

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ

ROVIAN BERTINATTO

**ANÁLISE DA CONTAMINAÇÃO E DEGRADAÇÃO DO ÓLEO
LUBRIFICANTE E DESGASTE DE UM MOTOR OTTOLIZADO
ALIMENTADO POR BIOGÁS**

CASCVEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2014

ROVIAN BERTINATTO

**ANÁLISE DA CONTAMINAÇÃO E DEGRADAÇÃO DO ÓLEO LUBRIFICANTE E
DESGASTE DE UM MOTOR OTTOLIZADO ALIMENTADO POR BIOGÁS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti

COORIENTADOR: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Ficha catalográfica elaborada por Jeanine da Silva Barros CRB-9/1362

B438a Bertinato, Rovian
Análise da contaminação e da degradação do óleo lubrificante e
desgaste de um motor Ottolizado alimentado por biogás. / Rovian
Bertinato — Cascavel, PR: UNIOESTE, 2014.
75 p.

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Aparecido Baricatti
Co-orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do
Paraná.

Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na
Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.
Bibliografia.

1. Biogás. 2. Biometano. 3. Lubrificantes. 4. Análise de óleo. I.
Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

CDD 21°ed. 628.74

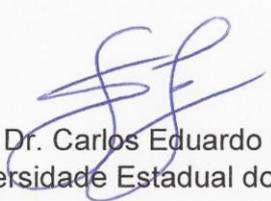
ROVIAN BERTINATTO

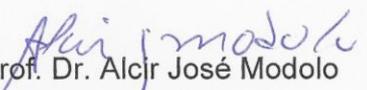
**“Análise da contaminação e degradação do óleo lubrificante
e desgaste de um motor Ottolizado alimentado por biogás”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, **aprovada** pela seguinte Banca Examinadora:

Orientador:


Prof. Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel


Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel


Prof. Dr. Alcjr José Modolo
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/Pato Branco

Cascavel, 14 de fevereiro de 2014.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio e incentivo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti, pela agilidade, simplicidade e pelos importantes conhecimentos repassados.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza, pela dedicação e disposição em orientar-me tanto no período da pré-seleção quanto no decorrer desta jornada.

Aos demais professores do programa de mestrado, que direta ou indiretamente contribuíram para a aquisição de novos conhecimentos e desenvolvimento da pesquisa.

Ao Sr. Lauri Rauber e seu filho Sr. Lauri R. Junior, por disponibilizar o motor e os recursos de sua propriedade para realização deste experimento.

Ao Grupo Fockink, em especial aos Srs. Everton Waechter e Romulo Wylles Porto Dorneles, pelo interesse e presteza para o desenvolvimento do presente trabalho.

Ao Prof. Dr. Alcir José Modolo pela participação intensa na banca expondo importantes pontos no trabalho e pelas contribuições para a finalização desta dissertação.

À Vanderléia Luzia Stockmann Schmidt, que no mestrado nos mantém dentro dos prazos e regulamentos, e nos orienta com amor e dedicação.

À UNIOESTE, por oferecer o programa de Mestrado em Energia na Agricultura.

À CAPES pelo incentivo através da bolsa de pesquisa.

À Lana, Thais e Ivan, pela amizade sincera e bons momentos compartilhados.

À todos os amigos que fiz nesta Universidade.

Conhecimento não tem valor
exceto pelo que pode ser ganho
pela sua aplicação.

(Napoleon Hill)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
SIMBOLOS.....	x
RESUMO	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1 Biogás e Biometano	3
2.2 Motores de combustão para utilização do biogás	4
2.3 Filtragem do biogás.....	5
2.4 Lubrificante.....	6
2.4.1 Degradação	9
2.4.2 Contaminação	10
2.4.3 Resíduos de Desgaste.....	10
2.5 Propriedades dos lubrificantes	12
2.6 Classificação dos lubrificantes.....	13
2.6.1 Classificação API.....	15
2.6.2 Classificação SAE.....	15
2.7 Valores de referência para troca de óleo lubrificante de motor	16
3. MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1 Local do experimento	18
3.2 Grupo gerador, filtros de biogás e quadro de comando	18
3.3 Lubrificante utilizado.....	21
3.4 Procedimento de coleta e análise do óleo lubrificante	23
3.4.1 Análises realizadas no óleo lubrificante.....	26
3.5 Procedimentos de coleta e análise do biogás	26
3.6 Comparação dos resultados com as características do lubrificante sem uso.....	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.1 Análises de contaminação e desgaste do óleo lubrificante	29
4.1.1 Viscosidade, TBN e análises por infravermelho.....	32
4.1.2 Análises por espectrometria de emissão óptica a plasma.....	37
4.1.2.1 Metais indicadores de desgaste	37
4.1.2.2 Metais indicadores de contaminação.....	41
4.1.2.3 Aditivos	43
4.1.2.4 Testes Físicos	47

4.2	Análise do biogás.....	47
4.3	Comparação dos resultados do biogás e óleo lubrificante	50
5.	CONCLUSÕES	53
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Limalha de ferro antes e depois da oxidação pelo gás sulfídrico.	6
Figura 2.	Processo de formação de sedimentos e depósitos no motor.	9
Figura 3.	Curva da banheira relacionando os níveis de desgaste no motor.....	11
Figura 4.	Distribuição de tarefas de cada unidade. Ilustra a relação entre SAE, API e ASTM, no desenvolvimento de novos produtos.....	14
Figura 5.	Biodigestores da Granja Jucélia – São Miguel do Iguaçu-PR.	18
Figura 6.	Grupo gerador fabricado pela Fockink.	19
Figura 7.	Filtros para biogás ligados em série antes da entrada na admissão do grupo gerador.....	19
Figura 8.	Quadro de comando do grupo gerador.	20
Figura 9.	Tela principal do quadro de comando do grupo gerador.	20
Figura 10.	Óleo Petrobrás Lubrax Extra Turbo utilizado no presente estudo.	22
Figura 11.	Bomba de coleta de lubrificante a vácuo, inserida na haste da vareta de lubrificante para a obtenção das amostras.	24
Figura 12.	Kit de coleta de lubrificante, fornecido pelo laboratório terceirizado.	25
Figura 13.	Bolsa amostradora utilizada para a coleta de biogás.	26
Figura 14.	Kit de análise de biogás Alfakit – Embrapa utilizado no experimento.....	27
Figura 15.	Variação da viscosidade cinemática a 100°C do óleo em relação ao período de horas trabalhadas.	32
Figura 16.	Variação do índice de basicidade total (TBN) do óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.	34
Figura 17.	Variação da oxidação do óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.....	35
Figura 18.	Variação dos nitratos do óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.	36
Figura 19.	Variação dos sulfatos do óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.....	37
Figura 20.	Variação da quantidade de cobre no óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.	39
Figura 21.	Variação da quantidade de ferro no óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.	39
Figura 22.	Variação da quantidade de chumbo no óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.	40
Figura 23.	Variação da quantidade de estanho no óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.	41
Figura 24.	Variação da quantidade de alumínio no óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.	42
Figura 25.	Variação da quantidade de silício no óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.	43

Figura 26. Variação da quantidade de cálcio no óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.....	44
Figura 27. Variação da quantidade de magnésio no óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.....	45
Figura 28. Variação da quantidade de fósforo no óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.....	46
Figura 29. Variação da quantidade de zinco no óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.....	47
Figura 30. Concentrações de metano (CH ₄) no biogás.....	49
Figura 31. Concentrações de gás sulfídrico (H ₂ S) no biogás.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Causas possíveis de contaminação do óleo de motores.....	8
Tabela 2.	Fontes típicas de elementos metálicos encontradas no óleo lubrificante.....	8
Tabela 3.	Classificação SAE para óleos de motor.....	16
Tabela 4.	Valores limites para elementos de desgaste, contaminação, aditivos e condições do óleo lubrificante de motor.....	17
Tabela 5.	Especificações do quadro de comando do grupo gerador.....	21
Tabela 6.	Análises típicas do óleo Petrobrás Extra Turbo 15w40.....	22
Tabela 7.	Resultados das amostras de óleo lubrificante analisadas.....	30
Tabela 8.	Resultados das análises de biogás.....	48

SIMBOLOS

Ag – Prata.

Al – Alumínio.

API – *American Petroleum Institute.*

ASTM – *American Society for Testing and Materials.*

ACEA - *Association des Constructeurs Européens d'Automobile.*

B – Boro.

Ba – Bário.

Ca – Cálcio.

CH₄ – Metano.

Cr –Cromo.

CO – Monóxido de carbono.

CO₂ – Dióxido de carbono.

cP – Centipoise.

cSt – Centistokes (mm²s⁻¹).

Cu – Cobre.

Fe – Ferro.

GNV – Gás natural veicular.

H – Hidrogênio.

H₂O – Água.

H₂S – Ácido sulfídrico.

ha – Hectare.

hM – Horas motor/máquina.

JASO – *Japanese Automobile Standards Organization.*

K – Potássio.

MB – Mercedes-Benz.

Mg – Magnésio.

Mo – Molibdênio.

MTU – Empresa pertencente a Rolls-Royce e Daimler.

Na – Sódio.

NH₄ – Amônia.

Ni – Níquel.

No – Monóxido de nitrogênio.

No₂ – Dióxido de nitrogênio.

O – Oxigênio.

P – Fósforo.

Pb – Chumbo.

S – Enxofre.

SAE – *Society of Automotive Engineers*.

Si – Silício.

SO₂ – Dióxido de enxofre.

Sn – Estanho.

s.d. – Sem data.

TBN – *Total base number* – índice de basicidade total.

Ti – Titânio.

UPL – Unidade de produção de leitões.

Zn- Zinco.

RESUMO

BERTINATTO, R., (2014), *Análise da contaminação e degradação do óleo lubrificante e desgaste de um motor Ottolizado alimentado por biogás*. Cascavel, 60p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Energia na Agricultura). Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti. Coorientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

A crescente implantação de biodigestores para tratamento de resíduos nas propriedades rurais, e a utilização do biogás gerado na produção de energia mecânica, trouxe a necessidade de se conhecer a influência da utilização deste combustível nos motores de combustão interna. Este trabalho teve como objetivo analisar a influência da utilização do biogás filtrado na contaminação e degradação do óleo lubrificante, desgaste e corrosão do motor. Amostras de óleo lubrificante foram coletadas a cada 75 horas de funcionamento do motor, e após correlacionadas dentre elas e com a amostra de óleo novo, determinando os elementos presentes no biogás que contribuem para a contaminação e degradação do óleo lubrificante, como também o desempenho do lubrificante no decorrer das horas trabalhadas e o desgaste do motor. Os resultados demonstram que o gás sulfídrico influencia no desempenho do óleo lubrificante e no desgaste do motor. Dentre os metais foi identificado que a concentração de cobre excedeu o máximo recomendado pela literatura, e a elevação da sua concentração teve relação com a elevação de chumbo e estanho, principalmente após as 375 hM. Em relação aos aditivos, foi a variação das concentrações de magnésio que impactou no desempenho do lubrificante. Através do monitoramento da qualidade do lubrificante é possível estender o intervalo de troca de óleo do motor do presente estudo em 50%, resultando em uma economia de 33,3% no custo do lubrificante por hora trabalhada.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de óleo, Biogás, Biometano, Lubrificantes.

ABSTRACT

BERTINATTO, R., (2014), *Analysis of contamination and degradation of the lubricating oil and wear a adapted Otto engine powered by biogas*. Cascavel, 60 p. Dissertation (Master in Energy in Agriculture). Center for Science and Technology. State University of West Paraná. Adviser: Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti. Co-Adviser: Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

The implementation of digesters for waste material treatment in rural properties, as well as the use of the biogas that is generated on the making of mechanical energy, has increased and alongside with it the necessity of understanding the influence of this fuel in internal combustion engines. This study aims to analyze the filtered biogas influence on contaminating and degrading the lubricating oil and the engine. Lubricating oil samples were collected on every 75 hours of engine operation, and, after they had been correlated among themselves and with new oil samples, it was possible to determine the elements that contaminate and degrade the engine after hours of engine working. Therefore, it was possible to notice that the hydrogen sulphide influences the lubricating oil and engine performance. Among the metals it was possible to identify that the copper concentration exceeded the maximum recommended levels, and the elevation of its concentration was related to the elevation of lead and tin, mainly after 375 Hm. As for the additives, the magnesium variation levels affected the lubricant performance. By monitoring the quality of the lubricant is possible to increase the oil change interval in 50%, which results in a 33.3% save regarding the lubricant cost every worked hour.

KEY-WORDS: Oil analysis, Biogas, Biomethane, Lubricants.

1 INTRODUÇÃO

O biogás, composto principalmente por metano e dióxido de carbono, apresenta também em sua composição impurezas e outros gases, como o gás sulfídrico, dióxido de enxofre e vapor de água, em quantidades que variam conforme a biomassa empregada, fatores climáticos, dimensões do biodigestor, entre outros (SEIXAS et al., 1980). Estas substâncias adversas causam danos ao motor, resultando em oxidação, desgaste prematuro e contaminação do óleo lubrificante.

Métodos de filtragem foram desenvolvidos e já são utilizados pelas principais empresas que comercializam motores alimentados a biogás. A filtragem do biogás resulta no biometano, sendo que este processo consiste na remoção dos contaminantes e impurezas presentes no biogás, e no aumento do teor de metano com a diminuição da quantidade de dióxido de carbono presente.

Devido aos métodos de filtragem existentes e seu baixo custo frente aos benefícios de sua utilização, utilizar o biogás *in natura* em motores de combustão interna torna-se inviável, devido aos contaminantes presentes e ao menor rendimento consequente da baixa quantidade de metano. Porém, a filtragem atualmente utilizada comercialmente não torna o biogás completamente ausente das impurezas e outros gases citados anteriormente, necessitando verificar e quantificar as substâncias contaminantes remanescentes. Este fato foi constatado por Magalhães (2004), que ao construir e avaliar uma coluna de absorção de dióxido de carbono verificou que a quantidade absorvida pela coluna resultou em um aumento de 67 para 85% do teor de metano, porém, valor insuficiente para ser utilizado nos mesmos usos finais do GNV (gás natural veicular), pois nos 15% restantes está presente o dióxido de carbono e possíveis substâncias adversas não removidas nos processos de filtragem.

Segundo Souza e Schaeffer (2010), o biogás filtrado com 90% de metano possui características similares ao GNV. A utilização do GNV em motores adaptados, em relação ao uso de diesel e da gasolina, resulta na extensão dos intervalos de troca do óleo lubrificante e maior vida útil do motor. Portanto, mais pesquisas são necessárias para os motores que utilizam biogás, pois o conhecimento da durabilidade do motor, períodos de manutenção e intervalos de troca de óleo lubrificante é primordial para um correto planejamento da manutenção, além do benefício da racionalização da utilização de lubrificantes.

O óleo lubrificante carrega informações importantes sobre as condições do meio em que circula, e com sua análise é possível determinar o grau e natureza dos metais de desgaste, dos contaminantes e das características básicas dos lubrificantes, possibilitando a correção de problemas iminentes e catastróficos. O monitoramento das condições do óleo lubrificante é

uma ferramenta preventiva para diminuir o risco de falhas prematuras do funcionamento do motor (LUBES EM FOCO, 2010).

As análises de óleos lubrificantes para motores de combustão interna são importantes não só para o controle de sua própria qualidade, mas também, para o aumento da vida útil dos equipamentos em que são usados. Com as análises obtêm-se preciosas informações acerca do estado de conservação em que se encontram (ALVES, 2007).

O objetivo geral do trabalho é analisar a influência da utilização do biogás filtrado na contaminação e degradação do óleo lubrificante, desgaste e corrosão do motor.

Os objetivos específicos são:

- Verificar a composição, concentrações de contaminantes e partículas de desgaste no óleo lubrificante, correlacionando estes resultados com as análises de biogás e com a amostra de óleo sem uso (novo). Identificar a necessidade de redução ou extensão dos períodos de substituição da carga de lubrificante.
- Analisar a viabilidade da utilização do biogás como combustível.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Biogás e Biometano

No meio rural, o aproveitamento de biomassa para fins energéticos pode ser um meio facilitador para atingir a sustentabilidade da produção, em função da sua disponibilidade nas propriedades agrícolas, por apresentar baixo custo dos resíduos da produção, grande potencial de geração de energia, diminuição no potencial poluidor dos resíduos, redução na pressão sobre os recursos naturais e economia de recursos energéticos (ANGONESE et al., 2006). A produção de resíduos agroindustriais, pastoris e de criadouros confere ao Brasil um imenso potencial de geração de biogás. A geração ocorre da degradação dos resíduos, produzindo energia limpa, renovável e grande quantidade de fertilizante agrícola sem contaminantes (SOUZA, 2010).

O processo mais utilizado para conversão dos resíduos em gás é a digestão anaeróbia, realizada em biodigestores, onde a carga orgânica dos dejetos é reduzida produzindo o biofertilizante e o biogás. O biogás é composto principalmente por metano e gás carbônico.

A composição do biogás pode variar de acordo com o tipo e a quantidade de biomassa empregada, fatores climáticos, dimensões do biodigestor, entre outros. Quando as condições ambientais (temperatura, umidade, etc.) para o processamento de dejetos pelos microrganismos são atendidas, o biogás obtido deve ser composto de uma mistura de gases, com cerca de 60 ou 65% do volume total consistindo em metano, enquanto os 35 a 40% restantes consistem, principalmente, de gás carbônico e quantidades menores de outros gases (SEIXAS et al., 1980). As impurezas e outros gases contaminantes geralmente encontrados são a amônia, dióxido de enxofre, o gás sulfídrico e vapor de água.

A presença de vapor d'água, gás carbônico e gases corrosivos no biogás *in natura*, constituem no principal problema na viabilização de seu armazenamento e na produção de energia. Equipamentos mais sofisticados, a exemplo de motores a combustão, geradores, bombas e compressores têm vida útil extremamente reduzida. A remoção de água, dióxido de carbono, gás sulfídrico, enxofre e outros elementos através de filtros e dispositivos de resfriamento, condensação e lavagem são imprescindíveis para a confiabilidade e emprego do biogás (OLIVEIRA, 2004).

O biometano representa uma melhoria do biogás, pela remoção dos contaminantes presentes no mesmo, e no aumento do teor de metano com a diminuição da quantidade de dióxido de carbono presente. O processo mais utilizado é a filtragem, onde o biometano resultante, em relação ao biogás, tem a vantagem de maior teor de metano e perca do

potencial corrosivo. O biometano com 90% de metano possui características similares ao GNV, podendo ser utilizado como combustível alternativo em motores de combustão interna acoplados a geradores de energia elétrica instalados em áreas rurais. Os motores a gás funcionam segundo os mesmos princípios dos motores a diesel e a gasolina, bastando algumas modificações no sistema de alimentação, ignição e também na taxa de compressão (SOUZA e SCHAEFFER, 2010; SOUZA et al., 2004).

2.2 Motores de combustão para utilização do biogás

Motores de combustão podem ser classificados como do tipo de combustão externa, no qual o fluido de trabalho está completamente separado da mistura ar/combustível, sendo o calor dos produtos da combustão transferido através das paredes de um reservatório ou caldeira, e do tipo de combustão interna, no qual o fluido de trabalho consiste nos produtos da combustão da mistura de ar/combustível propriamente. Uma vantagem fundamental do motor de combustão interna, sobre as instalações de potência de outros tipos, consiste na ausência de trocadores de calor no circuito do fluido de trabalho, tal como a caldeira e condensador de uma instalação a vapor (SUZUKI et al., 2011).

A ausência destes componentes não apenas conduz à simplificação mecânica, mas também elimina a perda inerente ao processo de transmissão de calor através de um trocador de área finita. O motor de combustão interna possui outra vantagem fundamental importante sobre a instalação a vapor ou turbina a gás, pois todas as peças podem trabalhar a temperaturas bem abaixo da máxima temperatura cíclica (RAHDE, 2006).

Os principais motores de combustão interna que já operam utilizando biogás com sucesso são os de ciclo Diesel Ottolizado e de ciclo Otto. Motores de ciclo Diesel são caracterizados pela combustão da mistura ar-combustível através da compressão, enquanto os motores de ciclo Otto a combustão é acionada através de uma centelha, produzida por vela de ignição.

Segundo Mihic (2004) e Pereira et al. (2005), a utilização de biogás em motores de ciclo Diesel é obtida mediante duas tecnologias: a Ottolização e a conversão bicomcombustível (diesel/biogás). Já os motores de ciclo Otto necessitam de pequenas modificações para poderem utilizar o biogás como combustível, porém, não são os mais indicados para geração de eletricidade. O mais apropriado é o motor de ciclo Diesel, pela sua maior robustez e menor custo para uma mesma potência.

Quando se trata de ignição comandada por gás puro, considera-se que a maioria dos motores de ciclo Otto que utilizam gasolina podem ser facilmente modificados para o funcionamento com gás natural, propano ou metano (EMCON ASSOCIATES, 1980). Para modificar eficientemente um motor de ciclo Otto para operar a biogás, são necessárias mudanças na taxa de compressão, avanço da ignição e a substituição do carburador/sistema de injeção por um misturador ar/biogás, sendo o controle da mistura realizado por meio de uma válvula borboleta.

Para a operação bicombustível de motores ciclo Diesel, especificamente diesel e biogás, o biogás é introduzido juntamente com o ar na fase de admissão, e a ignição é efetuada por uma pequena injeção-piloto de diesel para proporcionar a ignição por compressão, dando início à combustão do gás que é admitido no cilindro pelo coletor de admissão. Esse sistema apresenta a vantagem de não exigir modificações no motor (OBERT, 1971).

O processo de Ottolização consiste em retirar todo o sistema de injeção de Diesel, e em seu lugar, instala-se um sistema de carburação do gás ao ar de admissão, além de um sistema elétrico com velas para a ignição, que passa a ocorrer por centelha. Também é necessário modificações nos cabeçotes dos motores para a adequação de sua taxa de compressão, já que motores do ciclo Otto trabalham com taxas de compressão inferiores aos motores de ciclo Diesel. Não são raras perdas de potência e desempenho de um motor Ottolizado (SOUZA et al., 2004). Mesmo que esse seja o caminho mais complicado, esse se apresenta possivelmente como o motor mais adequado para a utilização com biogás. (SUZUKI et al., 2011).

2.3 Filtragem do biogás

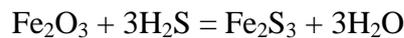
O principal prejuízo em motores que não utilizam processos de limpeza de gases é sua rápida degradação, devido à presença de vapor de água, dióxido de enxofre e principalmente pelo o gás sulfídrico, causando corrosão em diversas partes do motor, desgaste de partes móveis e possível contaminação do óleo lubrificante.

Também haverá um baixo rendimento devido à presença de dióxido de carbono, que atua como um antidetonante. A redução dos teores de dióxido de carbono pode ser efetuada com uma lavagem (em solventes ou simplesmente em água) do biogás e posterior secagem, que também atuará na diminuição dos teores de vapor de água.

É importante ressaltar que o poder calorífico do biogás *in natura* varia de 5.000 a 7.000 Kcal.m⁻³, e o biometano (biogás altamente filtrado) pode alcançar até 12.000 Kcalm⁻³ (TURDERA e YURA, 2006; VELOSO e SILVA, 2009).

A redução ou total eliminação dos teores de gás sulfídrico é necessária devido a sua toxicidade, e que sua acidez além de destruir os equipamentos provoca chuva ácida pelos gases de combustão do motor.

Segundo Bui (2008), o processo de remoção do gás sulfídrico pode ocorrer a seco, através da passagem do biogás por uma coluna de limalha de ferro, onde ocorrerá a oxidação do ferro e purificação do gás, conforme a seguinte reação:



Como a limalha irá saturar, sendo toda a sua superfície oxidada (Figura 1), devemos regenerá-la através da passagem de oxigênio de forma controlada através do filtro. Este processo deve ser lento devido à reação ser exotérmica, evitando assim a queima da limalha e incêndios. A reação de regeneração é:

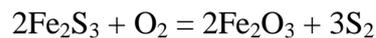


Figura 1. Limalha de ferro antes e depois da oxidação pelo gás sulfídrico.
Fonte: Bui et al. (2008).

No sistema de limalha de ferro é recomendado atuar com dois filtros ligados em paralelo, com registros de controle para uso individual. Assim, enquanto um filtro é utilizado outro está se regenerando.

2.4 Lubrificante

Lubrificante pode ser definido como um gás, líquido ou sólido capaz de reduzir o atrito, calor e desgaste entre duas superfícies sólidas em movimento relativo (SCHILLING e BRIGHT, 1977 apud SILVA, 2006).

O óleo lubrificante é responsável pela redução do atrito e conseqüentemente desgaste do motor, bem como pela limpeza dos resíduos da combustão e dos resíduos provocados pelo desgaste de componentes. A eficiência do lubrificante pode ser diminuída pela utilização severa do motor e por contaminantes, tais como, água, poeira (sílica), combustíveis e resíduos da combustão. Através da análise periódica do lubrificante, é possível acompanhar a sua deterioração normal e aquelas causadas por contaminações diversas, servindo como indicativo de manutenções preventivas (CORRÊA et al., 2011).

Segundo Kimura (2010), as funções básicas de um lubrificante em um motor é a redução do atrito entre peças metálicas, refrigeração, limpeza, proteção contra a corrosão e vedação da câmara de combustão.

Stachowiak e Batchelor (1993) relatam as propriedades físicas e químicas que caracterizam óleos lubrificantes: viscosidade, densidade, propriedades térmicas (calor específico, condutividade e difusividade), temperaturas características (ponto de fluidez e de ebulição, ponto de fulgor e de inflamação, volatilidade e evaporação, estabilidade a oxidação, estabilidade térmica, tensão superficial, n.º. de neutralização e resíduo de carbono), propriedades óticas (índice de refração), compatibilidade e solubilidade de aditivos, impurezas e contaminantes (conteúdo de água, enxofre, cinzas, cloro), solubilidade de gases em óleo.

Conforme afirma Taylor (2004), dentre as propriedades físicas de um lubrificante a viscosidade é a mais significativa, pois o modo como essa propriedade varia com a temperatura, a taxa de cisalhamento e a pressão determina seu desempenho no motor.

A análise do lubrificante consiste em coletar amostras de óleo em um determinado período de funcionamento do motor e, posteriormente, avaliá-las para determinar tanto o estado do motor quanto do lubrificante (FYGUERO e SÍMON, 1997).

Em um motor se detecta certo grau de contaminação no óleo devido à presença de partículas de desgaste ou substâncias parecidas. O estado em que o óleo sofre determinada degradação é aquele em que ele perde sua capacidade de lubrificar devido a uma variação das propriedades físicas e químicas de seus aditivos (KIMURA, 2010).

Snook (1968) analisando óleos usados em motores, identificou a degradação e contaminação como as principais causas de prejuízo à eficiência do óleo lubrificante. Estabeleceu um programa básico de ensaios de óleos de motores e descreveu os procedimentos em laboratório, bem como os meios e causas de contaminação e degradação, correlacionando os contaminantes com os prováveis defeitos das máquinas e seus pontos de origem. Essa correlação de causa e efeito é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Causas possíveis de contaminação do óleo de motores

Contaminação por água	<ol style="list-style-type: none"> 1. Condensação: Operações a baixa temperatura, ventilação inadequada do cárter, uso excessivo em marcha lenta, períodos curtos em serviços intermitentes; 2. Elevado vazamento de gases: Anéis ou camisas gastas, restrições no sistema de escape; 3. Vazamento de refrigerante: juntas do cabeçote vazando, cabeçote apertado com torque indevido, bloco ou cabeçote rachado;
Redução da viscosidade	<ol style="list-style-type: none"> 1. Uso de produto menos viscoso; 2. Diluição pelo combustível: alimentação excessiva de combustível, bicos injetores gotejando, alimentação de ar ou sistema de escape obstruído;
Aumento da viscosidade	<ol style="list-style-type: none"> 1. Uso de produto mais viscoso; 2. Contaminação por água e por fuligem do combustível; 3. Degradação: refrigeração inadequada, operação com mistura pobre, períodos de drenagem excessivamente prolongados;
Contaminação por insolúveis	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fuligem do combustível: operação com mistura rica, bicos injetores defeituosos, entrada de ar de admissão obstruída; 2. Entrada de poeira: manutenção inadequada do filtro de ar, vazamento de ar no sistema de admissão; 3. Desgaste metálico: geralmente relacionado com quantidade de impurezas aspiradas, manutenção inadequada do filtro de ar;

Fonte: Snook (1968).

Gasparini (1983) efetuou análises de óleo lubrificante com a finalidade de aperfeiçoar a sua utilização. Os resultados foram comparados com análises de óleo novo e correlacionados com causas mecânicas de contaminação, como indicado na Tabela 2.

Tabela 2. Fontes típicas de elementos metálicos encontradas no óleo lubrificante

Elemento	Fontes típicas
Alumínio	Pistões, mancais e poeiras
Antimônio	Mancais
Cromo	Cilindros, anéis, refrigerante, virabrequim e engrenagens
Cobre	Mancais, buchas e peças de bronze
Ferro	Cilindros, camisas, ferrugem e virabrequim
Chumbo	Mancais, gasolina, graxas e tinta
Níquel	Eixos, anéis e válvulas
Silício	Poeira e anti-espumantes
Estanho	Solda e mancais
Titânio	Molas, válvulas e componentes de turbinas
Zinco	Aditivo, mancais e chapas galvanizadas

Fonte: Gasparini (1983).

Uma proporção significativa dos gases produzidos na combustão vaza através dos anéis do pistão, contaminando o óleo do cárter e causando outros efeitos adversos. Esse vazamento

dos produtos da combustão é conhecido como *blowby*. São eles o dióxido de carbono, os óxidos de nitrogênio, a água, componentes ácidos e resíduos de hidrocarbonetos (CAINES e HAYCOCK, 1996).

Particularmente, no caso do óleo diesel, o enxofre residual queima na câmara de combustão para produzir ácido sulfuroso e sulfúrico. Esses ácidos podem causar corrosão e desgaste corrosivo no motor, e atuar como catalisador tanto na degradação do óleo quanto na formação de gomas e vernizes (CAINES e HAYCOCK, 1996). No biogás o enxofre também é presente, porém é necessário mais pesquisas para avaliar seu comportamento no motor.

A seguir será demonstrado um diagrama do mecanismo de formação de sedimentos e depósitos de carbono em motores diesel (Figura 2).

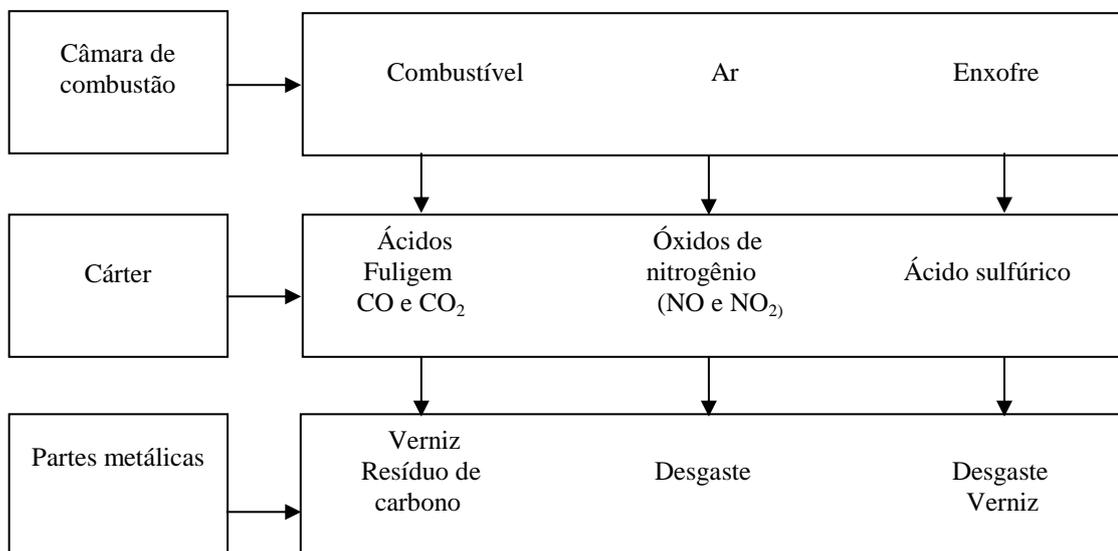


Figura 2. Processo de formação de sedimentos e depósitos no motor.

Fonte: Carreteiro e Moura (1988).

2.4.1 Degradação

Degradação é o processo que reduz a capacidade do óleo de cumprir as funções para que foi dimensionado, isto é, lubrificar, proteger, limpar, refrigerar e vedar, originada pela alteração de suas propriedades físicas e químicas, devido as diferentes condições que é submetido o óleo dentro do motor, como altas temperaturas, grandes velocidades de cisalhamento, materiais corrosivos, contaminações, envelhecimento, etc.

Para determinar a degradação do óleo lubrificante devem ser analisados parâmetros como: aparência (fuligem), viscosidade, índice de basicidade total (TBN), índice de acidez (TAN), oxidação (infravermelho), composição e aditivos, ponto de fulgor, densidade relativa e corrosão em lâmina de cobre.

2.4.2 Contaminação

Entende-se por contaminação do óleo a presença de matérias estranhas, onde temos as partículas metálicas e óxidos metálicos, pó advindo da admissão (filtro obstruído), combustível, água e ácidos provenientes dos gases de combustão e da própria oxidação do óleo lubrificante.

A contaminação pode ser determinada analisando o TBN, efetuando a contagem de partículas, análise de umidade, teste de glicol, diluição de combustível, nitratos, oxidação, sulfatos, fuligens e pela presença de alumínio, potássio, sódio, silício, além de outros metais.

2.4.3 Resíduos de Desgaste

Desgaste é o dano de uma superfície sólida, envolvendo geralmente perda progressiva de material a partir da superfície, por contato ou movimento relativo de um sólido, em relação a outro sólido, líquido ou gás. Esta definição não exclui os fenômenos de dano de superfície sem remoção de massa como, por exemplo, os fenômenos de desgaste acompanhados de oxidação ou aqueles nos quais as partículas de desgaste ficam aderidas à superfície sólida ou ainda aqueles nos quais há apenas deformação da superfície (POSSAMAI, 2011).

Zum Ghar (1987) afirma que existem somente dois modos de remover material de uma superfície: o material pode ser dissolvido da superfície como em uma reação química ou o material pode ser fraturado da superfície. As peças de máquinas e equipamentos não se desgastam simplesmente. Elas se desgastam em vários modos que são diferentes em aparência, mecanismo e solução.

Segundo Lafraia (2001), a vida do motor está separada em três fases distintas:

- Falhas Prematuras: falhas decorrentes devido a problemas de projetos e *start-up* da máquina. Nesta fase, a taxa de falhas do equipamento é decrescente;
- Período de Vida Útil: apresenta taxa de falhas constante, e corresponde ao período em que o equipamento apresenta apenas falhas aleatórias devido a problemas operacionais, falha humana, entre outras;
- Período de Final de Vida Útil: último estágio de comportamento da vida útil do equipamento, o qual apresenta taxa de falhas crescente, indicando o período de obsolescência do mesmo, sendo necessária intervenção para recuperação e aumento de sua confiabilidade.

Complementando as três fases, Possamai (2011) expõe que no início do funcionamento de um motor, no que chamamos de amaciamento (*running-in*), as asperezas presentes nas superfícies dos componentes produzem uma quantidade significativa de partículas decorrentes do desgaste inicial normal. Depois de um período curto de amaciamento do motor, no entanto, as superfícies de atrito estão emparelhadas e com maior

área real de contato alcançada, reduzindo o desgaste ou a mudança do mecanismo de desgaste, como, por exemplo, um desgaste oxidativo leve, que é a formação de óxidos nas áreas reais de contato (ZHANG et al.,1995). Após o período de amaciamento a tendência é de que haja uma estabilização do nível de desgaste (início do período de vida útil), até que volte a apresentar níveis mais elevados de deterioração em função da utilização dos componentes e degradação natural. Estas três fases é conhecida como curva da banheira, e está representada na Figura 3.

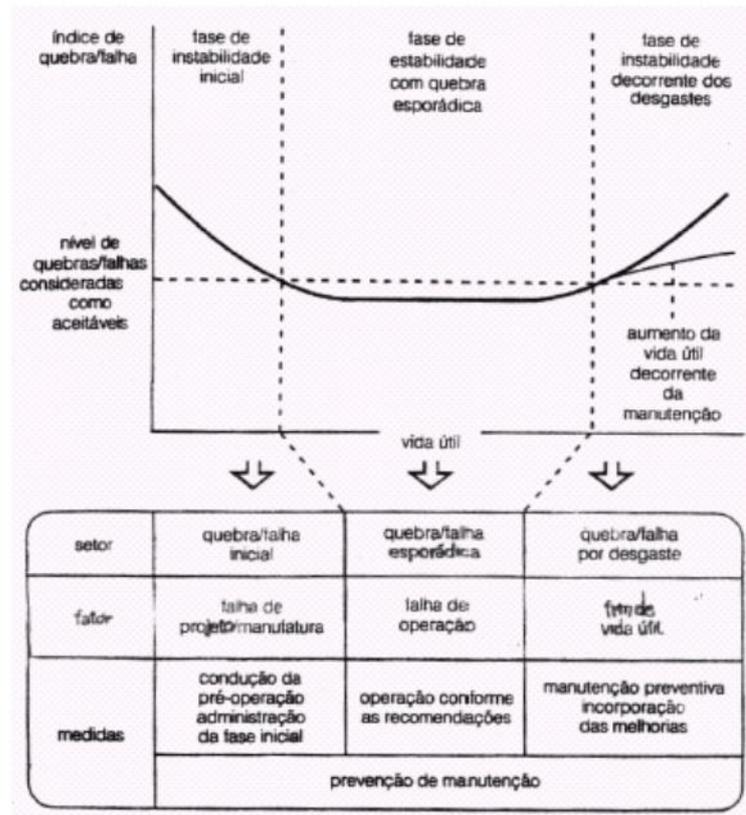


Figura 3. Curva da banheira relacionando os níveis de desgaste no motor.

Fonte: Malpica (2007).

O óleo lubrificante, por trabalhar em contato direto com superfícies móveis do motor, arrasta consigo as partículas geradas pela fricção das superfícies metálicas e tem a missão de carregá-las até o filtro de óleo. É pelo estudo detalhado das partículas presentes no óleo que podemos constatar anomalias no motor, seja por análise quantitativa, onde conhecemos a quantidade de partículas, quanto qualitativamente, sabendo de que material se trata.

O desgaste pode ser identificado no óleo lubrificante através do aumento da quantidade dos metais de composição das peças do motor. Com maior frequência são identificados os seguintes componentes: alumínio, chumbo, cobre, cromo, estanho, ferro, molibdênio, níquel, prata e titânio.

2.5 Propriedades dos lubrificantes

Os óleos lubrificantes possuem como principais características a viscosidade, o índice de viscosidade e a densidade. De acordo com Possamai (2011), viscosidade é aferida através da dificuldade de escoamento de um óleo, ou seja, quanto mais viscoso for um lubrificante, mais difícil será de escorrer, portanto será maior a sua capacidade de manter-se entre duas peças móveis fazendo a lubrificação das mesmas. Já a densidade indica o peso de certa quantidade de óleo a certa temperatura, sendo um fator indicativo da contaminação ou deterioração de um lubrificante.

Os aditivos estão presentes no óleo lubrificante para conferir propriedades especiais ou melhorar as já existentes. Para isto são adicionados compostos químicos especiais, que protegem as superfícies metálicas lubrificadas do ataque químico pela água ou outros contaminantes. Segundo Texaco (2005), os aditivos se enquadram nas categorias a seguir:

Anticorrosivos: Estes aditivos protegem as superfícies metálicas lubrificadas do ataque químico pela água ou outros contaminantes.

Antidesgaste: São compostos que formam um filme protetor nas superfícies metálicas, evitando o rompimento da película de lubrificante, quando submetido a cargas elevadas. A formação deste filme ocorre a temperaturas pontuais de até 300°C.

Antiespumantes: Têm a propriedade de fazer com que a espuma formada na circulação normal do óleo se desfaça o mais rápido possível.

Antioxidantes: Têm a propriedade de aumentar a resistência à oxidação do óleo. Retardam a reação com o oxigênio presente no ar, evitando a formação de ácidos e borras e, conseqüentemente, prolongando a vida útil do óleo. Evitando a oxidação, minimizam o aumento da viscosidade e o espessamento do óleo.

Detergentes: Têm a propriedade de manter limpas as partes do motor. Também têm basicidade para neutralizar os ácidos formados durante a combustão.

Dispersantes: Têm a propriedade de impedir a formação de depósitos de produtos de combustão (fuligem) e oxidação (borra) nas superfícies metálicas de um motor, mantendo estes produtos indesejáveis em suspensão de modo que sejam facilmente retidos nos filtros ou removidos quando da troca do óleo.

Extrema Pressão: Estes aditivos reagem com o metal das superfícies sob pressão superficial muito elevada, formando um composto químico que reduz o atrito entre as peças. Minimizam o contato direto entre as partes, evitando o rompimento da película lubrificante, quando o óleo é submetido a cargas elevadas. Esta reação se dá a temperaturas pontuais elevadas (cerca de

500°C). Estes aditivos são comumente utilizados em lubrificantes de engrenagens automotivas e industriais, e também em graxas.

Melhoradores do Índice de Viscosidade: Têm a função de reduzir a tendência dos óleos lubrificantes variarem a sua viscosidade com a variação da temperatura.

Rebaixadores do Ponto de Fluidez: Melhoram a fluidez dos óleos quando submetidos a baixas temperaturas, evitando a formação de cristais que restringem o fluxo dos mesmos.

Modificadores de Atrito: Os aditivos modificadores de atrito reduzem a energia necessária para deslizar partes móveis entre si, formando uma película que se rompe com o movimento, mas que se recompõe automaticamente. São empregados em óleos de motores (para aumento de eficiência), em sistemas de freio úmido, direções hidráulicas e diferenciais autoblocantes (para diminuição de ruídos), em transmissões automáticas (para melhorar o acionamento das embreagens e engrenagens) e também em graxas para juntas homocinéticas (para o aumento de eficiência). Podem ser substâncias orgânicas (teflon), inorgânicas (grafite, bissulfeto de molibdênio) ou organometálicas (a base de molibdênio ou boro).

Além destes tipos de aditivos, existem vários outros de uso corrente como corantes, agentes de adesividade, etc.

2.6 Classificação dos lubrificantes

De acordo com Kimura (2010), a classificação dos lubrificantes surgiu de uma necessidade que os engenheiros das fábricas de automóveis e os petroleiros tinham em padronizar seus produtos para serem melhores identificados pelo consumidor. As siglas que formam essa classificação atualmente são baseadas em normas de acordo com seu uso, qualidade e destinação. O produto é classificado após testes específicos que determinam as funções, composições, características físicas, entre outros requisitos. Atualmente existem diversos órgãos reguladores que classificam óleos lubrificantes, dentre eles:

SAE - Society of Automotive Engineers: É a classificação mais antiga para lubrificantes automotivos para motor e transmissão, definindo faixas de viscosidade e não levando em conta os requisitos de desempenho. Sua criação começou no início de 1900 quando os grandes produtores de carros começaram a surgir nos EUA e Europa e foi oficializada em 1905, tendo como 1º presidente Andrew Riker e como o 1º vice – presidente, Henry Ford, quem se tornaria mais tarde um marco na história.

API - American Petroleum Institute: Seu começo pode ser rastreado a partir da 1ª Guerra Mundial, quando o Congresso e indústrias de petróleo e gás natural americanas

trabalharam juntas para se fortalecerem. A API foi oficialmente estabelecida em 20 de março de 1919 e elaborou, em conjunto com a ASTM (American Society for Testing and Materials), especificações que definem níveis de desempenho que os óleos lubrificantes devem atender.

ACEA - Association des Constructeurs Européens d'Automobile: Associa alguns testes da classificação API, ensaios de motores europeus (Volkswagen, Peugeot, Mercedes Benz, etc.) e ensaios de laboratório.

JASO - Japanese Automobile Standards Organization: Define especificação para a classificação de lubrificantes para motores dois tempos (FA, FB e FC, em ordem crescente de desempenho).

No Brasil as normas mais utilizadas são API para desempenho e SAE para viscosidade.

Segundo Runge et al (1994), nos Estados Unidos, três entidades, SAE (Society of Automotive Engineers), API (American Petroleum Institute) e ASTM (American Society for Testing and Materials), constituíram um grupo de trabalho para desenvolverem em conjunto, em função das necessidades da indústria automobilística, novas especificações, acompanhamento do desempenho, atualização e criação de novos métodos de análises (Figura 4). Se o grupo concorda com que uma nova categoria seja necessária, faz uma solicitação oficial a ASTM para desenvolver ou selecionar as técnicas de ensaio necessárias. A tarefa do API é a de desenvolver a linguagem usada para comunicar ao usuário a nova categoria. Atingindo-se um consenso, o padrão final de desempenho é publicado pela SAE em seu manual anual.

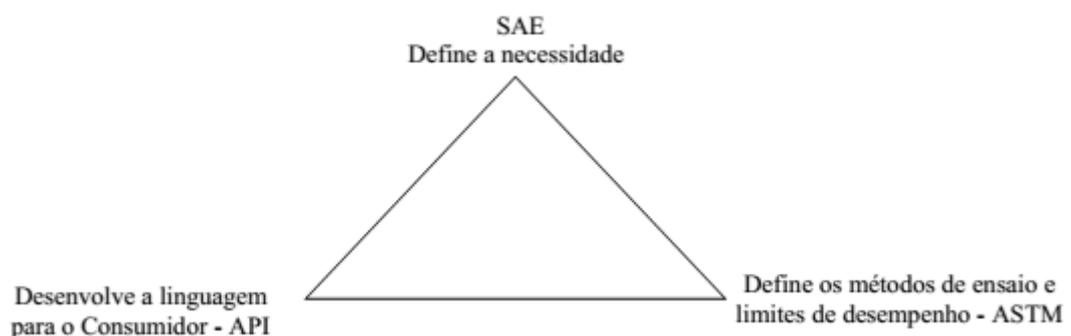


Figura 4. Distribuição de tarefas de cada unidade. Ilustra a relação entre SAE, API e ASTM, no desenvolvimento de novos produtos.

Fonte: Runge et al. (1994).

2.6.1 Classificação API

Desenvolvida pelo Instituto Americano do Petróleo dos Estados Unidos, baseia-se em níveis de desempenho dos óleos lubrificantes, isto é, no tipo de serviço a que a máquina estará sujeita. São classificados por duas letras, a primeira indica basicamente o tipo de combustível do motor e a segunda o tipo de serviço. Para motores de veículos leves (Ciclo Otto) o “S” de *Service Station* (Postos de Serviço, Garagem) ou *Spark* (Faísca / Centelha), e a outra letra define o desempenho (POSSAMAI, 2011).

A letra “C” seguida de outra letra (por exemplo CF) refere-se a óleo adequado para motores diesel. Segundo a API, “C” é uma categoria para uso comercial (*commercial*). Por coincidência, a letra “C” representa “Compression Ignition” (ignição por compressão), que é a forma de ignição dos motores diesel (TEXACO, 2005). A segunda letra também é atribuída alfabeticamente na ordem de desenvolvimento (desempenho), sendo assim um óleo API de classificação CC oferece menos proteção ao motor do que um de classificação API CF (LUBRIFICANTES, 2007).

É importante ressaltar que a resolução da ANP nº 10/2007 estabelece que o nível de desempenho mínimo a ser comercializado no Brasil é o CF, e também, que a API já considera como obsoletos os níveis de CA a CG.

2.6.2 Classificação SAE

Conforme Paulino (2009), a classificação SAE foi estabelecida pela Sociedade dos Engenheiros Automotivos dos Estados Unidos, onde classifica os óleos lubrificantes pela sua viscosidade, que é indicada por um número. Quanto maior este número, mais viscosos são os lubrificantes, que são divididos em três categorias:

Óleos de Verão: SAE 20, 30, 40, 50, 60

Óleos de Inverno: SAE 0W, 5W, 10W, 15W, 20W, 25W

Óleos multiviscosos (inverno e verão): SAE 20W-40, 20W-50, 15W-50

Obs.: a letra “W” vem do inglês “winter” que significa inverno.

A atual classificação SAE pode ser visualizada na Tabela 3.

Tabela 3. Classificação SAE para óleos de motor

Grau SAE	Partida a baixa Temperatura Viscosidade, cP Máx. (2)	Temperatura Limite de Bombeio Viscosidade, cP Máx. (sem tensão de escoamento) (3)	Viscosidade cSt a 100°C (4)		Viscosidade HTHS cP, a 150°C e 10 ⁶ S ⁻¹ (5)
			Mín.	Máx.	Mín.
0W	6200 a -35	60.000 a -40	3,8	-	-
5W	6600 a -30	60.000 a -35	3,8	-	-
10W	7000 a -25	60.000 a -30	4,1	-	-
15W	7000 a -20	60.000 a -25	5,6	-	-
20W	9500 a -15	60.000 a -20	5,6	-	-
25W	13000 a -10	60.000 a -15	9,3	-	-
20	-	-	5,6	< 9,3	2,6
30	-	-	9,3	< 12,5	2,9
40	-	-	12,5	< 16,3	2,9 (0W/40, 5W/40, 10W/40)
40	-	-	12,5	< 16,3	3,7 (15W/40, 20W/40, 25W/40)
50	-	-	16,3	< 21,9	3,7
60	-	-	21,9	< 26,1	3,7

Notas:

- (1) W = Winter (Inverno);
 (2) Medida no simulador de partida a frio (ASTM D5293);
 (3) Medida no viscosímetro rotativo (ASTM D 4684);
 (4) ASTM D445;
 (5) ASTM D 4683, CEC L-36-A-90 (ASTM D4741);
 HTHS = Alta temperatura/Alta taxa de cisalhamento;
Fonte: ANP (2013).

2.7 Valores de referência para troca de óleo lubrificante de motor

A Tabela 4 mostra os valores limites para os elementos de desgaste, contaminação, aditivos e das condições do óleo. Alguns fabricantes de motores fazem recomendações específicas quanto aos valores máximos toleráveis. A identificação de contaminantes metálicos frequentemente fornece indícios para a correção de condições prejudiciais a uma máquina. Ao se interpretar resultados de análises destes metais, deve-se subtrair do resultado o teor de metal originalmente presente no lubrificante novo.

Tabela 4. Valores limites para elementos de desgaste, contaminação, aditivos e condições do óleo lubrificante de motor

Parâmetro	Unidade	Valores limites por tipo de motor							
		Ciclo Diesel ¹	Ciclo Otto ¹	Ciclo Otto ²	Ciclo Otto ³	Ciclo Diesel ⁴	Ciclo Diesel ⁵	Gás Otto ⁶	Gás Otto ⁷
Desgaste									
Prata	ppm	06	-	-	1	-	1-3	1	-
Cromo	ppm	40	40	-	3-16	-	4-28	2-8	5
Cobre	ppm	40	40	-	15-45	50	25-60	6-20	15
Ferro	ppm	100	100	-	90-200	100	80-180	10-40	21
Molibdênio	ppm	-	-	-	+4 ou -16 óleo novo	-	4-20	3-8	5
Níquel	ppm	-	-	-	1-4	-	1-3	2	3
Chumbo	ppm	-	100	-	15-500	-	10-30	3-9	20
Estanho	ppm	-	-	-	8-15	-	12-24	2-10	-
Titânio	ppm	-	-	-	1	-	1-3	1	-
Contaminação									
Alumínio	ppm	40	40	-	10-120	-	12-55	8-28	10
Potássio	ppm	50	50	-	-	-	2-30	25	25
Sódio	ppm	-	-	-	-	-	5-30	Óleo novo +25	Óleo novo +25
Silício	ppm	20	20	-	-	-	15-30	4-7	4-7
Água	% m	0,2	-	0,3	-	0,2	-	0,2	0,2
Glicol	ppm	-	-	-	-	-	-	500	500
Aditivação									
Boro	ppm	20	20	-	-	-	10-500	± 20% óleo novo	± 20% óleo novo
Bário	ppm	-	-	-	-	-	2-20	± 20% óleo novo	± 20% óleo novo
Cálcio	ppm	-	-	-	-	-	600-5000	± 20% óleo novo	± 20% óleo novo
Magnésio	ppm	-	-	-	-	-	100-1500	± 20% óleo novo	± 20% óleo novo
Fósforo	ppm	-	-	-	-	-	600-2000	± 20% óleo novo	± 20% óleo novo
Zinco	ppm	-	-	-	+25 a-90 óleo novo	-	2000	± 20% óleo novo	± 20% óleo novo
Condição do óleo									
Oxidação	A/cm	-	-	-	-	-	-	20	20
Nitratos	A/cm	-	-	-	-	-	-	20	20
Sulfatos	A/cm	-	-	-	-	-	-	36	25
Viscosidade a 100°C	cSt	>12,5 e <16,3	>12,5 e <16,3	-	-	-20% óleo novo	-	min. 12 máx. 18	min. 12 máx. 18
TBN	mg KOH/g	>50% óleo novo e >2	>50% óleo novo e >2	>50% óleo novo	-	>50% óleo novo	-	>50% óleo novo e >2	>50% óleo novo e >2

FONTE: ¹[Marshall E. R. (1993) e Runge et al. (1994) apud Guimarães (2006)]; ²[Kimura (2010)]; ³[Oelcheck (2001)]; ⁴[Nédic et al. (2009)]; ⁵[Oelcheck (2010)];

⁶[Oelcheck (1999)]; ⁷[Naegele et al. (2013)].

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local do experimento

O experimento foi realizado na Granja Jucélia, localizada na linha Navegantes, no município de São Miguel do Iguaçu, estado do Paraná, a 113,0 Km de Cascavel. A Granja possui área de 10,9 ha, sendo destes apenas 30% utilizados para a agricultura e unidade de produção de leitões (UPL), estando o restante em área de preservação permanente. O biogás utilizado no experimento é proveniente de uma média de 950 matrizes e 6600 leitões, onde o dejetos é transportado para 2 biodigestores (Figura 5) para o tratamento e produção do biogás.



Figura 5. Biodigestores da Granja Jucélia – São Miguel do Iguaçu-PR.

3.2 Grupo gerador, filtros de biogás e quadro de comando

O grupo gerador (Figura 6) é fabricado pelo Grupo Fockink, sendo composto por um motor Ottolizado fabricado pela MTU do Brasil Ltda. (Mercedes-Benz), Modelo OM447, 6 cilindros, com potência de 160 cv, e gerador fabricado pela WEG, modelo GTA251ALHD com potência de 139 kVA a 1800 RPM, tensão 220 V, Corrente 292 A, frequência 60 Hz e $\cos \phi$ 0,8. O consumo médio do motor é de $60\text{m}^3\text{h}^{-1}$ de biogás a plena carga. O volume de lubrificante no cárter mais filtro é de 28,5 L.



Figura 6. Grupo gerador fabricado pela Fockink.

O biogás utilizado é previamente filtrado para reduzir as concentrações de gás carbônico, o gás sulfídrico, dióxido de enxofre, vapores de água e remoção de impurezas. Os filtros (Figura 7) também são fabricados pelo Grupo Fockink, e são preenchidos por limalha. A passagem do biogás pelos filtros é contínua, não ocorrendo regeneração da limalha de ferro. Há drenos de água na parte inferior destes filtros, que devem ser drenados diariamente.



Figura 7. Filtros para biogás ligados em série antes da entrada na admissão do grupo gerador.

O quadro de comando (Figura 8) é composto de 01 (um) módulo disposto ao lado do grupo gerador, e tem a função de supervisionar a tensão, corrente e frequência (Figura 9), conexão da carga ao grupo gerador, contadores e serviço (horímetro) e alarmes para manutenção. A finalidade do quadro de comando é supervisionar o sistema de corrente alternada composto pela fonte principal (rede) e uma fonte de emergência (grupo gerador), que alimentam cargas consideradas essenciais e que não podem sofrer interrupções do seu funcionamento por intervalos de tempo prolongados. As especificações do quadro de comando estão descritas na Tabela 5.



Figura 8. Quadro de comando do grupo gerador.



Figura 9. Tela principal do quadro de comando do grupo gerador.

Tabela 5. Especificações do quadro de comando do grupo gerador

Quadro de comando	
Fabricante	Fockink Industrias Eléctricas LTDA.
Número de série	GNF 56992/ OS 1243477
Número do projeto	PE-B56992QC1.1
Data de fabricação	08/2012
Norma de referência	IEC 60439-1
Frequência nominal	60 Hz
Tensão nominal de operação (Ue)	3 ~ 220V
Tensão nominal dos circuitos de controle	220Vca
Tensão nominal dos circuitos auxiliares	220Vca
Tensão nominal de isolamento (Ui)	0,6kV
Corrente nominal de operação (In)	400A
Corrente suportável de curto-circuito (1s) (Icw)	6kA
Corrente suportável nominal de crista (Ipk)	9kA
Esquema de aterramento	TN-C-S
Grau de proteção	IP 42
Forma de separação interna	FORMA 1

Fonte: plaqueta afixada no quadro de comando.

O grupo gerador foi instalado inicialmente com o intuito de atender a demanda de energia emergencial da propriedade, devido a interrupções da rede da concessionária por longos períodos, que afeta intensamente as atividades desenvolvidas, principalmente fornecimento de água e a produção de ração. No entanto, como a produção de biogás é elevada, o grupo gerador é utilizado no fornecimento de energia, reduzindo os gastos com energia elétrica e auxiliando na breve amortização do investimento. O tempo de utilização diária é de aproximadamente 10 horas, perfazendo uma média de 300 horas de funcionamento mensal.

3.3 Lubrificante utilizado

O lubrificante utilizado no experimento é fabricado pela Petrobrás, modelo Extra Turbo 15w40 (Figura 10), que atende aos níveis de desempenho API CG-4/SJ, ACEA E2-96/B2-98/B3-98/B4-02, VOLVO VDS e MACK EO-K/2 e MB 228.1. A recomendação tanto do Grupo Fockink, quanto da MTU para a troca do filtro e do óleo lubrificante para este motor é de 250 hM, para óleo multiviscoso SAE 15W40, que atenda no mínimo à especificação MB 228.1 ou preferencialmente à MB 228.3 - classificação API CH-4 ou

superior. Apesar do período de troca da carga de lubrificante recomendado ser de 250 hM, foi obtido autorização para prolongar este período, caso seja constatado nas análises o bom estado do lubrificante, assim verificando o número máximo de hM que o lubrificante ainda cumpre com segurança suas funções.



Figura 10. Óleo Petrobrás Lubrax Extra Turbo utilizado no presente estudo.

As análises típicas de sua composição, informada pela Petrobrás, está indicada na Tabela 6. Também é informado pela fabricante que estas análises típicas representam os valores modais da produção, não constituindo especificações.

Tabela 6. Análises típicas do óleo Petrobrás Extra Turbo 15w40

GRAU SAE		15W/40
Densidade a 20/4°C		0,8800
Ponto de Fulgor (VA)	(°C)	230
Ponto de Fluidez	(°C)	-27
Viscosidade a 40°C	(cSt)	111,9
Viscosidade a 100°C	(cSt)	15,1
Índice de Viscosidade		141
Cinzas Sulfatadas	(%peso)	1,05
Índice de Basicidade Total (TBN)	(mgKOH/g)	9,0

Fonte: Embalagem do lubrificante.

3.4 Procedimento de coleta e análise do óleo lubrificante

A análise do teor de contaminação do óleo lubrificante, segundo Peterson et al. (1999), fornece uma excelente indicação das condições internas do motor. As análises de óleo lubrificante foram realizadas para verificar a composição, as propriedades fluídas (degradação), as concentrações de contaminantes e os resíduos de desgaste do motor.

A recomendação do fabricante (MTU) para troca da carga de lubrificante do motor do presente estudo é de 250 hM, valor também recomendado para a operação do mesmo motor com óleo diesel. Segundo Mannarino (2005), o gás natural, quando utilizado em automóveis, ônibus e caminhões recebe o nome de gás natural veicular (GNV) e oferece vantagem no custo por quilômetro rodado. Como é seco, não provoca resíduos de carbono nas partes internas do motor, aumentando sua vida útil e o intervalo de troca de óleo, reduzindo significativamente os custos de manutenção. Devido aos benefícios já constatados da utilização do GNV, como também que o biogás é um combustível praticamente seco, foi proposto verificar a possibilidade de extensão do período de troca da carga de lubrificante quando da utilização do biogás, estabelecendo coletas a cada 75hM até 375 hM para a 1ª repetição.

A escolha por períodos de 75 hM entre coletas foi motivada devido a necessidade de identificar qualquer deterioração apresentada pelo lubrificante, que poderia ser prejudicada com maiores intervalos de amostragem. Este período estabelece uma tendência de vários parâmetros importantes do desempenho do óleo, principalmente viscosidade, TBN, oxidação, nitratos e sulfatos.

O resultado da primeira análise indicou que o óleo, apesar das elevadas concentrações de Fe e Cu, ainda poderia ser utilizado. O aumento da concentração de Fe juntamente com a elevação da concentração de Pb deve ser rigorosamente analisada, pois significa o desgaste de ligas metálicas, sinal de desgaste severo no motor. No entanto a elevação da quantidade de Pb não ocorreu na mesma proporção, sendo assim definido como período limite para troca do lubrificante 525 hM, para a 2ª repetição, valor este 40% maior que da 1ª repetição, escolhido com o intuito de traçar gráficos com o comportamento e valores limites dos itens presentes nas análises de lubrificante quando da utilização do biogás.

A segunda repetição ocorreu até as 300 hM, pois logo após esta coleta o motor teve um grande vazamento, sendo que grande parte do óleo foi perdida. Também devido a algumas anomalias no motor, foi realizada uma manutenção profunda e limpeza interna, sendo carregado o cárter com lubrificante novo, iniciando na sequência a 3ª repetição. Os resultados da análise da 2ª repetição demonstraram que o TBN já nas 225 hM estava abaixo da

especificação recomendada, como também a quantidade de Magnésio que estava com percentual de variação acima do preconizado pela bibliografia. Mesmo assim manteve-se a condição de 525 hM pois o motor estava defeituoso e sofreu uma grande intervenção, fatores estes que podem ter contribuído para os valores da 2° repetição mas podem não inferir nos da 3° repetição.

A coleta dos dados da 3° repetição ocorreu até as 525 hM, e quando da análise destes dados se constatou uma boa condição do óleo e menores concentrações de Cu e Fe. No entanto, a taxa de crescimento do Cu e Mg após as 375 hM é mais elevada que nas hM inferiores, significando em um desgaste mais acentuado do motor após este período de utilização. Os valores limites especificados pela bibliografia são atingidos pelo Cu nas 375 hM e 450 hM para o Mg. Mesmo o óleo já ter atingido sua recomendação de troca nas 375 hM,, definiu-se para a 4° repetição o período de máximo de 600 hM, devido ao mesmo intuito de conhecer e validar os valores limites expostos na 2° repetição

Para efetuar uma coleta segura e sem riscos de contaminação, adquiriu-se uma bomba de coleta de lubrificante a vácuo (Figura 11). Sua função é gerar vácuo manualmente na parte interna do frasco, fazendo com que o óleo saia do compartimento do motor através de uma mangueira e vá direto para o frasco de coleta, diminuindo assim os riscos de contaminação externa da amostra.



Figura 11. Bomba de coleta de lubrificante a vácuo, inserida na haste da vareta de lubrificante para a obtenção das amostras.

As análises foram realizadas por um laboratório terceirizado. Como parte integrante de cada análise, foram recebidos kits (Figura 12) para a extração das amostras, contendo um recipiente com código numérico para a coleta de 100 ml de lubrificante, 1,5 m de tubo de PVC e uma ficha de identificação. Os materiais eram esterilizados, isentos de poeiras e umidade, garantindo a confiabilidade das amostras coletadas. Tanto o tubo quanto o frasco

plástico eram utilizados uma única vez, ou seja, em somente um equipamento. Usar o mesmo tubo em diversos equipamentos pode acarretar em imprecisão nos resultados, pois partículas acumuladas de um equipamento podem interferir na medição de outro.



Figura 12. Kit de coleta de lubrificante, fornecido pelo laboratório terceirizado.

Para a coleta, o motor foi colocado em operação até que fosse atingida a temperatura de trabalho e o óleo lubrificante fosse homogeneizado. Estas amostras foram coletadas com o lubrificante em temperatura de funcionamento normal do motor, ou no mínimo trinta minutos de trabalho contínuo. A coleta foi realizada através da inserção da mangueira na haste de verificação do nível de lubrificante, a meia profundidade, evitando sugar as impurezas presentes na superfície do lubrificante ou no fundo do cárter, contrariando assim o problema da decantação do lubrificante e da acumulação no fundo, como também succionar borras. Foi inserido o tubo com o comprimento da vareta de óleo, após o óleo foi succionado através da bomba manual, e finalmente o recipiente foi lacrado e a ficha de identificação da amostra preenchida. Após a realização de cada repetição as amostras foram enviadas para análise laboratorial. A mesma quantidade de óleo lubrificante retirado do motor foi repostada com óleo sem uso (novo) após cada amostragem.

O início do experimento ocorreu com a substituição do óleo e filtro lubrificante.

3.4.1 Análises realizadas no óleo lubrificante

O escopo das análises de óleo lubrificante foi:

- Teor de água pelo método de Karl Fischer;
- Estudo morfológico de partículas através da macroscopia;
- Viscosidade Cinemática a 100°C (NBR 10441/ ASTM D445);
- Espectrometria por infravermelho (ASTM E 2412-04). Foram identificados a oxidação, glicol, teor de fuligem, nitratos e sulfatos;
- Índice de basicidade total – TBN (ASTM D4739);
- Espectrometria de emissão ótica a plasma (ASTM D5185). Foram identificados 19 elementos químicos: Ag, Cr, Cu, Fe, Mo, Ni, Pb, Sn, Ti, Al, K, Na, Si, B, Ba, Ca, Mg, P, Zn).

3.5 Procedimentos de coleta e análise do biogás

As amostras do biogás foram coletadas juntamente com as de óleo lubrificante. A coleta era realizada na admissão do motor, antes do mesclador ar/combustível, com a utilização de uma bolsa amostradora (Figura 13).



Figura 13. Bolsa amostradora utilizada para a coleta de biogás.

A análise com o kit de análise de biogás (Figura 14), desenvolvido através de parceria da Embrapa Suínos e Aves com a empresa Alfakit, através da metodologia de Kunz, Oliveira e Piccinin (2007), resultou em dados quantitativos e qualitativos da composição do biogás, tanto para a análise de amônia quanto para de gás sulfídrico, a técnica consiste em borbulhar o biogás em uma solução, analisando-a colorimetricamente em seguida. Já para a análise de

metano e gás carbônico, o biogás também é borbulhado em uma solução, no entanto a concentração é dada pela diferença entre o volume de gás inicial e final. Todas as análises foram realizadas com 3 repetições.



Figura 14. Kit de análise de biogás Alfakit – Embrapa utilizado no experimento.
Fonte: Alfakit (2011).

As determinações de gás carbônico e metano foram realizadas por um mini analisador tipo Orsat. As análises colorimétricas de amônia e gás sulfídrico utilizam um sistema de comparação visual com cartela de cores. As metodologias utilizadas no kit foram adaptadas, sendo a determinação de amônia realizada pelo método “Azul de Indofenol”, e o gás sulfídrico pelo método do “Azul de Metileno” (ALFAKIT, 2011).

Conforme o manual Alfakit (2011), a faixa de análise dos parâmetros são:

- Amônia: Faixa 1: 15 - 525 ppmV / Faixa 2: 45 - 1310 ppmV.
- Gás Sulfídrico: Faixa 1: 20 - 610 ppmV / Faixa 2: 30 - 1020 ppmV.
- Gás Carbônico: 0 - 100 %, resolução 2,5%.

3.6 Comparação dos resultados com as características do lubrificante sem uso

Através da análise exploratória dos dados, foram comparados os resultados das análises de biogás e do óleo lubrificante, buscando correlação entre a quantidade de contaminantes presentes no biogás e a absorção pelo óleo lubrificante, principalmente o o gás sulfídrico. Foi avaliada a degradação do óleo lubrificante, comparando as amostras das 4 repetições com as amostras de óleo sem uso (novo) e com a literatura. Foi analisada a

necessidade de reduzir o período de troca de lubrificante ou a possibilidade de extensão destes períodos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

1.1.1. Análises de contaminação e desgaste do óleo lubrificante

Foi constatado que, a partir da análise dos dados da 3^o repetição, os valores de viscosidade, TBN e aditivos apresentaram diferença, mesmo sendo a mesma marca, modelo e especificação de óleo. Na 4^o repetição foi enviada uma amostra de óleo sem uso (novo) para análise, confirmando a diferença na composição. Assim, nas análises a seguir, as 1^o e 2^o repetições fazem parte do mesmo lote de lubrificante, denominado primeiro lote, e as 3^o e 4^o repetições são de outro, denominado segundo lote. Na embalagem do lubrificante, juntamente com os dados descritos na Tabela 6, está informado que as análises típicas representam os valores modais da produção, não constituindo especificações, explicando assim que a formulação pode alterar de lote para lote, no entanto o óleo mantém suas características de classificação e desempenho.

Os dados resultantes das análises de lubrificante realizadas pelo laboratório terceirizado podem ser visualizados na Tabela 7. Na sequência serão apresentados os gráficos, resultados, confrontação com a literatura e comentários das amostras analisadas.

Tabela 7. Resultados das amostras de óleo lubrificante analisadas

hMóleo	AMOSTRAS				DESGASTE (ppm)									CONTAMINAÇÃO (ppm)			
	Repetição	Coleta	Análise	Horímetro	Prata	Cromo	Cobre	Ferro	Molibdênio	Níquel	Chumbo	Estanho	Titânio	Alumínio	Potássio	Sódio	Silício
0	Óleo Novo	26/04/2013	10/06/2013	-	3	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	7
75	1º Repetição	26/04/2013	10/06/2013	1314	2	0	72	17	0	1	3	5	0	4	0	0	4
150	1º Repetição	09/05/2013	10/06/2013	1399	1	0	94	48	1	1	5	7	0	7	0	0	4
225	1º Repetição	16/05/2013	10/06/2013	1450	1	0	100	59	1	1	5	8	0	8	0	0	4
300	1º Repetição	24/05/2013	10/06/2013	1528	0	0	114	67	1	1	6	9	0	8	0	0	4
375	1º Repetição	31/05/2013	10/06/2013	1617	0	0	138	72	1	1	7	10	0	9	0	0	4
75	2º Repetição	18/06/2013	15/07/2013	1710	4	0	99	50	1	1	3	2	0	5	0	0	3
150	2º Repetição	20/06/2013	15/07/2013	1754	1	0	103	50	1	1	3	3	0	5	0	0	3
225	2º Repetição	28/06/2013	15/07/2013	1839	0	0	105	66	1	1	3	3	0	6	0	0	4
300	2º Repetição	05/07/2013	15/07/2013	1903	0	0	107	72	1	1	4	4	0	6	0	0	4
0	Óleo Novo	28/10/2013	08/11/2013	-	0	0	0	1	1	0	0	0	0	3	0	0	7
75	3º Repetição	18/07/2013	13/09/2013	2054	2	0	22	7	1	0	2	1	0	4	0	0	2
150	3º Repetição	25/07/2013	13/09/2013	2194	2	0	34	10	1	1	2	2	0	4	0	0	2
225	3º Repetição	01/08/2013	13/09/2013	2282	1	0	42	14	1	1	2	3	0	5	0	0	2
300	3º Repetição	08/08/2013	13/09/2013	2387	0	0	47	15	1	1	2	3	0	5	0	0	3
375	3º Repetição	21/08/2013	13/09/2013	2427	0	0	52	20	1	1	2	3	0	6	0	0	3
450	3º Repetição	29/08/2013	13/09/2013	2505	0	0	59	28	1	1	3	3	0	6	0	0	3
525	3º Repetição	05/09/2013	13/09/2013	2592	0	0	76	32	1	1	4	5	0	7	0	0	3
75	4º Repetição	13/09/2013	08/11/2013	2670	0	0	12	6	1	0	1	0	0	3	0	0	2
150	4º Repetição	23/09/2013	08/11/2013	2730	0	0	18	10	1	0	1	0	0	3	0	0	2
225	4º Repetição	02/10/2013	08/11/2013	2825	0	0	23	15	1	0	2	0	0	4	0	0	2
300	4º Repetição	09/10/2013	08/11/2013	2916	2	0	32	20	1	1	2	1	0	4	0	0	2
375	4º Repetição	14/10/2013	08/11/2013	2984	0	0	36	20	1	1	2	2	0	4	0	0	3
450	4º Repetição	18/10/2013	08/11/2013	3051	0	0	53	23	1	1	3	3	0	4	0	0	2
525	4º Repetição	24/10/2013	08/11/2013	3132	0	0	80	27	1	1	5	6	0	5	0	0	3
600	4º Repetição	27/10/2013	08/11/2013	3202	0	0	103	29	1	1	6	8	0	5	0	0	3

Tabela 7. Continuação

hMóleo	Repetição	ADITIVAÇÃO (ppm)						INFRAVERMELHO					TBN	V100°C	TESTES FÍSICOS	
		Boro	Bário	Cálcio	Magnésio	Fósforo	Zinco	Oxidação	Glicol	Fuligem	Nitratos	Sulfatos	TBN (mgKOH/g)	Viscosidade 100°C (cSt)	Água (%)	Visual
0	Óleo Novo	1	0	2142	221	862	996	8	1	0,00	4	14	9,759	14,35	0	NORMAL
75	1ª Repetição	0	0	2305	241	881	1042	8	1	0,00	5	18	8,299	13,83	0	NORMAL
150	1ª Repetição	0	0	2356	244	872	1056	9	0	0,00	6	20	5,786	14,17	0	NORMAL
225	1ª Repetição	0	0	2323	241	851	1026	9	0	0,00	6	21	5,966	14,19	0	NORMAL
300	1ª Repetição	0	0	2370	251	837	1016	10	0	0,00	6	23	5,788	13,93	0	NORMAL
375	1ª Repetição	0	0	2436	257	824	1025	11	0	0,00	6	24	5,964	13,83	0	NORMAL
75	2ª Repetição	3	0	1973	352	852	1022	8	0	0,00	5	16	8,579	13,85	0	NORMAL
150	2ª Repetição	1	0	1994	387	868	1057	9	0	0,00	5	17	6,538	13,88	0	NORMAL
225	2ª Repetição	1	0	2072	382	839	1023	9	0	0,00	6	18	4,662	13,73	0	NORMAL
300	2ª Repetição	1	0	2019	372	795	988	10	0	0,00	7	20	4,949	13,70	0	NORMAL
0	Óleo Novo	1	0	1321	880	1086	1370	6	1	0,00	5	15	7,713	15,53	0	NORMAL
75	3ª Repetição	1	0	1347	958	1078	1361	8	1	0,01	8	18	6,573	14,17	0	NORMAL
150	3ª Repetição	3	0	1382	1006	1085	1331	9	1	0,01	8	19	5,258	13,80	0	NORMAL
225	3ª Repetição	1	0	1397	1014	1067	1327	9	1	0,01	8	20	5,122	13,49	0	NORMAL
300	3ª Repetição	1	0	1459	1069	1093	1378	10	1	0,01	8	21	5,366	13,65	0	NORMAL
375	3ª Repetição	0	0	1430	1049	1076	1363	10	1	0,01	8	21	5,365	13,61	0	NORMAL
450	3ª Repetição	0	0	1488	1095	1078	1399	10	1	0,01	8	23	5,132	13,59	0	NORMAL
525	3ª Repetição	0	0	1479	1081	1028	1373	11	1	0,01	8	25	5,201	13,56	0	NORMAL
75	4ª Repetição	1	0	1333	917	1054	1336	7	1	0,00	7	17	7,324	13,85	0	NORMAL
150	4ª Repetição	2	0	1342	939	1037	1324	8	1	0,00	7	19	6,772	13,30	0	NORMAL
225	4ª Repetição	3	0	1353	953	1014	1316	9	0	0,00	8	21	5,415	13,37	0,31	NORMAL
300	4ª Repetição	9	0	1380	975	992	1316	10	0	0,00	8	23	5,786	12,98	0	NORMAL
375	4ª Repetição	1	0	1370	950	990	1321	10	0	0,00	8	23	4,443	14,06	0	NORMAL
450	4ª Repetição	1	0	1446	1017	969	1363	11	0	0,00	8	25	6,697	13,65	0	NORMAL
525	4ª Repetição	1	0	1404	989	936	1312	11	0	0,00	8	26	5,106	13,40	0	NORMAL
600	4ª Repetição	0	0	1453	1013	931	1340	12	0	0,00	8	28	6,129	13,17	0	NORMAL

4.1.1 Viscosidade, TBN e análises por infravermelho

A viscosidade é a propriedade mais importante de lubrificação do óleo, pois afeta o atrito e influencia diretamente na taxa de desgaste dos componentes do motor. A variação da viscosidade em função das hM do motor está representada na Figura 15. As variações de viscosidade nas 1ª e 2ª repetições, quando comparadas à análise do óleo novo do primeiro lote foram, respectivamente, 3,62 e 4,53%. Já para a 3ª e 4ª repetição, comparadas à análise do óleo novo do segundo lote foram, respectivamente, 12,69 e 16,42%.

Segundo Snook (1968), a variação percentual da viscosidade cinemática não deve exceder 25%. Os dados apresentados por Oelcheck (1999) e Naegele et al. (2013) (Tabela 4), indicam que a viscosidade deve permanecer entre 12 e 18 cSt. Marshall (1993) recomenda que o óleo deve ser substituído quando sair do seu SAE original, ou seja, para o óleo SAE 15W40, a viscosidade a 100°C deve estar ente 12,5 e 16,3 cSt. Nédic et al. (2009) citam que a variação de viscosidade máxima é de 20% em relação ao óleo novo. Assim, todos os resultados obtidos atendem a estes requisitos, pois a maior variação foi de 16,42%, e a menor viscosidade apresentada foi de 12,98 cSt. No experimento de Nédic et al. (2009), onde foi avaliado as condições do óleo lubrificante em um motor movido a óleo Diesel, marca MTU, modelo OM 447 HLA, utilizando óleo especificação SAE 10W40 e API CF, foi observado comportamento similar da viscosidade, com decréscimo acentuado nas primeiras horas de utilização, e posterior estabilidade.

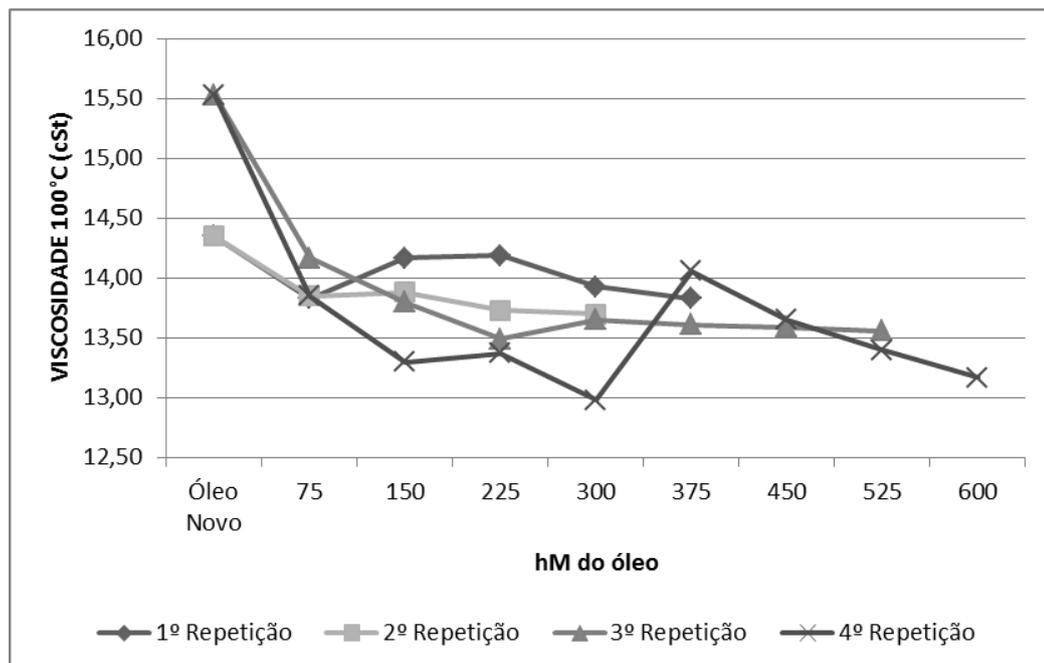


Figura 15. Variação da viscosidade cinemática a 100°C do óleo em relação ao período de horas trabalhadas.

O índice de basicidade total (TBN), além dos resíduos de desgaste (geralmente Fe e Cu) e da viscosidade, está entre os principais indicadores de estado/desempenho a serem verificados nas análises de óleo lubrificante. O TBN é a medida da reserva alcalina do lubrificante, sendo a capacidade do lubrificante na neutralização de ácidos. No biogás temos a elevada influência do gás sulfídrico, e como já citado anteriormente Caines e Haycock (1996) afirmam que uma proporção significativa dos gases produzidos na combustão vazam através dos anéis dos pistões, contaminando o óleo do cárter e causando outros efeitos adversos, assim existe a necessidade de verificar se o H₂S ou os subprodutos de sua queima chegam até o óleo lubrificante, e se atuam como agentes degradadores do TBN.

Côrrea et al. (2011) relatam que para motores a óleo Diesel o TBN não deve ficar abaixo de 2,5 mg de KOH g⁻¹. Já a literatura citada na Tabela 4 afirma que o TBN não deve ficar menor do que 50% do valor do óleo novo, com a condição deste valor ser maior que 2,0 mg de KOH g⁻¹. A maior variação no presente estudo foi de 52,53%, com o valor de 4,662 mg de KOH g⁻¹ na amostra de 225 hM da 2^o repetição com o óleo novo do primeiro lote. No entanto, na coleta de 300 hM da 2^o repetição, a amostra apresentou 4,949 mg de KOH g⁻¹, valor que corresponde a 49,29% do óleo original. Considerando somente as amostras do segundo lote, após a manutenção e limpeza do motor e períodos de troca estendidos, o menor valor na 3^o repetição foi nas 225 hM, com valor do TBN 33,59% menor que do óleo novo, embora este valor tenha se mantido estável até as 525 hM, quando o valor foi de 32,57%. O menor valor do TBN encontrado em todo o experimento foi 4,443 mg de KOH g⁻¹ nas 375 hM da 4^o repetição, representando uma variação de 42,4% em relação ao óleo novo do segundo lote, embora o valor do TBN tenha aumentado após esta coleta, apresentando nas 600 hM uma variação de 20,54% em relação ao óleo novo.

Devido a análise do TBN ser através de método titulométrico, os menores valores encontrados dentre as repetições podem ser considerados erros devido a precisão do método ou leitura dos resultados, pois nas amostras subsequentes o TBN apresenta valores maiores por diversas vezes, principalmente nas 3^o e 4^o repetições. Este comportamento de variação (acrécimo e diminuição) do TBN e da Viscosidade a 100°C também foi verificado no experimento de Naegele et al. (2013), onde a avaliação ocorreu em um motor MTU modelo MDE MB 3066 L4 movido a biogás rigorosamente filtrado (aproximadamente 0 ppmV de H₂S), no entanto, neste motor ocorreu aumento da viscosidade. Já para o experimento de Nédic et al. (2009), onde foi utilizado motor similar operando com diesel, o comportamento

do TBN foi de decréscimo constante, não ocorrendo a diminuição abrupta nas primeiras horas de utilização do óleo como ocorre no presente estudo.

Levando em consideração o menor valor obtido na 2ª repetição, o óleo deveria ser trocado nas 225 hM, no entanto, considerando a pequena diferença que ultrapassou o limite de 50% do óleo original (2,53%), o estado em que o motor se encontrava anteriormente e os resultados das 3ª e 4ª repetições, onde nas últimas coletas os valores foram, respectivamente, 32,57 e 20,54%, é possível afirmar que o óleo ainda possui capacidade de neutralizar os componentes ácidos, gerados pela combustão do biogás e resultantes da oxidação do óleo durante o seu envelhecimento, nas 600 hM. Os resultados do TBN estão representados na Figura 16.

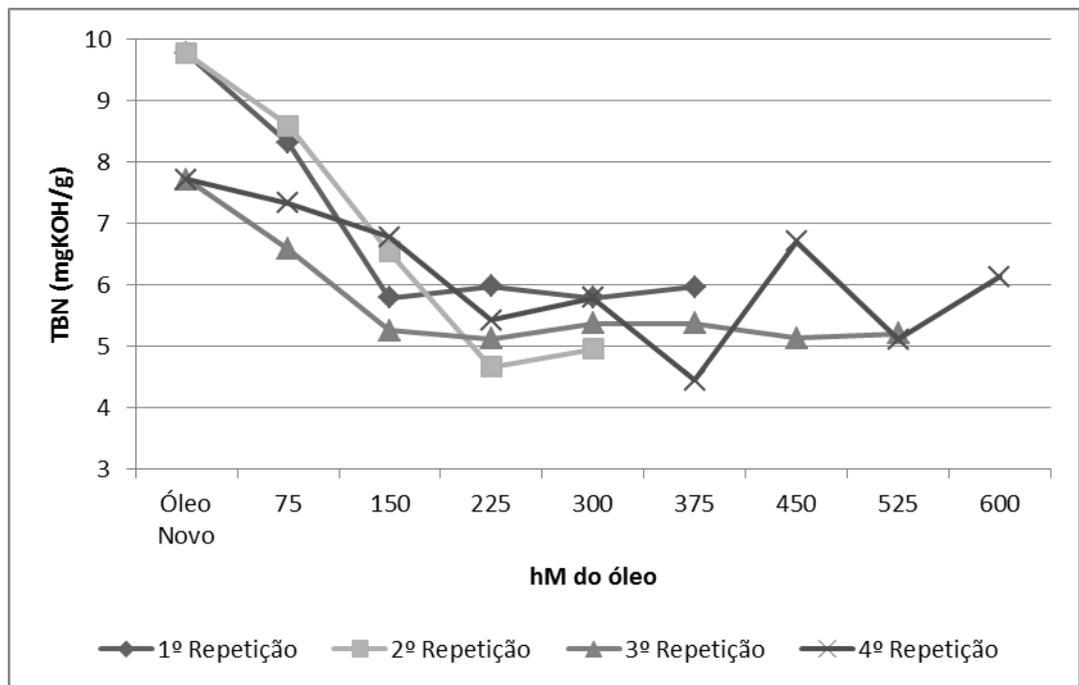


Figura 16. Variação do índice de basicidade total (TBN) do óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.

As análises de oxidação, glicol, fuligem, nitratos e sulfatos foram realizados pelo laboratório terceirizado através da espectrometria por infravermelho, que consiste em um teste onde a absorção de luz infravermelha é usada para avaliar os níveis destas substâncias. Nitratos, oxidação e sulfatos são contaminantes do processo de combustão, que atuam como redutores das propriedades de lubrificação, aumentando a viscosidade, causando a formação de depósitos e entupimento dos filtros.

Segundo a Tabela 4, o valor limite para oxidação é de 20 A/cm. Na análise da Figura 17, onde é apresentado o gráfico com os resultados da oxidação, é possível constatar que o maior valor ocorreu na 4ª repetição, apresentando 12 A/cm, estando abaixo do valor limite.

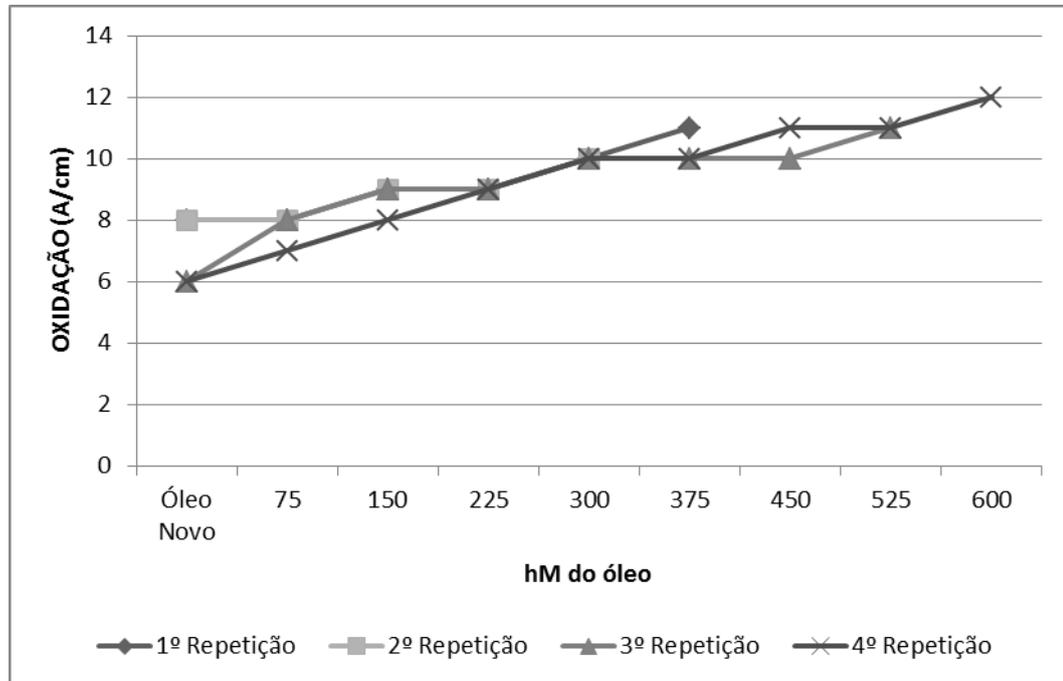


Figura 17. Variação da oxidação do óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.

A contaminação por glicol indica a ocorrência de passagem de líquido arrefecedor para o sistema de lubrificação, no entanto, considerando que as amostras de óleo novo já apresentavam valor de 1 A/cm, e que não houve incremento neste valor durante todo o experimento, não houve a passagem de líquido arrefecedor para o sistema de lubrificação.

A fuligem consiste nos produtos de combustão que entram no óleo através do sopro normal dos pistões, reduzindo a capacidade do óleo de proteger e lubrificar os componentes do motor. Segundo Marshall (1993), o valor máximo para fuligem é 1,5%. Já a apostila de lubrificação automotiva da Ipiranga (s.d.), recomenda o teor máximo de 5% para a presença de fuligem. Nas amostras analisadas, apenas na 3ª repetição foi detectada a presença de fuligem, com 0,01 A/cm, que corresponde a 2,28%, estando este nível abaixo do máximo recomendado pela apostila Ipiranga, e acima do recomendado por Marshall. Uma das justificativas para este valor constante desde as 75 hM será pela contaminação durante o abastecimento do lubrificante ou resíduos de combustão gerados no início do período amostral.

Os resultados obtidos com as análises de nitratos estão representados na Figura 18. O valor máximo apresentado no experimento foi de 8 A/cm, nas 3^o e 4^o repetições, valor aquém do limite especificado na Tabela 4, que é de 20 A/cm.

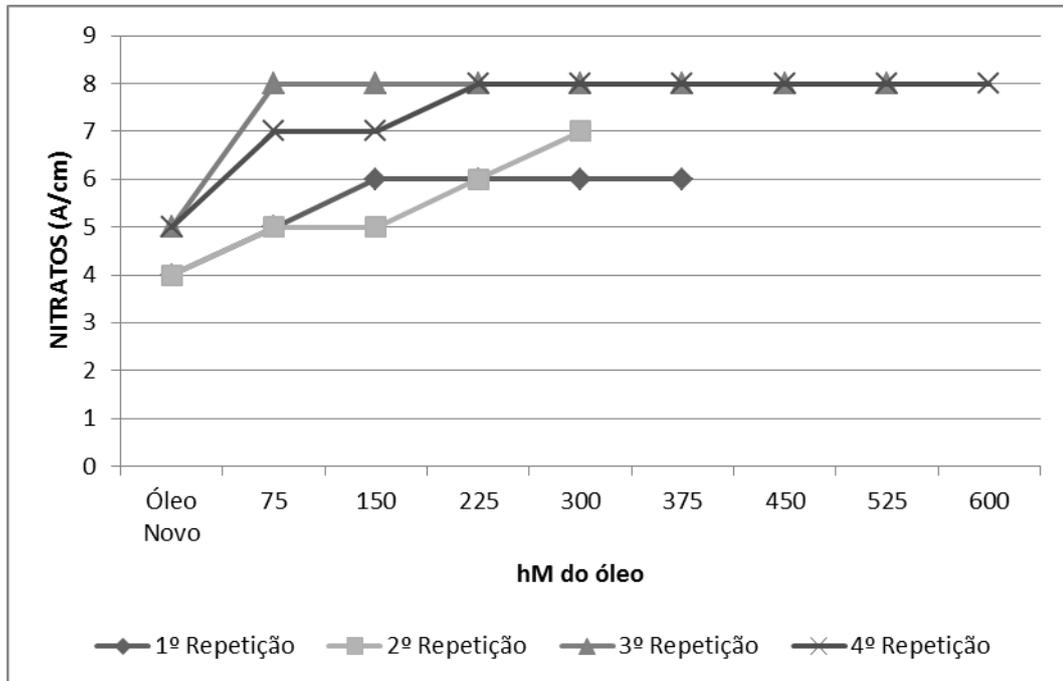


Figura 18. Variação dos nitratos do óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.

Durante a queima do óleo diesel são formados vários compostos químicos gasosos corrosivos que passam através dos anéis, entram no motor e causam a degradação do lubrificante. Os principais vilões são os compostos de enxofre que podem formar ácidos altamente corrosivos na presença de água e, quanto maior este valor, maior a contaminação. Entretanto, somente o resultado de sulfatos não é suficiente para saber as condições do lubrificante, é necessário correlacioná-lo a outro resultado importantíssimo e pouco utilizado para obter uma avaliação mais precisa. Alguns óleos lubrificantes possuem em sua formulação um tipo de aditivo chamado detergente. Este aditivo contém cálcio e magnésio, ou somente um deles. Ele acrescenta ao lubrificante uma característica “básica” que tem como uma de suas principais funções evitar a formação de compostos ácidos, principalmente aqueles formados pelo enxofre. É possível determinar a quantidade deste aditivo básico através da análise do TBN. Assim, à medida que o resultado de sulfatos aumenta, o resultado do TBN diminui, pois uma molécula do aditivo neutralizou a formação de um ácido e perdeu sua função como aditivo (OILCHECK, s.d.)

A relação sulfatos com TBN não ocorre totalmente quando da operação com biogás, pois os resultados de sulfato é constantemente crescente (Figura 19), já os de TBN decrescem rapidamente até as 225 hM, e após permanecem parcialmente estabilizados. Os maiores valores de sulfatos ocorreram na 4ª repetição, nas coletas de 525 hM com 25 A/cm, e 600hM com 28 A/cm. Oelcheck (1999) recomenda como valor máximo 36 A/cm, enquanto Naegele et al. (2013) recomenda 25 A/cm, estando assim o valor, na 4ª repetição após as 525 hM, 12% superior ao valor limite recomendado por Naegele et al. (2013), embora esteja abaixo do limite recomendado por Oelcheck (1999). No experimento de Naegele et al. (2013) foi utilizado óleo específico para motores a biogás, possuindo em sua composição inicial 0 A/cm de Sulfatos. Devido a utilização de biogás altamente filtrado (aproximadamente 0 ppmV de H₂S), não houve acréscimo de sulfatos no óleo lubrificante, mesmo com troca de lubrificante em intervalos acima de 10.000 hM.

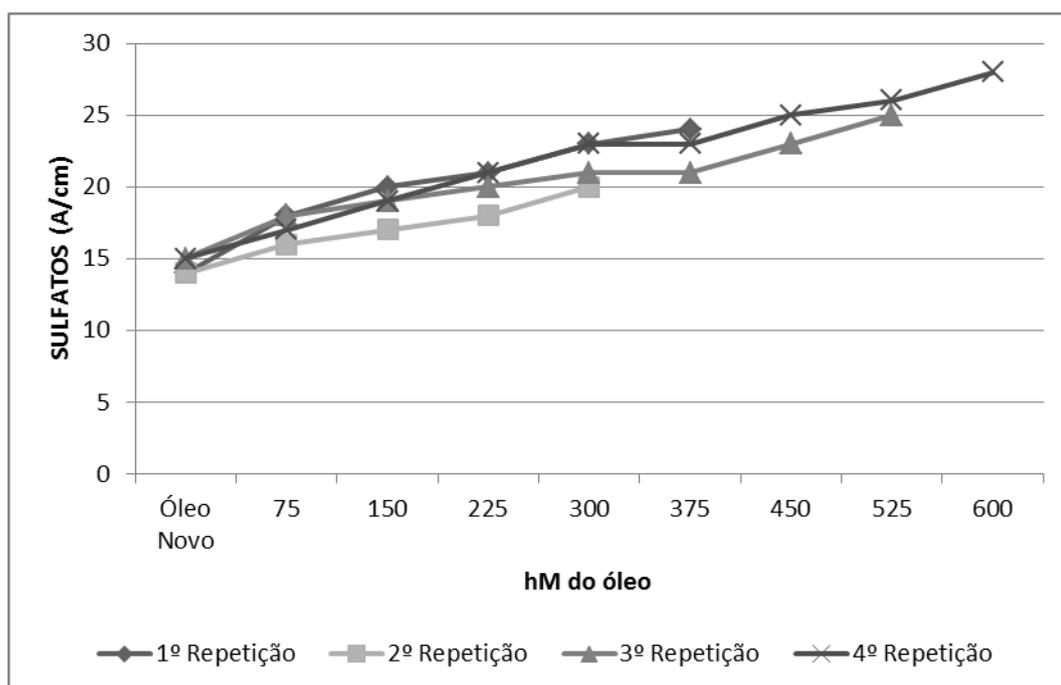


Figura 19. Variação dos sulfatos do óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.

4.1.2 Análises por espectrometria de emissão ótica a plasma

4.1.2.1 Metais indicadores de desgaste

A espectrometria não identificou a presença de cromo e titânio em nenhuma das amostras. A prata, apresentou no óleo novo do primeiro lote 3 ppm, e na 1ª repetição este

valor foi decrescendo até zerar a partir das 300 hM, evidenciando que não se tratava de metal de desgaste, pois já havia presença na amostra de óleo novo. Na 2^o repetição o maior valor ocorreu na amostra de 75 hM, apresentando 4 ppm, porém decresceu até ficar nulo após as 225 hM. Sua presença está geralmente associada ao desgaste em gaiola de rolamentos (revestimentos de prata), bomba de óleo, dentes de engrenagens, eixos e rolamentos de alguns motores convencionais, porém se é proveniente de desgaste não irá desaparecer do óleo lubrificante, demonstrando que os resultados nas amostras não são provenientes de desgaste, e podem estar ligados a precisão do aparelho utilizado, que não foi divulgado pelo laboratório terceirizado, ou também a erros operativos ou de método. Segundo Ribeiro (2005), os erros podem ser classificados em três categorias: erros instrumentais, onde são incluídas a má calibração do material e as avarias parciais do equipamento; erros operativos, onde são incluídos alguns erros dos analistas e erros de método, associados a interferências de ordem variada, à existência de reações secundárias no processo analítico.

Molibdênio e níquel apresentaram valores máximos de 1 ppm, também evidenciando desgaste não significativo.

Os resultados de cobre está representado na Figura 20 e ferro na Figura 21, onde fica evidente que nas 1^o e 2^o repetições havia algo errado no motor, e após a manutenção, os valores de ambas as substâncias foram bem menores em relação a quantidade de horas trabalhadas. Conforme Singh et al. (2006) metal cobre não é adicionado ao óleo lubrificante como aditivo, e a presença deste metal em amostras de óleos lubrificantes usados geralmente ocorre devido ao desgaste de guias de válvula, anéis de pistão, pontos de apoio, etc. Segundo a Tabela 4, os valores de cobre devem variar de 40 a 60 ppm, valor este atingido antes das 75 hM nas 1^o e 2^o repetições, e 450 hM nas 3^o e 4^o repetições. É possível constatar também que os valores de cobre na 4^o repetição foram menores que os da 3^o repetição, exceto na amostra de 525 hM, evidenciando que o motor ainda está passando por um processo de limpeza. Na Figura 20 é demonstrado um incremento da quantidade de cobre no óleo após as 375 hM, onde na 4^o repetição, das 75 hM até as 375 hM, a taxa média de crescimento foi 32,35%, enquanto das 375 hM até as 600 hM a taxa foi de 42,30%.

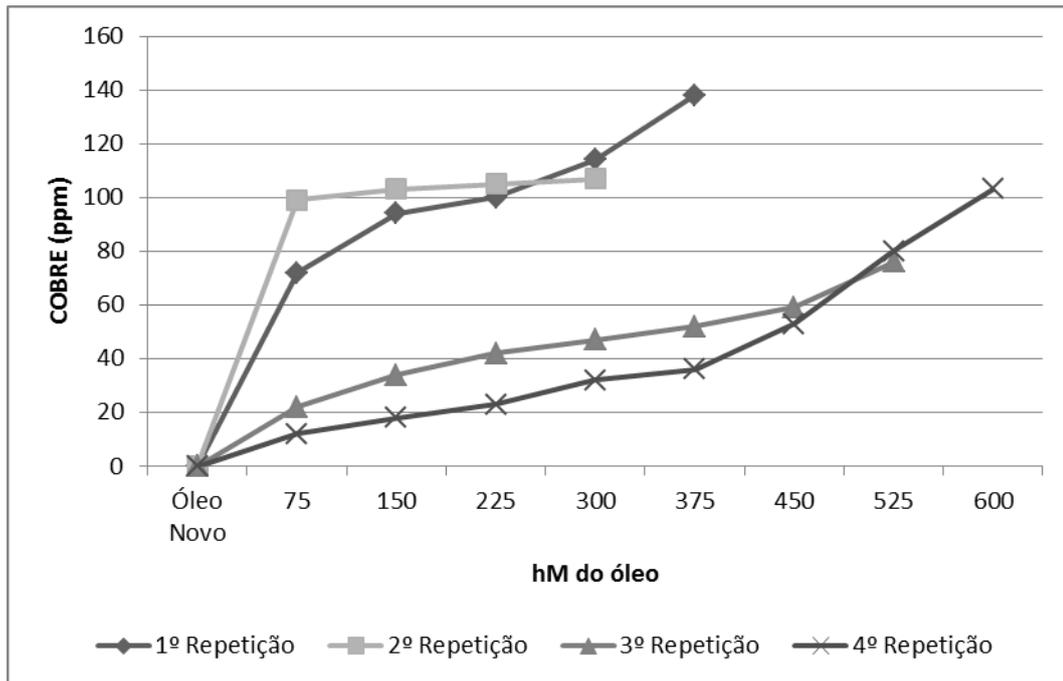


Figura 20. Variação da quantidade de cobre no óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.

As concentrações de ferro se apresentaram de maneira similar ao cobre, com valores elevados nas 1ª e 2ª repetições e bem inferiores na 3ª e 4ª repetições. Comparando com o valor limite de 100 ppm da Tabela 4, todas as amostras apresentaram resultados inferiores.

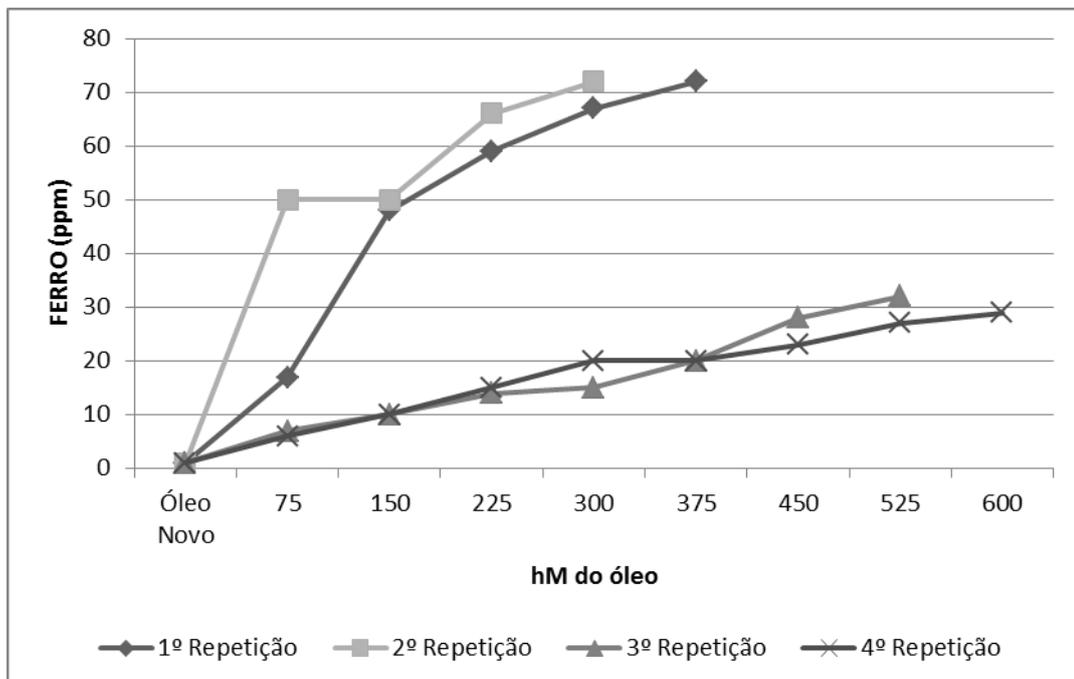


Figura 21. Variação da quantidade de ferro no óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.

Complexos orgânicos de chumbo geralmente são adicionados ao óleo lubrificante como aditivo de extrema pressão. O elemento chumbo faz parte de uma liga metálica chamada *Gun Metal*, utilizada na fabricação de mancais para veículos automotivos, cuja concentração varia de 1 a 6% em massa (SINGH et al., 2006).

Não foi detectado a presença de chumbo como aditivo no óleo novo, no entanto foi encontrado e quantificado a presença de chumbo em todas as amostras de óleo usado, devido a um possível desgaste dos pontos de apoio e mancais. O comportamento das análises de chumbo ocorreu de forma similar ao cobre, com valores elevados nas 1^o e 2^o repetições e inferiores nas demais, e com aumento significativo na concentração de chumbo após as 375 hM, onde até este horário, as amostras das 3^o e 4^o repetições apresentavam 2 ppm, e na sequência, na 3^o repetição em apenas 150 hM a concentração de chumbo aumentou 2 ppm, e na 4^o repetição, nas 225 hM subsequentes aumentou mais 4 ppm. O valor limite preconizado pelos autores da Tabela 4 é de 30 ppm, estando todos os valores das análises de chumbo (Figura 22) abaixo deste valor.

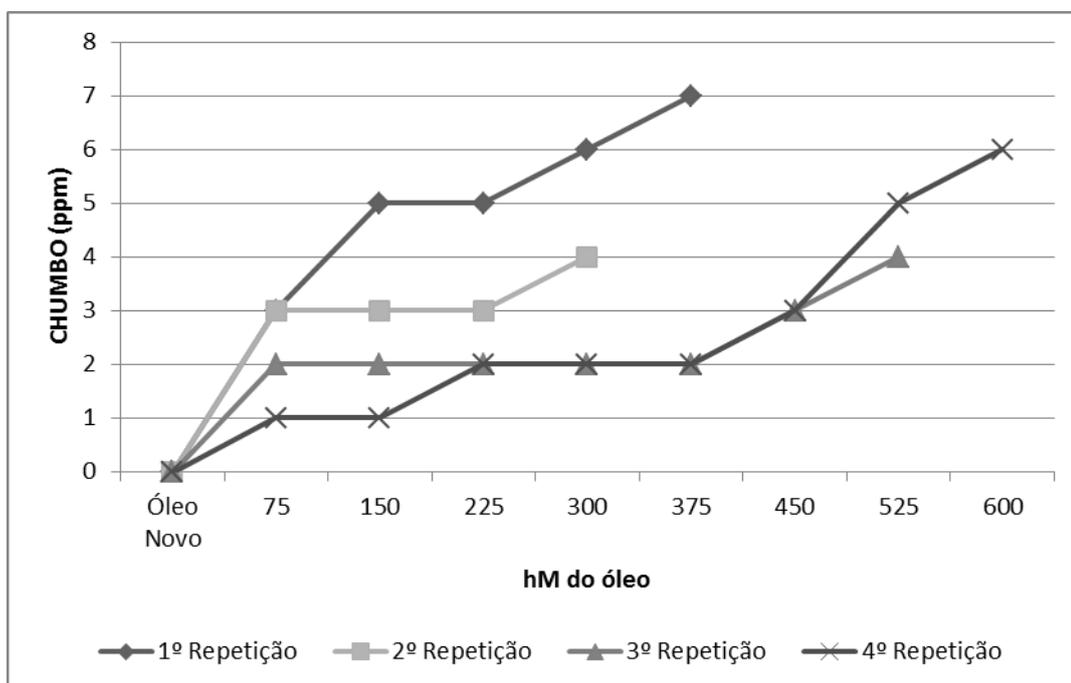


Figura 22. Variação da quantidade de chumbo no óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.

O estanho (Figura 23) também apresentou comportamento similar ao cobre e chumbo, no entanto o incremento da taxa de estanho ocorreu nas 450 hM ao invés das 375 hM nos demais. O maior valor encontrado foi de 10 ppm, e o valor limite recomendado pela Tabela 4 é 24 ppm, estando todas as amostras analisadas abaixo do limite especificado.

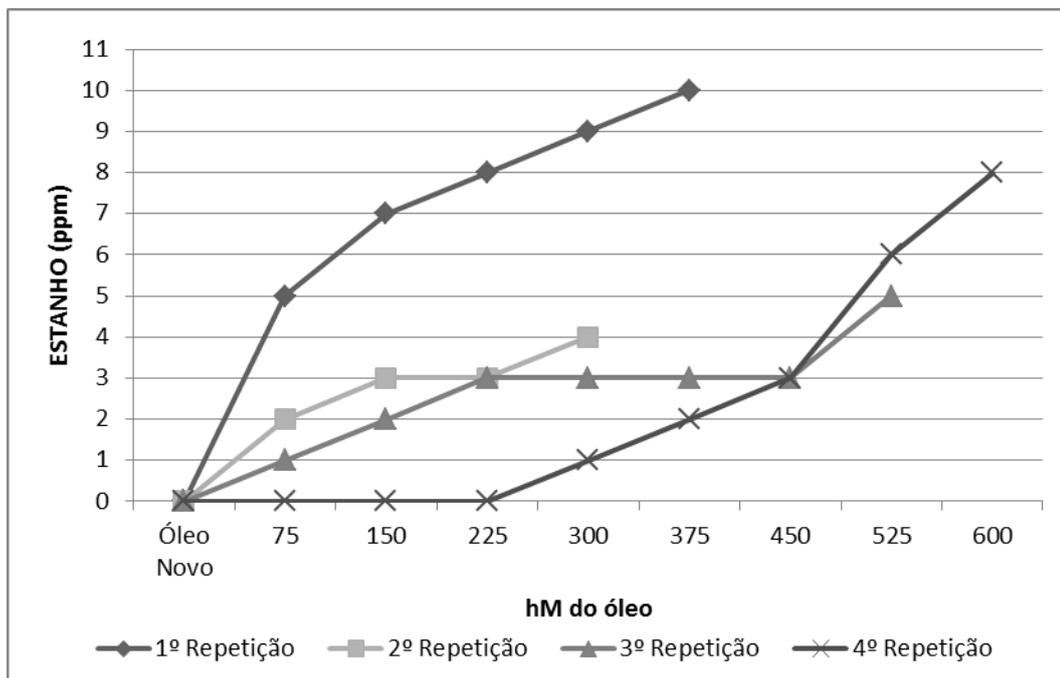


Figura 23. Variação da quantidade de estanho no óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.

4.1.2.2 Metais indicadores de contaminação

Os agentes contaminantes encontrados foram o alumínio (Figura 24) e silício (Figura 25). Em nenhuma das amostras analisadas foi detectada a presença de potássio e sódio. Os valores encontrados de alumínio e silício foram superiores na 1ª repetição, decrescendo nas demais.

O elemento alumínio não é adicionado aos lubrificantes como aditivo, portanto, sua origem na amostra de óleo lubrificante novo (2 ppm – 1º lote e 3 ppm – 2º lote) pode ser proveniente do próprio óleo utilizado ou de algum tipo de contaminação, possivelmente, adquirida durante o transporte, armazenamento ou amostragem do lubrificante. Segundo a apostila Ipiranga (s.d.), a presença de alumínio no lubrificante é proveniente de desgaste ou escariação de pistões de alumínio, desgaste de casquilhos de biela, buchas de bomba de óleo ou engrenagem de distribuição, sujidade, poeira e compostos de brunimento. O valor limite de alumínio para motor ciclo Otto e Gás Otto relacionados na Tabela 4 é 10 ppm, já para motores ciclo Diesel é 40 ppm, estando todas as amostras com valores abaixo das duas especificações.

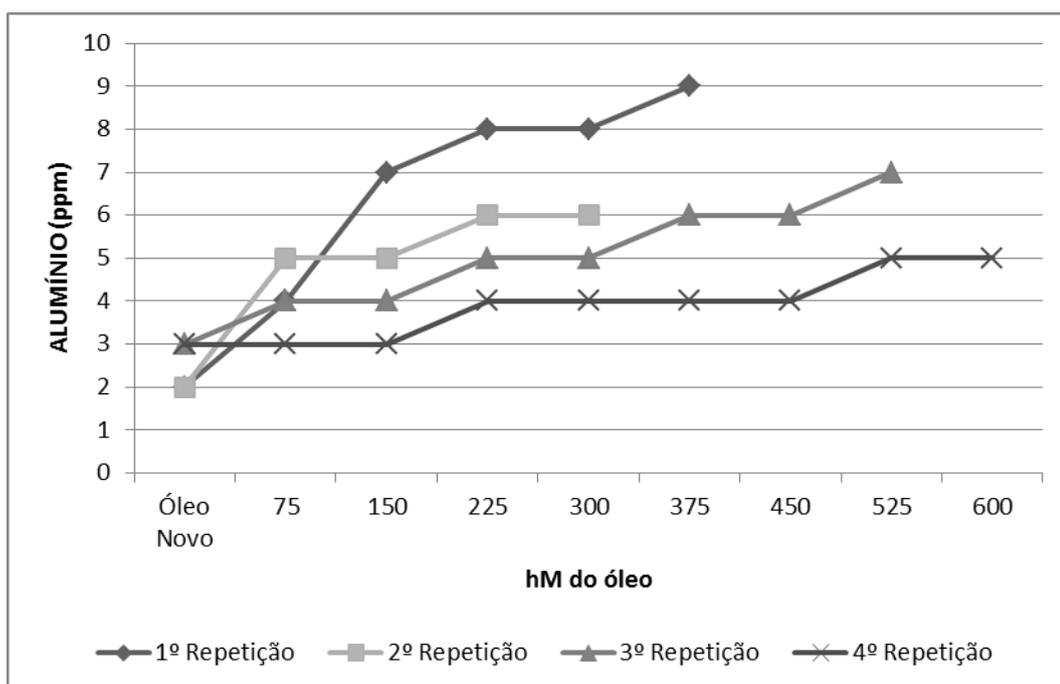


Figura 24. Variação da quantidade de alumínio no óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.

O valor limite de silício para motor ciclo Otto e Gás Otto relacionados na Tabela 4 é 7 ppm, já para motores ciclo Diesel é 20 ppm, estando todas as amostras com valores abaixo das duas especificações e as de óleo novo igual ao valor limite de 7 ppm para motores ciclo Otto e Gás Otto, devido a presença de silício na forma de aditivo anti-espumante. De acordo com Gómez Estrada (2013), este componente está frequentemente associado a poeiras absorvidas principalmente por manutenção inadequada do filtro de ar, no entanto, segundo Gasparini (1983) a presença de silício pode estar relacionada a um aditivo anti-espumante, sendo também confirmado por Roylance e Hunt (1999) apud Kimura (2010). Esta rápida diminuição da quantidade de silício nas primeiras horas de utilização do óleo também foi constatado no experimento de Naegele et al. (2013). A variação apresentada na 4ª repetição, entre as 375 hM e 525 hM pode estar relacionada a perda de 1 ppm de aditivo e ganho de 1 ppm de poeira, ou também a erro instrumental, operativo ou de método.

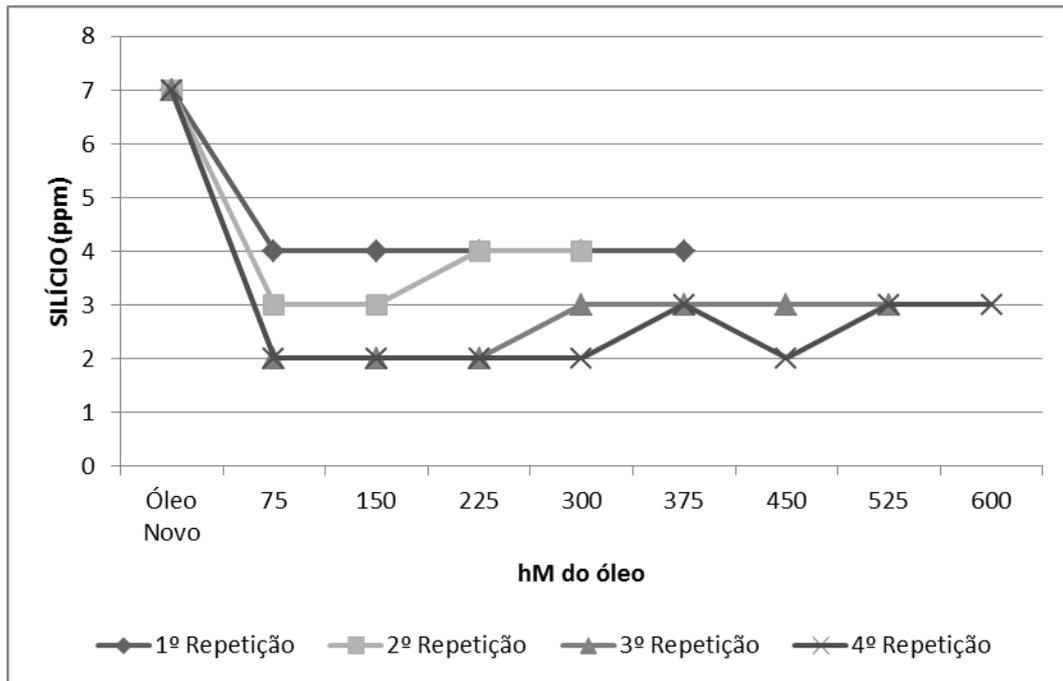


Figura 25. Variação da quantidade de silício no óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.

4.1.2.3 Aditivos

Já para os aditivos, os elementos encontrados foram o cálcio, magnésio, fósforo e zinco. Não foram encontrados traços de Bário e a quantidade de boro foi pouco significativa.

Na Figura 26 está representada a variação da concentração de cálcio no óleo lubrificante nas 1ª, 2ª, 3ª e 4ª repetições, que foram, respectivamente, 13,73, - 7,89, 12,64 e 9,99% em relação ao óleo novo. Em comparação com a variação permitida descrita na Tabela 4 ($\pm 20\%$ óleo novo), é possível afirmar que a maior a variação da concentração de Cálcio é inferior a este limite.

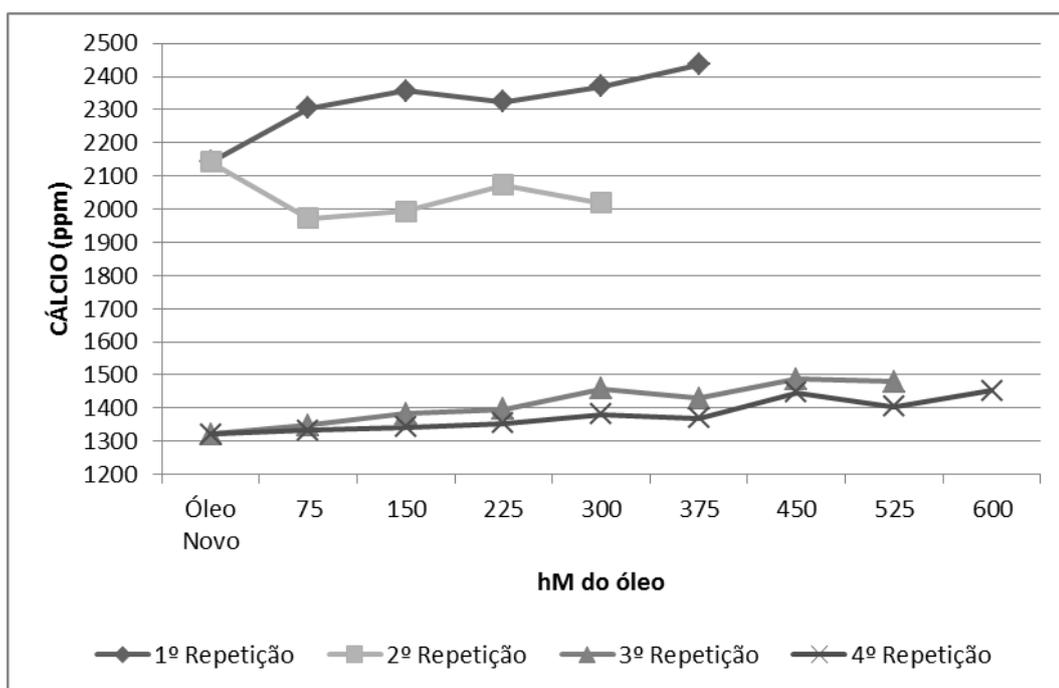


Figura 26. Variação da quantidade de cálcio no óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.

Foi verificado uma similaridade nos resultados das 3ª e 4ª repetições de cálcio, magnésio e zinco, ficando bem evidente nas 450 hM da 4ª repetição. Segundo Gómez Estrada (2013), os aditivos cálcio e magnésio podem ser afetados pelo processo de oxidação, pois são aditivos dispersantes/detergentes. São utilizados para neutralizar os ácidos formados, mantendo os contaminantes e borras em suspensão até chegar ao filtro, sem deixar que se aglomerem e se encrustem às superfícies metálicas.

Na Figura 27 está representada a variação da concentração de magnésio no óleo lubrificante nas 1ª, 2ª, 3ª e 4ª repetições, que foram, respectivamente, 16,29, 75,11, 24,43 e 15,57% maiores que o óleo novo. Em comparação a variação permitida descrita na Tabela 4 ($\pm 20\%$ óleo novo), é possível afirmar que somente os resultados das 1ª e 4ª repetições de magnésio estão abaixo do limite de utilização recomendado. Os dados da 2ª repetição podem estar comprometidos, principalmente pelas condições em que o motor se encontrava antes da manutenção, portanto devem ser desconsiderados. Já na 3ª repetição, o valor é inferior ao limite recomendado até a amostra de 375 hM, apresentando 19% de variação, assim o valor limite para substituição da carga de lubrificante devido a variação do magnésio é 375 hM.

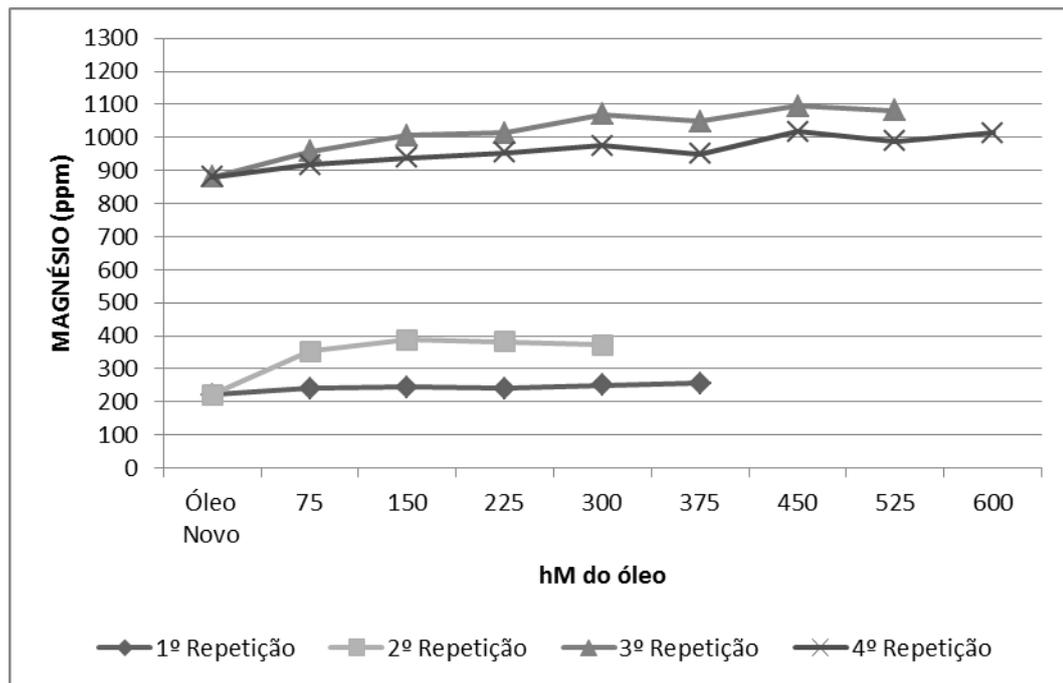


Figura 27. Variação da quantidade de magnésio no óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.

As variações da concentração de fósforo, que é um aditivo antidesgaste e antioxidante, estão representadas na Figura 28, onde as variações percentuais nas 1ª, 2ª, 3ª e 4ª repetições, foram, respectivamente, - 4,41%, -7,77%, -5,34% e -14,27%. Em comparação com a variação permitida descrita na Tabela 4 ($\pm 20\%$ óleo novo), é possível afirmar que os resultados de Fósforo estão dentro da especificação recomendada.

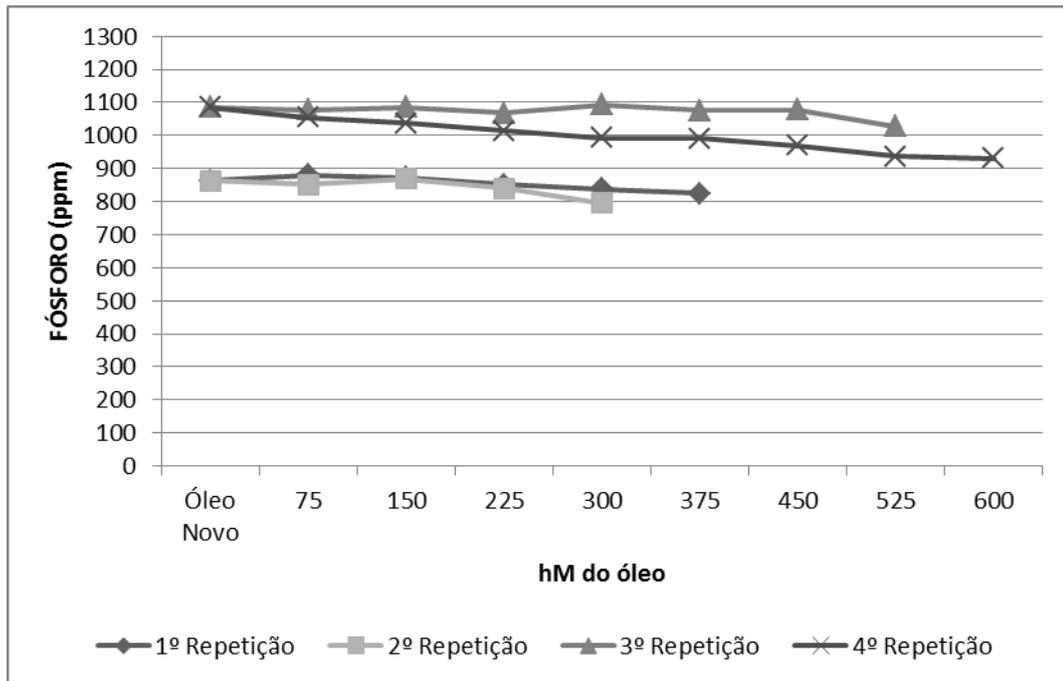


Figura 28. Variação da quantidade de fósforo no óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.

O metal zinco é adicionado ao óleo lubrificante na forma de dialquilditiofosfato de Zinco (ZnDDP) como aditivo multifuncional, desempenhando as funções antioxidante, inibidor de corrosão, antidesgaste, detergente e extrema-pressão. Portanto, o óleo lubrificante contém uma quantidade razoável de zinco como um complexo organometálico. O desgaste de sistemas galvanizados é a principal fonte de aumento na concentração de zinco em óleos lubrificantes usados (SINGH et al., 2006).

A Figura 29 apresenta a quantidade de zinco nas amostras de lubrificante. Segundo a Tabela 4, a variação do teor de zinco em relação ao óleo original deve ser de $\pm 20\%$ do óleo novo, estando todos os resultados dentro do especificado, sendo a maior variação apresentada a de + 6,12% nas 150 hM da 2ª repetição.

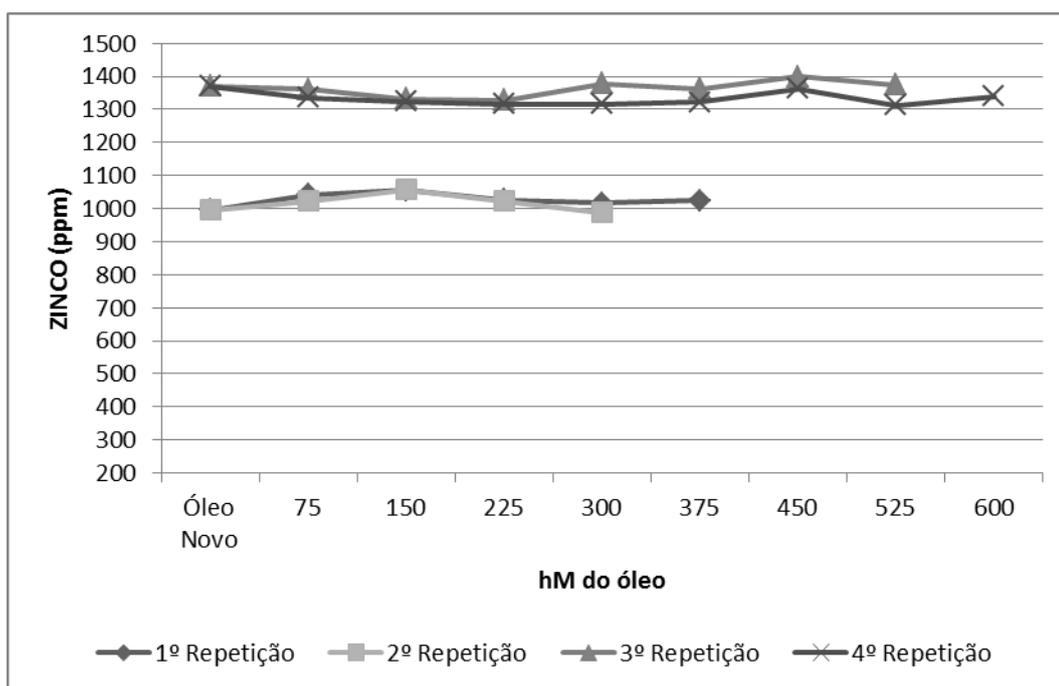


Figura 29. Variação da quantidade de zinco no óleo lubrificante em relação ao período de horas trabalhadas.

4.1.2.4 Testes Físicos

Os resultados dos testes físicos apresentaram, 0% de teor de água no óleo lubrificante, com exceção das 225 hM da 4ª repetição, onde foi constatado 0,31% de água, podendo ter sido ocasionado devido a realização de coleta com o óleo em temperatura baixa ou contaminação durante a amostragem, não sendo proveniente do motor, pois nas demais amostragens não houve a presença de Glicol, que representaria a passagem de líquido arrefecedor para o cárter.

O estudo morfológico de partículas através da macroscopia verificou a normalidade de todas as amostras.

4.2 Análise do biogás

Os resultados das amostras de biogás, efetuadas no mesmo período das coletas de óleo lubrificante, estão descritos na Tabela 8. Não foi detectada a presença de amônia através das análises pelo Alfakit.

Tabela 8. Resultados das análises de biogás

hM Fluído	Repetição	Análise	Gás sulfídrico (ppmV)	Metano (%)	Amônia (ppm)
75	1º Repetição	26/04/2013	700	75	0
150	1º Repetição	09/05/2013	750	75	0
225	1º Repetição	16/05/2013	357	80	0
300	1º Repetição	24/05/2013	350	75	0
375	1º Repetição	31/05/2013	294	77	0
75	2º Repetição	18/06/2013	408	77	0
150	2º Repetição	20/06/2013	560	75	0
225	2º Repetição	28/06/2013	610	75	0
300	2º Repetição	05/07/2013	640	74	0
75	3º Repetição	18/07/2013	640	74	0
150	3º Repetição	25/07/2013	560	73	0
225	3º Repetição	01/08/2013	255	78	0
300	3º Repetição	08/08/2013	305	73	0
375	3º Repetição	21/08/2013	586	72	0
450	3º Repetição	29/08/2013	543	70	0
525	3º Repetição	05/09/2013	331	76	0
75	4º Repetição	13/09/2013	305	74	0
150	4º Repetição	23/09/2013	178	80	0
225	4º Repetição	02/10/2013	407	78	0
300	4º Repetição	09/10/2013	357	75	0
375	4º Repetição	14/10/2013	357	74	0
450	4º Repetição	18/10/2013	408	74	0
525	4º Repetição	24/10/2013	383	72	0
600	4º Repetição	27/10/2013	300	70	0

Na Figura 30 é apresentado os dados referentes a produção de metano, onde verifica-se uma variação de 70 a 80% na produção de metano durante o período de análise. A variação dos dados pode ter ocorrido por inúmeras variáveis, como caracterização do dejetos (que varia conforme idade dos animais), mudanças de temperatura e clima, lavagens das instalações com detergentes, canaletas de condução do dejetos até o biodigestor parcialmente cobertas e vazamentos na lona de cobertura. As águas de lavagem e chuva diluem o conteúdo do dejetos no biodigestor, sendo também que a presença de detergentes inibe a atividade biológica, impactando na produção de metano.

De acordo com Pereira (2005), é necessário tomar todos os cuidados no momento da entrada do dejetos no biodigestor, eliminando, por exemplo, a entrada de água da chuva e reduzindo ao máximo o uso de antibióticos, detergentes e desinfetantes no sistema de criação. Quando bem operado, o sistema produz biogás com até 70% de metano. Já Seixas et al. (1980) relata que quando as condições ambientais para o processamento de dejetos pelos

microrganismos são atendidas, o biogás obtido deve ser composto de uma mistura de gases, com cerca de 60 ou 65% do volume total consistindo em metano. Mesmo com todas as adversidades, e confrontando com a literatura citada, é possível verificar um bom manejo e produção pelo biodigestor, com produções acima de 70% no período pesquisado.

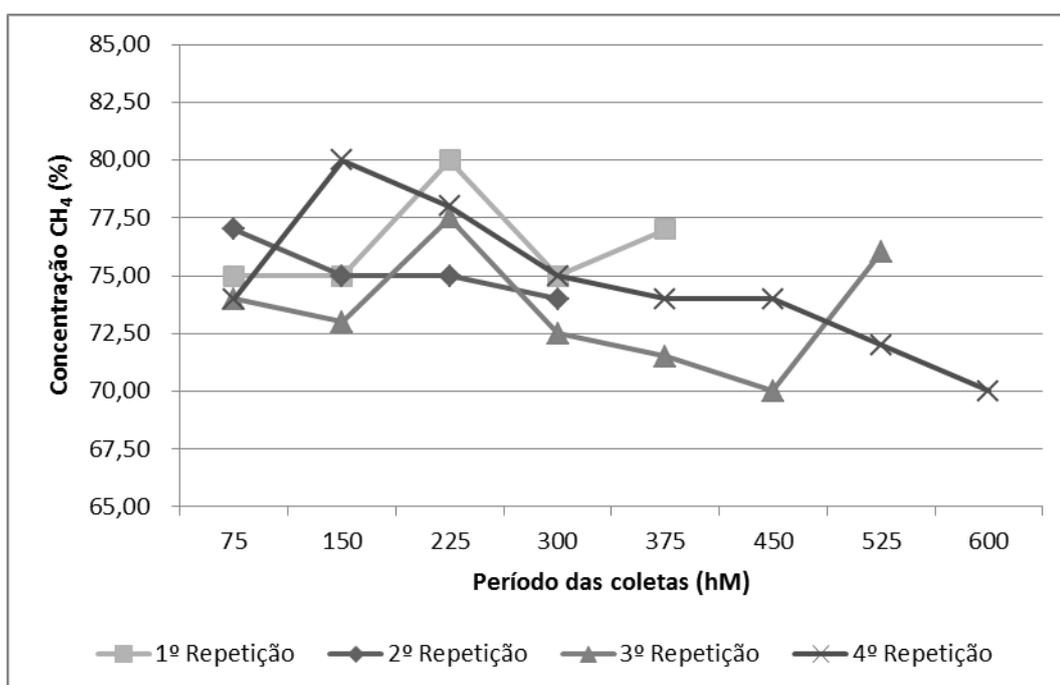


Figura 30. Concentrações de metano (CH₄) no biogás.

A Figura 31 apresenta os resultados das análises de gás sulfídrico. Foi verificada uma correlação entre a produção de metano e a presença de gás sulfídrico. Na 1ª repetição, com 75 e 150 hM as quantidades de metano permaneceram em 75%, enquanto a presença de gás sulfídrico esteve em 700 e 750 ppmV. Já em 225 hM, a quantidade de metano aumentou para 80% enquanto o gás sulfídrico diminuiu para 357 ppmV. Na sequência, com 300 hM o metano decresceu para 75% e nas 375 hM aumentou para 77%, enquanto o gás sulfídrico permaneceu em 350 ppmV e após reduziu para 294 ppmV.

Esta relação também se apresenta na 2ª e 3ª repetição, pois enquanto a presença de metano na amostra diminui, a de gás sulfídrico aumenta. Na 4ª repetição, o comportamento ocorre desta forma até as 225 hM, no entanto, das 300 as 600 hM, enquanto a quantidade de metano decresce a presença de gás sulfídrico se apresenta parcialmente inalterada.

Após a coleta de 375 hM da 3ª repetição foi efetuada a troca da limalha de ferro do filtro de biogás, onde houve um decréscimo até a coleta de 150 hM da 4ª repetição, porém

após esta, os valores voltaram a aumentar e permaneceram praticamente inalterados a partir da coleta de 225 hM da 4ª repetição até o final do experimento. Antes da troca da limalha, o valor médio de gás sulfídrico foi de 501,06 ppmV, e após foi de 356,80 ppmV, comprovando que houve redução do H₂S, no entanto os valores para utilização em motores ainda é elevado, sendo recomendado valores inferiores a 50 ppmV, sendo ideal a inexistência de H₂S, como avaliado no experimento de Naegele et al. (2013). Este comportamento na filtragem pode ter ocorrido pela saturação rápida do filtro, e devido ao mesmo não possuir regeneração da limalha através da passagem controlada de oxigênio, o mesmo não cumpriu eficazmente seu papel.

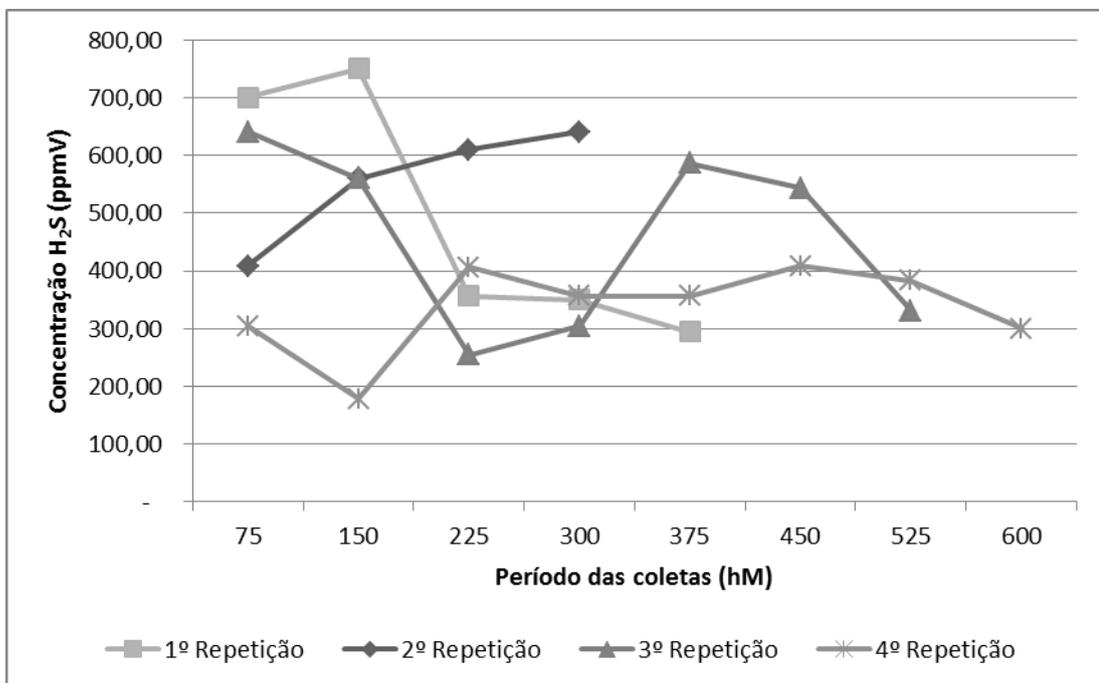


Figura 31. Concentrações de gás sulfídrico (H₂S) no biogás.

4.3 Comparação dos resultados do biogás e óleo lubrificante

Com os resultados obtidos é possível destacar os itens limitantes de condição para a substituição da carga de óleo lubrificante, que são eles (desconsiderando os dados justificados anteriormente das 1ª e 2ª repetições):

- Teor de sulfetos após as 450 hM.
- Teor de cobre após 450 hM, onde apresenta também uma taxa crescente da quantidade de cobre a partir das 375 hM.

- Taxa crescente de chumbo após as 375 hM, apesar de apresentar valores abaixo do limite recomendado.
- Taxa crescente de estanho após as 450 hM.
- Teor de magnésio após 375 hM.

Relacionado ao teor de sulfetos, é possível verificar sua relação com a utilização de biogás com níveis elevados de H_2S , pois se comparado aos dados de Naegele et al. (2013), onde o biogás possui níveis próximo de zero para H_2S , o incremento de sulfetos foi nulo, já no presente estudo, devido as elevadas concentrações de H_2S houve incremento de sulfetos, limitando a troca de óleo nas 450 hM. De acordo com Rubio Senes et al. (2013), é imprescindível que os teores de gás sulfídrico no biogás sejam minimizados por processos de filtração para evitar o desgaste das peças e a contaminação do motor. Assim, deve-se atuar com uma filtragem eficaz do biogás para utilização em motores, reduzindo ao máximo a concentração de H_2S , pois esta ação impactará diretamente na durabilidade do óleo lubrificante, e devido ao poder degradante do H_2S , também na durabilidade do motor.

Os dados de cobre, chumbo e estanho revelaram um incremento nos níveis de desgaste do motor após as 375 hM. O cobre é o metal mais sensível à corrosão quando da utilização do H_2S , e está presente em peças vitais do motor, principalmente em buchas e casquilho de mancais (bronzina) (IPIRANGA, s.d.). Já o incremento da concentração de Estanho pode estar diretamente ligado à taxa crescente do cobre, pois juntamente resultam no Bronze, que está presente em rolamentos e casquilhos (bronzina). Estanho também é utilizado nos metais de anéis, pistões e em quando do encosto com buchas, indicando desgaste dos mesmos. O chumbo também pode se associar ao cobre, compondo uma liga presente em mancais e buchas, além da presença em rolamentos (NÉDIC et al., 2009). No trabalho de Silveira et al. (2010), as amostras de óleo usado também apresentaram uma tendência de aumento na concentração de todos os metais analisados em relação ao óleo novo, sugerindo ainda que o aumento na concentração desses metais está relacionado com a qualidade das peças que constituem os motores e o tipo de percurso realizado pelo veículo.

Já para o magnésio o valor limite recomendado pela bibliografia é atingido após as 375 hM. Este aditivo com função dispersante/detergente é de grande importância para o motor, principalmente quando da utilização de biogás com presença de H_2S , atuando na neutralização dos ácidos formados controlando o processo de oxidação.

Com base nos dados expostos, é possível efetuar a extensão dos períodos de troca do óleo lubrificante no motor do referido estudo em 50%, passando a troca de 250 hM para 375 hM. Já em relação ao filtro de lubrificante, a substituição também pode ser realizada quando da troca do lubrificante, ou seja, nas 375 hM, pois através dos resultados deste estudo foi verificado que o mesmo cumpriu eficazmente seu papel.

Baseado neste novo período, e considerando o valor de R\$ 8,50 por litro de lubrificante (cotação para Cascavel-PR, janeiro de 2014), o custo do óleo por hM passará de R\$ 0,99/hM para R\$ 0,66/hM, perfazendo uma economia de R\$ 1.188,00 em 1 ano, equivalente a 33,3% do valor gasto anteriormente. Se considerado também o valor do filtro, que teve sua vida ampliada, os custos de mão de obra e tempo parado do equipamento para troca de óleo, evidentemente que a economia será ainda maior. Além da vantagem econômica têm-se a vantagem ambiental, pois um menor consumo de óleo impacta em um menor volume de resíduo para posterior destinação e reciclagem.

5 CONCLUSÕES

Devido aos valores encontrados nas análises das 1^o e 2^o repetições, foi constatado desgaste anormal do motor. Após manutenção e limpeza realizada, foram coletadas as 3^o e 4^o repetições, que apresentaram desempenho superior em referência às duas primeiras. Alguns dados das primeiras repetições foram desconsiderados devido à interferência do estado em que o motor se encontrava.

Os valores de viscosidade, índice de basicidade total (TBN), oxidação e nitratos não ultrapassaram os valores limites preconizados na bibliografia, mesmo quando utilizados por 600 hM. Foi identificada a relação entre a alta concentração de gás sulfídrico no biogás e o aumento da concentração de sulfatos no óleo lubrificante, apresentando resultados superiores ao encontrado na bibliografia, resultando em período de troca do lubrificante em intervalos máximos de 450 hM. Caso o biogás possuísse uma filtragem mais eficaz, resultando em valores próximos de zero para a concentração de gás sulfídrico, os resultados de sulfatos poderiam ser menores ou praticamente nulos, impactando no período de troca do óleo lubrificante.

Dentre os metais, somente o Cobre apresentou valores acima do limite recomendado a partir das 450 hM. Foi identificado também um aumento na concentração de Estanho e Chumbo após as 450 hM, que pode estar associado ao aumento da concentração Cobre, que ocorreu a partir das 375 hM, indicando elevação do desgaste de componentes internos, pois o Cobre associado ao Chumbo e Estanho formam diversas ligas de metais utilizadas em pontos vitais do motor.

Dentre os aditivos somente o Magnésio teve variação além do limite preconizado. Devido ter a função de aditivo dispersante/detergente, sua variação excessiva pode ter ocorrido devido à intensa oxidação do óleo, atingido o limite recomendado nas 375 hM de utilização.

O valor limite para troca da carga de lubrificante do motor do presente estudo, em relação aos limites preconizados na bibliografia, é de 375 hM, valor 50% maior do que o recomendado pelo fabricante. Esta extensão do período de troca resultará em uma economia de 33,33% do valor gasto com lubrificante, sem contar os gastos com filtros, mão de obra e horas paradas do equipamento para manutenção. Não somente, haverá grande benefício ambiental, pois uma menor quantidade de lubrificante será utilizada e posteriormente reciclada.

A análise dos resultados em confronto com a bibliografia demonstrou que a maximização dos intervalos de troca de óleo não coloca em risco o desempenho do sistema. Isto resulta em economia nos custos de manutenção e operação, melhorando a atratividade da utilização do biogás em motores. Também deve ser levado em consideração, que através do monitoramento das análises de óleo lubrificante, as falhas dos componentes poderão ser identificadas antecipadamente, permitindo o agendamento de manutenções com antecedência, reduzindo o tempo de inatividade do motor em caso de falha de algum componente.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFAKIT. **Kit para análise de biogás**. Disponível em: <http://www.alfakit.com.br/produtos-ver.html?id=20>. Acesso em: 11 Set. 2011.

ALVES, G. F.. **Análise de confiabilidade aplicada aos ensaios de óleos lubrificantes para motores de tratores**. Tese (Doutorado). Botucatu, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 2007.

ANGONESE, A.; CAMPOS, A. T.; ZACARKIM, C. E. Eficiência energética de sistema de produção de suínos com tratamento dos resíduos em biodigestor. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.3, p.745-750, jul./set. 2006.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Boletim bimestral do monitoramento dos lubrificantes**. Ano 7. Julho/Agosto 2013. Versão 1. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 15 jan. 2014.

BUI, V.G.; NHAN, H.Q.; TRUONG, L.B.T.. **Small power engine fueled with biogás**. Annual Report of FY 2007, The Core University Program between Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) and Vietnamese Academy of Science and Technology (VAST). P.265-P.271, 2007. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11094/12943>> Acesso em: 05 Dez 2013.

CAINES, A.J.; HAYCOCK, R.F. **Automotive lubricants reference book**.1996.

CAMARA, M.A.; PERES, B.R.; CHRISTIANINI, R.Z. **Manutenção e lubrificação de equipamentos**. Universidade Estadual Paulista, 2010.

CARRETEIRO, R. P. MOURA, C. R. S.; **Lubrificantes e lubrificação**, 2ª ed., Técnica: Rio de Janeiro, 1988.

CORRÊA, I. M.; MAZIERO, J. V. G.; STORINO, M. Mistura de biodiesel de sebo bovino em motor diesel durante 600 horas. **CiênciaRural**, v.41, p.1189-1194, 2011.

EMCON ASSOCIATES. Methane Generation and Recovery from Landfills. **Annual Arbor Science Publishers**, p.81-93, 1980.

FYGUERO, A.; SIMÓN, J. **Mantenimiento de Motores Diesel**. Consejo de Estudios de Postgrado. Universidad de Los Andes. Mérida, 1997.

GASPARINI, C.T. Um modelo de laboratório econômico para análises de óleos lubrificantes. **Revista da Associação dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil**, p. 38-42, 1983.

GÓMEZ ESTRADA, YA. **Contribución al desarrollo y mejora para la cuantificación de la degradación en aceites lubricantes usados de MCIA a través de la técnica de espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)**. 2013. Tese (Doutorado em sistemas propulsivos em meios de transporte). Universitat Politècnica de València. Espanha. Disponível em: <<http://riunet.upv.es/handle/10251/19244>>. Acesso em 25 Jan. 2014.

GUIMARÃES, J. **Rerrefino de óleos lubrificantes de motores de combustão interna pelo processo de ultrafiltração e adsorção**. 2006. 83 F. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

IPIRANGA. **Apostila de lubrificação automotiva**. (sem data). Disponível em: <http://www.lacarolamentos.com.br/catalogos/_SAIBA MAIS/lubrificantes/lubri_auto.pdf>. Acesso em: 22 Jan. 2014.

KIMURA, R. K. **Uso da técnica de análise de óleo lubrificante em motores diesel estacionários, utilizando-se misturas de biodiesel e diferentes níveis de contaminação do lubrificante**. 129 F. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, L. de; PICCININ, L. S. **Manual de Análise do Biogás**. Alfakit e Embrapa Suínos e Aves. Florianópolis, SC. 20 p. 2007.

LAFRAIA, J.R.B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro, Qualitymark, 2001.

LUBES EM FOCO. **Revista Lubes em Foco**, Fev/Mar 2010, no 17.

LUBRIFICANTES. O significado das siglas. **Guia de frota e companhia**. 9.ed, 2007. Disponível em: http://www.digitalflip.com.br/frotacia/flip/guia_lubrificantes/2007%3D01-012007/09.pdf. Acesso em: 21 ago. 2012.

MAGALHÃES, E. A. **Elaboração e avaliação do desempenho de um sistema de absorção de CO₂ contido no biogás** – Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2004.

MALPICA, L.G.T. **Manutenção Preditiva de motores de combustão interna, à gasolina, através da Técnica de Análise de Lubrificantes**. 97 F. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

MANNARINO, R. P. Impactos sócio-econômicos da entrada do gás natural na matriz energética do Amazonas. **T&C Amazônia**, Ano III, n. 6, Jan. 2005.

MARSHALL, E. R.; Análises de óleos usados; **Lubrificação Texaco**; 79 no2, 1-12, 1993.

MIHIC, S. Biogas Fuel for internal combustion Engines, **Annals of Faculty Engineering Hunedoara**. 411p., 2004.

NAEGELE, H.-J. THOMAS, B. SCHRADE, C. LEMMER, A. OECHSNER, H. JUNGBLUTH, T. Influence of maintenance intervals on performance and emissions of a 192 kW biogas gas Otto CHP unit and results of lubricating oil quality tests - Outcome from a continuous two-year measuring campaign. **Energies**. No. 6, 2819–2839, 2013. Disponível em: < <http://www.mdpi.com/1996-1073/6/6/2819>>. Acesso em: 20 Dez. 2013.

NÉDIC, B., PERIC, S., VURUNA, M. Monitoring Physical and Chemical characteristics Oil for Lubrication. **Journal Tribology in industry**, vol. 31, No 3-4, p. 59-66. 2009. Disponível em: < <http://www.tribology.fink.rs/journals/2009/2009-3-4/9.pdf>>. Acesso em: 20 Dez. 2013.

OBERT, E.F. **Motores de combustão interna**. Porto Alegre: Globo, 618 p, 1971.

OELCHECK. **Limitwert für Verschleiß metalle**. 2001. Disponível em: <<http://www.oelcheck.de/fileadmin/oelcheck/pdf/oelchecker/frue2001.pdf>>. Acesso em 19 Jan. 2014.

OELCHECK. **Stationäre Gasmotoren – Beurteilung des Gebrauchtzölzustands und Limitwerte**. 1999. Disponível em: <<http://www.oelcheck.de/wissen-von-a-z/komplexe-begriffe/stationaere-gasmotoren-beurteilung-und-limitwerte-oelchecker-winter-1999.html>>. Acesso em 19 Jan. 2014.

OELCHECK. **Typische Limitwerte für Motorenöle aus (nicht stationären) Dieselmotoren**. 2010. Disponível em: <<http://www.oelcheck.de/wissen-von-a-z/uebersichten-und-tabellen/limitwerte/limitwerte-fuer-dieselmotorenoele.html>>. Acesso em 19 Jan. 2014.

OILCHECK. **Sulfatos x TBN**. (sem data). Disponível em: <<http://www.grupooilcheck.com.br/dica/sulfatos-x-tbn/>>. Acesso em: 20 Dez. 2013.

OLIVEIRA, P.A.V. Produção e aproveitamento do biogás. In: OLIVEIRA, P.A.V. (Coord.) **Tecnologias para o manejo de resíduos na produção de suínos: manual de boas práticas**. Concórdia: EMBRAPA-CNPSA, cap. 4, p.43-55, 2004.

PAULINO, P, F. **Diagnóstico dos resíduos gerados nas oficinas mecânicas de veículos automotivos do município de São Carlos-SP**. UNESP – Campus de Rio Claro. 59 f. Rio Claro, 2009.

PEREIRA, M. L. Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Biodigestores: opção tecnológica para a redução dos impactos ambientais da suinocultura**, 2005. Disponível em: <<http://www.cnpsa.embrapa.br/?ids=&idn=437>>. Acesso em: 21 Jan. 2014.

PEREIRA, R. H.; BRAGA, S.L.; BRAGA, C.V.M. “Geração Distribuída de Energia Elétrica – Aplicação de Motores Bicomustível Diesel/Gás Natural”, In: **3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás**, Salvador, 2-5 Out. 2005.

PETERSON, C. L.; THOMPSON, J. C.; TABERSKI, J. S. **One-thousand-hour engine durability test with HySEE and using a 5X MA test cycle**. Transaction of the ASAE, Saint Joseph, v. 42, n. 1, p. 23-30, 1999.

POSSAMAI, L. **Eficácia da análise de amostras de óleo lubrificante por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado na detecção de desgaste em motores Diesel após amaciamento**. 99 F. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotiva) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

RAHDE, S. B. **Motores de Combustão Interna**. Apostila. PUCRS Departamento e Engenharia Mecânica. Porto Alegre, RS. 2006.

RIBEIRO, C. M. **Estabelecimento de uma rotina laboratorial para análise química de sedimentos e sua aplicação a sedimentos continentais do Minho (NW Portugal)**:

contribuição para a reconstituição paleoambiental da região. 182 F. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente), Universidade do Minho. Portugal, 2005.

RUBIO SENES, C.E. LINDINO, C.A. BARICCATTI, R.A. MENDOZA MOREJON, C.F. SOUZA, J. Estudo da eficiência de um purificador para motor a biogás. **In: 53º Congresso Brasileiro de Química.** Rio de Janeiro – RJ. 14 a 18 de Outubro de 2013. ISBN: 978-85-85905-06-4. Disponível em: <<http://www.abq.org.br/cbq/2013/trabalhos/9/2490-16739.html>>. Acesso em 25 Jan. 2014.

SEIXAS, J.; FOLLE, S.; MACHETTI, D. **Construção e funcionamento de biodigestores.** Brasília: Embrapa-DID, Embrapa-CPAC, p. 60. (Circular Técnica, 4), 1980.

SILVA, M.V.I. da. **Efeitos do uso do biodiesel sobre propriedades do óleo lubrificante usado em motor de ignição por compressão.** 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UFSCAR/USP. São Carlos, SP, 2006.

SILVEIRA, E. L. C. COELHO, R. C. MOTIA NETO, J. M. DE MOURA, C. V. R. DE MOURA, E. M. “Determination of metals in lubricating oils, from public transportation, using the faas,” **Química Nova**, vol. 33, no. 9, pp. 1863–1867, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422010000900008&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso em: 25 Jan. 2014.

SINGH, S. K.; AGARWAL, A. K.; SHARMA, M. Experimental investigations of heavy metal addition in lubricating oil and soot deposition in an EGR operated engine. **Appl Therm Eng** 26: 259–266. 2006.

SOUZA, J. **Desenvolvimento de tecnologias para compressão de biogás** – Dissertação de Mestrado – PPGE3M – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre – RS, Brasil, 2010.

SOUZA, J. SCHAEFFER, L. Estudo para fabricação de cilindros especiais para biometano. **Revista Liberato**, Educação, Ciência e Tecnologia – v. 11, n. 15, pg 33-38, jan./jun. (2010). Disponível em: < <http://gaia.liberato.com.br/ojs/index.php/revista/article/viewFile/150/140>>. Acesso em: 25 Jan. 2014.

SOUZA, J.; SOUZA, S.N.M.; MACHADO, P.R.M. Desempenho de um motor ciclo otto utilizando biogás como combustível.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5, Campinas, 2004. **Proceedings online.** Disponível em:

<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000100044&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 18 Out. 2011.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology**. Amsterdam: Elsevier, 1993. (Tribology Series, 24).

SUZUKI, A.; FERNANDES, D.; FARIA, R.; VIDAL, T. Uso de biogás em motores de combustão interna. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava, 4, 2011. Disponível em: <<http://revistas.unicentro.br/index.php/repaa/artic le/view/1405/1487>>. Acesso em: 29 Jul. 2013.

TAYLOR, R. I. Car lubricants: fact & friction. **Tribology & Lubrication Technology**, v.60, n.10, out.2004.

TEXACO. **Fundamentos de lubrificação**. Rio de Janeiro: Chevron do Brasil, 2005.

TURDERA, M.V, & YURA, D. **Estudo da viabilidade de um biodigestor no município de Dourados**. UEMS, Mato grosso do Sul. 2003.

VELOSO E SILVA, C. A. B. **Limpeza e purificação de biogás**. 103 p., 2009. (Mestrado em Engenharia Mecânica). Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real – Portugal.

ZHANG, Z. ZHANG, L. MAI, Y. **The running-in wear of a steel/Sic,-Al composite system**. Austrália, 1995.

ZUM GAHR, K.H. Microstructure and wear of materials. **Elsevier**, Amsterdam, 560p, 1987. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=qibApT7zNcYC&printsec=frontcover&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false>>. Acesso em: 30 Jul. 2013.