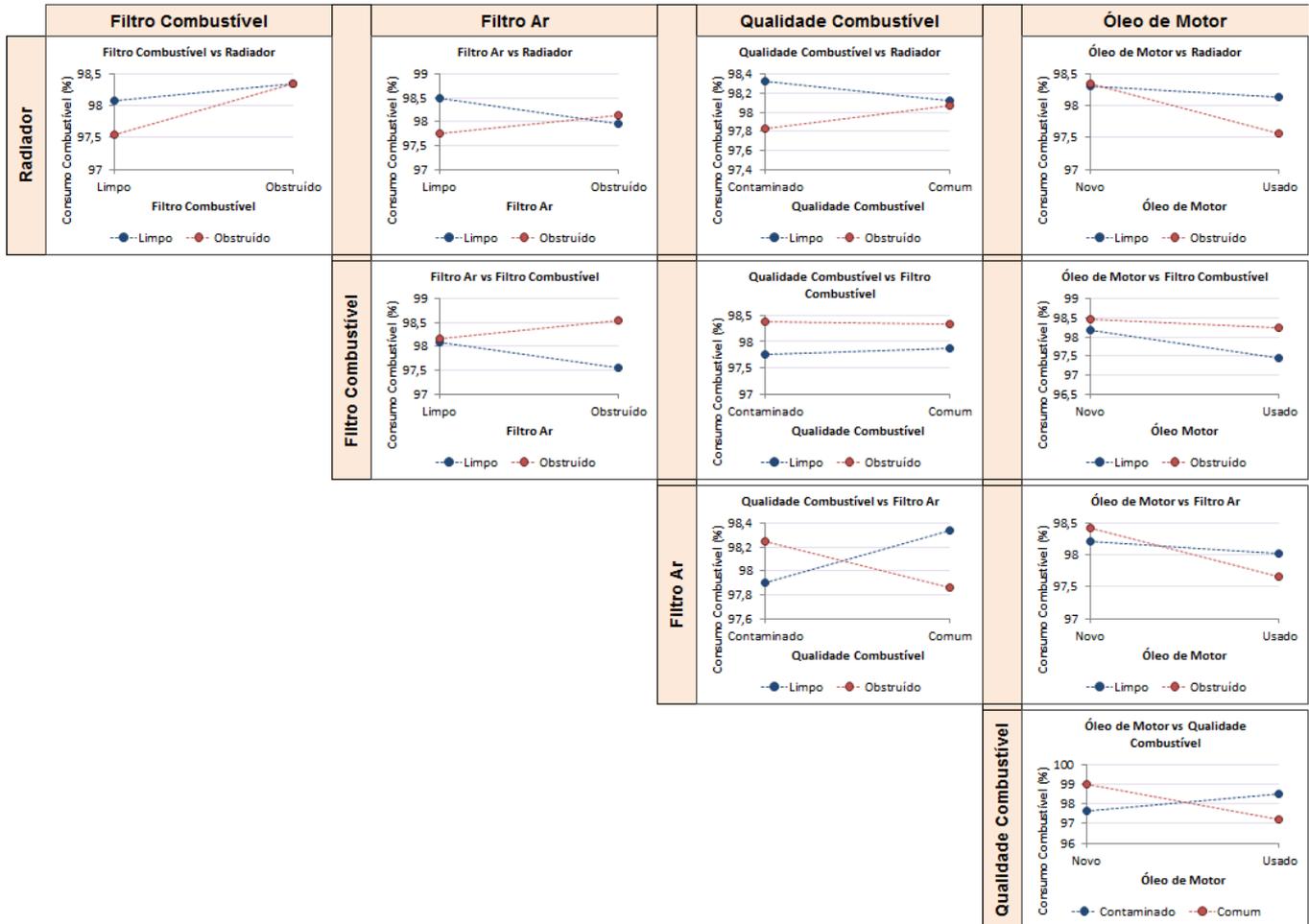


Figura 4.12 – Gráfico das interações de segunda ordem sobre as medidas de consumo de combustível.

Valores expressos em % da condição ideal referenciada no ensaio 31.

5 Conclusão e Sugestões de Futuros Trabalhos

Esta dissertação analisou a diferença mensurável dos efeitos de uma manutenção periódica adequada na potência medida na Tomada de Potência - TDP e também no consumo de combustível em um trator agrícola. Para isso fez-se uso da metodologia de Projeto de Experimentos, ou *DoE*, em inglês com fatorial completo 2^5 , em um total de 32 experimento sem replicação.

Os parâmetros controlados foram definidos com base na experiência do autor, e são eles: condição externa do radiador, filtro de combustível, filtro de ar, óleo diesel e óleo do motor. Seus níveis para experimentação foram definidos com base experimental.

A apresentação e análise dos dados foram divididas em duas seções distintas, uma baseada na verificação da potência útil na TDP e outra no consumo de combustível. Ambas são fundamentais para o trabalho do operador e responsável pela máquina durante sua atividade em campo.

Analisando os efeitos na potência útil na TDP, foi constatado que dentre os parâmetros controlados escolhidos, os que apresentaram maior importância no resultado foram: condição do filtro de ar, horas de uso do óleo do motor e uma interação de segunda ordem entre a qualidade do óleo diesel utilizado e a condição do óleo do motor.

A condição do filtro de ar sozinha, através da restrição de volume de ar inserido no motor, foi capaz de variar a potência em aproximadamente 2,7%, enquanto que o óleo do motor foi responsável por outros 2,4%. A surpresa ficou por conta da interação entre qualidade do óleo diesel e óleo do motor, a qual se mostrou em terceiro lugar em ordem de importância, contabilizando um efeito de 1,7% no resultado final. Os valores apresentados acima foram referenciados na condição ideal, representado pelo resultado do ensaio 31.

A importância da interação entre a qualidade do óleo diesel e do óleo do motor mostrou-se significativa e, devido ao seu alto grau de significância no contexto, não é possível ignorá-la com argumento da incerteza de medição. Este aprofundamento fica como sugestão para trabalhos futuros.

A análise de resíduos realizada nesta seção mostrou resultados confiáveis, condizentes com o proposto por Montgomery, 2005, para validação do experimento. A exceção ficou por conta de dois pontos fora da curva, ou *outliers*, valores atípicos dentro do contexto deste experimento, os quais necessitam ter seu entendimento aprofundado em trabalhos futuros.

A análise da seção de consumo de combustível mostrou uma variação muito pequena nos valores medidos, com um único destaque para a interação de segunda ordem entre a qualidade do óleo diesel utilizado e o óleo do motor, que mesmo assim gerou uma diferença muito baixa em relação à média do experimento.

Conforme citado anteriormente, os efeitos desta interação não podem ser ignorados devido ao contexto da utilização do óleo do motor nesta dissertação, o qual teve sua variabilidade comprometida, situação esta apresentada na seção 3.7.

A análise estatística desta seção apresentou uma distribuição problemática quando comparada a anterior. Sua análise de resíduos mostrou discrepâncias em relação a distribuição normal proposta por Montgomery, 2005, fato este que não se repetiu na ordem de observação.

Considerando a grandeza das diferenças encontradas neste quesito, e também as questões relacionadas a análise estatística, podemos concluir que virtualmente não há diferenças no consumo de combustível quando variados os parâmetros escolhidos nesta dissertação.

Por fim, este trabalho mostrou que a correta manutenção do trator agrícola, desde sua condição extrema (que leva em conta todos fatores em seu nível extremo) até sua condição ideal (com todos fatores em condição ideal) aumenta em até 7% a potência útil disponibilizada pelo equipamento para o trabalho do campo.

Como sugestão para trabalhos futuros propõe-se:

- Entendimento da relação entre condição externa do radiador e a potência útil medida,
- Estudo da interação entre contaminação de óleo diesel com água e quantidade de horas de uso do óleo do motor,

- Repetição deste estudo utilizando um dinamômetro de rolo, onde será possível analisar a interação destes fatores considerando também as perdas relacionadas à transmissão, o que torna o resultado mais próximo das condições de campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bhushan B. **Modern Tribology Handbook**, Volume One, CRC Press, EUA, 2011.
- Burnete, N.; Moldovanu, D.; Baldean, D. **Studies and Researches Regarding the Influence of Lubricating Oil Temperature on Diesel Engines**, ACTA Technica Corviniensis, tome VI, fascicule 3 (Julho – Setembro), Romênia, 2013.
- Donni, R. G., **Aplicação de Simulação de Projeto de Experimentos na Análise de um Condensador Evaporativo**, Dissertação de Mestrado, DEMEC / UFRGS, Porto Alegre, 2011.
- EcoAgro Consultoria, disponível em: <<http://www.ecoagro.agr.br/agronegocio-brasil>>. Acessado em 15 de dezembro de 2015.
- Fisher, R. A., **The Design of Experiments**, Editora Oliver and Boyd, 2ª Ed, Reino Unido, 1937.
- Galdamez, E. V. C, **Aplicação das Técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos no Processo de Injeção Plástica**, Rev. Gestão e Produção, v.11, n.1, p121-134, São Carlos, 2004.
- Garcia, C. V. P., **Comunicação Interpessoal**, Refinaria Ipiranga, Canoas, 2015
- Garib, T. M. et al.. **Projeções do Agronegócio: Brasil 2014/14 a 2024/25**, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília, 2015.
- Goud, B. P. K.; Goud, S. C.; **Experimental and Numerical Study on Performance of Air Filters for Diesel Engine**, International Journal of Engineering, Science and Innovative Technology, India, 2014.
- Hald, A., **A history of mathematical statistics from 1750 to 1930**. Editora Wiley-Interscience, Nova Iorque, 1998.
- Jääskeläinen, H.; Khair, M.; **Intake Air Management for Diesel Engines**, DieselNet Technology Guide, EUA, 2011.
- Lacey, P. I.; Gonsel, S.; Ferner, M.D.; Pozebanchuk, M.; Alim, A.; **Effect of Oil Drain Interval on Crankcase Lubricant Quality**, SAE International Publications, EUA, 2003.
- Lakatos, E. M.; Marconi, M. A., **Fundamentos de Metodologia Científica, 5ª Ed**, Editora Atlas, São Paulo, 2003.
- Mamat, R.; Rolsi, N.; Xu, H.; Wyszynsky, M.; Tsolakis, A. **Effect of Air Intake Pressure Drop on Performance and Emissions of a Diesel Engine Operating with**

Biodiesel and Ultra Low Sulphur Diesel (ULSD), International Conference of Renewable Energies and Power Quality, Espanha, 2009.

Márquez, L. **Tractores Agrícolas: Tecnología y Utilización**, 1ª ed., B & H, Espanha, 2011.

Montgomery, D. C. **Design and Analysis of Experiments**, 6ª ed., John Wiley & Son, EUA, 2005.

Oliveira, M. D. M. **Custo Operacional e Ponto de Renovação de Tratores Agrícolas de Pneus: Avaliação de uma Frota**, Dissertação de Mestrado, USP, Piracicaba, 2000.

Rahim, R.; Mamat, R.; Taib, M.Y.; Abdullah A.A. **Influence of Fuel Temperature on a Diesel Engine Performance Operating with Biodiesel Blended**, Journal of Mechanical Engineering, Vol 2, Pg 226-236, Malasia, Junho 2012.

Ribeiro, J. L. D.; Caten, C. S., **Projeto de Experimentos**, Apostila UFRGS, Porto Alegre, 2000.

Rosario, M. F. **120 Anos do Nascimento do Cientista R. A. Fisher (1890-2010)**, Rev. Bras. Biom v27, n4, p659-672, São Paulo, 2009.

Sasaqui, C. S. **Utilização Sequencial de Projeto de Experimentos e Inferência Bayesiana na Previsão de Demanda**, Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2004.

Savage, L. J. H. **On rereading R. A. Fisher with discussion**. Annuals of Statistics, v.4, p.441- 500, 1976.

Singh, D. **Investigating the Effect of Engine Lubricant Viscosity on Engine Friction and Fuel Economy of a Diesel Engine**, Dissertação de Mestrado, Universidade de Huddersfield, Reino Unido, 2011.

Taylor, R.I.; **Tribology and Energy Efficiency: from Molecules to Lubricated Contacts to Complete Machines**, Faraday Discussions, The Royal Society of Chemistry, Reino Unido, 2012.

Taylor, R.I.; Morgan, N.; Mainwaring, R. **Lubricants for Improved Energy Efficiency**, LUBMAT, Reino Unido, 2014.

Thomas, J.; West, B.; Huff, S.; **Effect of Intake Air Filter Condition on Vehicle Fuel Economy**. Oak Ridge National Laboratory, EUA, 2009.

Thomas, J.; West, B.; Huff, S.; **Effect of Air Filter Condition on Diesel Vehicle Fuel Economy**. SAE International Publications, EUA, 2013.

Thomas, J.; West, B.; Huff, S.; Norman, K. **Effect of Air Filter Condition on Light-Duty Gasoline Vehicles**. SAE International Publications, EUA, 2012.

Werkema, M. C. C.; Aguiar, S. **Planejamento e análise de experimentos: como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo**, Fundação Christiano Ottoni, Belo Horizonte, 1996.

APÊNDICE A – Incertezas de medição dos instrumentos

Grandezas	Instrumento	Fabricante/Modelo	Incerteza
T_{bs} T_{bu} T_{adm_ar} T_{comb} $T_{\text{óleo_motor}}$ $T_{\text{água_saida_Motor}}$ $T_{\text{água_Entrada_Motor}}$	PT 100	ECIL / TS11 Classe A	$\pm 0,15 + (0,002 \times T)^\circ\text{C}$
Massa Balança Consumo	Célula de Carga	Alfa / GL10	0,03%
Rotação (dinamômetro)	Dinamômetro	Schenck / W700	± 1 rpm
Torque (dinamômetro)	Dinamômetro	Schenck / W700	0,2 %
Potência	Dinamômetro	Schenck / W700	0,2 %
Pressão Ar / Pressão Combustível	Transdutor de Pressão	INCON / TM50	$\pm 0,25\%$ FE

Tabela A.1 – Incertezas de medição sensores utilizados durante os ensaios.