

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA  
TESE DEFENDIDA POR Omar Hildinger  
..... E APROVADA  
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 18/12/2009  
Luiz Felipe Moura  
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

# **Sistema de Medição de Consumo de Óleo Lubrificante por Nível em Motores de Combustão Interna**

Autor: **Omar Hildinger**  
Orientador: Luiz Felipe Mendes de Moura

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

# **Sistema de Medição de Consumo de Óleo Lubrificante por Nível em Motores de Combustão Interna**

**Autor: Omar Hildinger**

**Orientador: Luiz Felipe Mendes de Moura**

**Curso: Mestrado Profissional Engenharia Automobilística**

**Área de Concentração: Motores**

Dissertação de mestrado profissional apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Automobilística.

Campinas, 2009  
S.P. - Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

H546s Hildinger, Omar  
Sistema de Medição de Consumo de óleo lubrificante  
por nível em motores de combustão interna / Omar  
Hildinger. --Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Luiz Felipe Mendes de Moura.  
Dissertação de Mestrado (Profissional) -  
Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de  
Engenharia Mecânica.

1. Motores. 2. Motores de combustão interna. 3.  
Óleos lubrificantes. 4. Motores - Sistemas de  
lubrificação. 5. Automóveis - Motores - Sistemas de  
lubrificação. I. Moura, Luiz Felipe Mendes de. II.  
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Measurement system for lubricant oil consumption by oil pan  
level in internal combustion engines

Palavras-chave em Inglês: Engines, Internal combustion engine, Lubricant oil,  
Motors - Lubricant systems, Automobiles - Motors -  
Lubricant systems

Área de concentração: Motores

Titulação: Mestre em Engenharia Automobilística

Banca examinadora: Marcelo Moreira Ganzarolli, Oscar Mauricio Hernandez  
Rodriguez

Data da defesa: 18/12/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

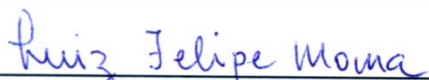
**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL**

**Sistema de Medição de Consumo de Óleo  
Lubrificante por Nível em Motores de  
Combustão Interna**

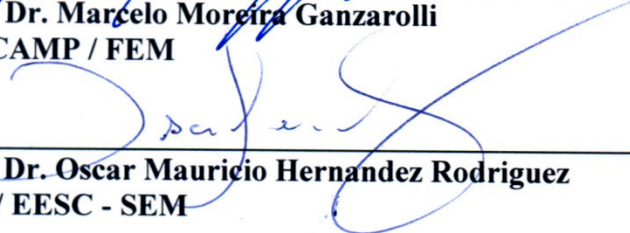
Autor: **Omar Hildinger**

Orientador: **Luiz Felipe Mendes de Moura**

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Luiz Felipe Mendes de Moura, Presidente**  
**UNICAMP / FEM**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Marcelo Moreira Ganzarolli**  
**UNICAMP / FEM**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Oscar Mauricio Hernandez Rodriguez**  
**USP / EESC - SEM**

Campinas, 18 de dezembro de 2009



## **Dedicatória**

Dedico este trabalho a minha querida esposa Clarice pela dedicação e apoio; ao meu filho Eric que suportou minha ausência nestes dois anos e aos meus pais, que sempre foram um exemplo a ser seguido.

## **Agradecimentos**

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto meu agradecimento:

Aos meus pais e irmãos que não apenas nestes dois anos, mas em todos os momentos da minha vida pelo incentivo e exemplos de ser humano e companheirismo.

A minha querida esposa Clarice e meu filho Eric que suportaram minha ausência nos finais de semana dedicados a este trabalho.

A MWM International Motores que proporcionou este curso.

Ao meu orientador, que muito mais que os caminhos a serem seguidos mostrou meu potencial em resolver os problemas e fez este curso ter valido a pena.

Aos Professores Celso Bertran e Ines Joekes que contribuíram além daquilo que estavam ao seu alcance e vibravam com os avanços alcançados.

A todos os professores e colegas do curso que sempre demonstraram união, camaradagem e respeito.

Aos colegas da Engenharia de Produtos Correntes da MWM International que serei eternamente grato, pelo suporte as minhas atividades no meu período ausente para execução deste trabalho.

Aos amigos dos laboratórios da MWM International que me apoiaram e ajudaram nos experimentos e confecção dos dispositivos.

Aos colegas mestrandos de Canoas que nas mais de 100 viagens a Campinas foram durante estes dois anos como uma segunda família para mim.

E a todos os amigos que ajudaram de forma direta e indireta neste trabalho,

Muitíssimo obrigado.

“Não são as espécies mais fortes que sobrevivem, nem as mais inteligentes, mas aquelas mais aptas a mudanças”.

Charles Darwin, cientista formulador da teoria da evolução por seleção natural

## Resumo

HILDINGER, Omar, *Sistema de medição de consumo de óleo lubrificante por nível em motores de combustão interna*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 127p, Dissertação (Mestrado).

A medição de consumo de óleo lubrificante em motores de combustão interna tem a característica de ser impreciso e demorado quando se fala no procedimento tradicional de drenar e pesar, ainda muito utilizado pela maioria das empresas de autopeças no desenvolvimento de motores e componentes. Neste trabalho mapeamos os fatores que influenciam na medição e estudamos a possibilidade de mensurar o consumo pelo nível de óleo do motor. Tivemos ótimos resultados quando utilizamos um transdutor de pressão para inferir o nível de óleo no cárter, onde se mediu a altura manométrica que o óleo exerce obtendo boa repetibilidade nos resultados, quando trabalhamos com o amortecimento numérico das medições. O tempo de teste para medição de consumo pôde ser reduzido de 60 para 20 horas de teste com a mesma precisão e, o tempo total dos testes de durabilidade pôde ser reduzido de 6 a 13% em função das paradas para pesagem do óleo que não precisam mais ser realizadas. Com o controle correto dos parâmetros que influenciam a medição, podemos considerar que a complexidade do sistema de medição melhorou em relação ao método de drenar e pesar. Também se diminuiu o manuseio de grandes quantidades de óleo com ganhos em segurança e ergonomia para o operador, além de diminuir riscos para o meio ambiente.

*Palavras-chaves:*

- Motores, Medição de Consumo de Óleo Lubrificante, Motores de Combustão Interna, Nível de Óleo do Cárter.

## **Abstract**

HILDINGER, Omar, *Measurement system for lubricant oil consumption by oil pan level in internal combustion engines*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 127p, Dissertação (Mestrado).

The measurement of lubricant oil consumption in internal combustion engines is known as inaccurate and too time consuming when used the drain-and-weight method, which is still widely used by several auto-parts companies at engine development. During this research, we studied the parameters that have an effect on this kind of measurement and tested the oil consumption measurement technique, based on the oil level in the oil pan. Great results were achieved by using a pressure transducer to assess the engine-oil level and measuring the oil pressure at the bottom of the oil pan. A good repeatability when damping the measurements with numerical averages was observed. The test duration for oil consumption measurements could be reduced from 60 to 20 hours of testing, with the same accuracy, and the total time of durability tests could be reduced from 6 to 13% due to drain and weight pause that no longer need to be made. After this study, as long as the parameters that have strong influence in the oil measurement are properly controlled, we could consider that the proposed system has lower complexity with respect to the drain-and-weight method, We have also detected improvements regarding safety, ergonomics and environment issues due to the large quantities of oil that is no longer need to be handled with the system proposed.

### *Key Words:*

Engines, Oil Consumption Measurement, Internal Combustion Engine, Oil Pan Level.

# Índice

Dedicatória .....	iv
Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract .....	viii
Índice.....	ix
Lista de Figuras .....	xi
Lista de Tabelas.....	xv
Nomenclaturas.....	xvi
1. Introdução.....	1
1.1 Revisão da literatura.....	4
1.1.1 Técnicas de medição direta .....	5
1.1.2 Técnicas de medição indireta .....	17
1.2 Comparativos de alguns sistemas de medição .....	26
1.2.1 - Método de drenar e pesar .....	28
1.2.2 - Método de drenar e pesar automatizado .....	28
1.2.3 - Método de medição indireta de SO <sub>2</sub> por espectrometria a laser .....	29
1.3 Objetivo .....	32
2. Metodologia .....	33
2.1 Proposta de Trabalho.....	33
2.2 Escolha do método de medição .....	34
2.2.1 Detecção de nível por sensor de ultrasom.....	34
2.2.2 Detecção de nível com sensor laser.....	35
2.2.3 Utilização de um tubo inclinado.....	36
2.2.4 Detecção do nível com sensor de pressão diferencial.....	38
2.3 Planejamento do Trabalho.....	39
2.4 Análises das variáveis .....	44
3. Análise experimental .....	62
3.1 Equipamentos utilizados .....	62
3.2 Estudos das variáveis .....	66
3.2.1 - Forma do cárter .....	66
3.2.2 - Temperatura do óleo .....	74
3.2.3 - Temperatura do motor.....	77
3.2.4 - Tempo que o motor está parado.....	81
3.2.5 - Posição de parada dos componentes internos do motor.....	83
3.2.6 - Temperatura ambiente. ....	83

3.2.7 - Dissipação de calor do motor para o ambiente. ....	87
3.2.8 - Manutenção da mesma pressão em ambos os lados do sistema. ....	88
3.2.9 - Precisão do instrumento de medição.....	90
3.2.10 - Rotação do motor .....	92
3.2.11 - Agitação do óleo não define um nível exato.....	96
3.2.12 - Variação da viscosidade devido ao envelhecimento do óleo.....	99
3.2.13 - Ângulo de inclinação do instrumento. ....	99
3.2.14 - Erros de paralaxe e histerese.....	99
3.2.15 - Peças soltas dentro do cárter. ....	99
3.2.16 - Posicionamento do motor. ....	100
3.2.17 - Resumo do estudo dos parâmetros.....	100
4. Resultados obtidos.....	102
5. Conclusões e sugestões para próximos trabalhos.....	106
Referências Bibliográficas .....	108

## Lista de Figuras

Figura 1: Gráfico de consumo de óleo de um motor durante o teste de durabilidade de 500h medido pelo método de drenar e pesar a cada 10 horas. Dados obtidos no laboratório de testes da MWM International na planta de Canoas - RS. ....	3
Figura 2: Gráfico comparativo entre o método de drenar e pesar e um método por radio tracer, que utiliza isótopos radioativos desenvolvido pela Dana Corporation, fabricante de autopeças.....	4
Figura 3: Funcionamento do método de medição de consumo de óleo lubrificante de drenar e pesar .....	6
Figura 4: Esquema do sistema desenvolvido pela Daimler-Benz em 1965 para medição de consumo de óleo, onde um circuito semi fechado mantém o volume de óleo do cárter do motor (1) e reservatório (7) sempre constantes. Um outro reservatório (18) alimenta o sistema para manutenção dos níveis. ....	7
Figura 5: Sistema patenteado em 1986 para medição por vasos comunicantes do nível de óleo em um motor com um sensor ultrasom .....	8
Figura 6: Croqui do sistema desenvolvido pela Dana para medição automatizada de consumo de óleo com vasos comunicantes e flutuador pra indicar o nível.....	10
Figura 7: Exemplo de medição de consumo por acompanhamento de nível do cárter, com diversas leituras em apenas 12 horas de teste .....	11
Figura 8: Sistema de medição de consumo de óleo lubrificante de um turbo compressor que utiliza um circuito fechado com uma balança. A esquerda o sistema da Universidade de Valencia e a direita o sistema desenvolvido pela Agip Petroli. ....	12
Figura 9: Sistema de medição desenvolvido pela AVL para medição de consumo de óleo lubrificante. A unidade de controle eletrônica pára o motor, drena o óleo, pesa, devolve o óleo para o motor e reinicia o ensaio. ....	13
Figura 10: Esquema de funcionamento do sistema comercializado pela AVL para medição de consumo de óleo lubrificante com o motor em funcionamento. ....	14
Figura 11: Sistemas de Masatoshi patenteados pela Toyota para medição de consumo de óleo automatizada. Em ambos utiliza-se o princípio de vasos comunicantes e por sistemas distintos, mantém-se o nível de óleo sempre no mesmo ponto. Tais sistemas monitoram a quantidade de óleo injetado no circuito para se manter o nível dos mesmos. Na esquerda a patente JP59079815 e na direita a patente JP59063522, ambas de 1984 .....	15
Figura 12: Sistemas de medição direta de consumo de óleo desenvolvido pela Cummins Engine Co. que utiliza o princípio de vasos comunicantes e sensor de nível para detectar o nível de óleo do motor e medir seu consumo. ....	16
Figura 13: Sistema de medição de consumo de óleo com acompanhamento do nível por sensor capacitivo a esquerda e sistema desenvolvido pela Federal Mogul a direita, com manutenção do nível de óleo constante e monitoramento do peso dos tanques para cálculo do consumo de óleo.	16



Figura 14: Croqui do sistema de medição de consumo de óleo com marcação química no óleo com compostos de zinco. Os gases são condensados e na forma líquida é feita a medição da quantidade de zinco presente.....	18
Figura 15: Sistema de medição de consumo de óleo lubrificante que utiliza espectrometria a laser para detecção de dióxido de enxofre, SO <sub>2</sub> , nos gases de escape. ....	20
Figura 16: Sistema de medição de consumo de óleo pela detecção de Dióxido de enxofre nos gases de escape por meio de uma célula eletroquímica desenvolvido pela Ford em 1992.....	21
Figura 17: Método de medição de consumo de óleo com marcação do óleo lubrificante com brometo radioativo <sup>82</sup> Br, desenvolvido pela Universidade de Dresden, Alemanha.O esquema mostra a lavagem dos gases de escape em uma solução de nitrato de prata .....	22
Figura 18: Sistema desenvolvido pela Toyota para medição de consumo de óleo de diferentes formas para avaliar a formação de material particulado. Nesse caso usou enxofre radioativo, <sup>35</sup> S e carbono <sup>14</sup> C no óleo do motor. ....	23
Figura 19: Separação dos circuitos de óleo efetuado pela Toyota para medição separada do consumo apenas das guias de válvulas do turbo compressor e dos anéis de pistão.....	24
Figura 20: Sistema de radio tracer da Dana Corporation para medição de consumo de óleo por meio da marcação radioativa do óleo lubrificante com Trítio <sup>3</sup> H .....	25
Figura 21: Curvas de iso-consumo de óleo lubrificante de um motor Diesel médio de 6 Litros de cilindrada total e potência de 180cv, aplicado em caminhões médios e ônibus. ....	27
Figura 22: Gráfico que mostra o custo total do teste para 3 métodos de medição diferentes para um motor aplicação heavy duty (caminhão 57 ton.), em diferentes quantidades de testes.....	30
Figura 23: Gráfico que mostra o custo total do teste para 3 métodos de medição diferentes de um motor aplicação light duty (pick-up média de PBT de 2750kg), para diferentes quantidades de testes. ....	31
Figura 24: Gráfico que mostra simulação do custo total de teste de consumo de óleo para diferentes quantidades de teste entre os métodos tradicionais e proposto em um motor de aplicação em pick-up leve (PBT 2750kg). ....	33
Figura 25: Princípio de funcionamento de um sensor de ultrasom para medição de nível de um líquido. Extraído do livro Instrumentação e controle de Bolton pag. 110 .....	35
Figura 26: Exemplo de forma construtiva para utilização de um sensor de distância a laser ou ultrasom a fim de detectar o nível de óleo lubrificante do cárter do motor .....	36
Figura 27: Exemplo de medidor de nível inclinado com resolução de 0,1mmca, retirado do catálogo da IOPE, fabricante de equipamentos de medição. ....	37
Figura 28: Exemplo de forma construtiva de um sistema de detecção de nível de óleo lubrificante do cárter, por meio do uso de um tubo inclinado. ....	37
Figura 29: Exemplo de forma construtiva de um sistema de detecção de nível de óleo lubrificante no cárter de um motor por meio da pressão da coluna de líquido que utiliza um sensor de pressão diferencial que possa ter contato direto com o óleo lubrificante.....	39
Figura 30: Primeira divisão de possíveis erros de medição do volume de óleo do cárter do motor .....	41
Figura 31: Árvore de falhas para estudo dos erros entre medições de nível de óleo do motor para medição de consumo de lubrificante nas condições de motor parado ou em funcionamento. ....	42
Figura 32: Continuação da árvore de falhas para estudo dos erros entre medições de nível de óleo do motor para medição de consumo de lubrificante nas condições de motor parado e em funcionamento. ....	43
Figura 33: Desenho do cárter de óleo do motor utilizado nos experimentos aplicado em um motor Diesel High Speed de 3,0L de cilindrada total.....	46

Figura 34: Gráfico que mostra a importância do controle da temperatura do óleo numa medição de circuito fechado de um turbo compressor. O gráfico mostra a medida em um ponto do circuito.	48
Figura 35: Ilustração que mostra a possibilidade de erro de medição se houver variação de temperatura em um dos lados do sistema de vasos comunicantes	49
Figura 36: Foto do dinamômetro utilizado acoplado ao motor e aspecto geral da bancada de controle, onde fica o sistema de aquisição de dados	63
Figura 37: Aspecto do software de aquisição de dados utilizado para leituras do transdutor de pressão junto com os outros parâmetros do motor	63
Figura 38: Foto da pipeta utilizada para construção do tubo inclinado	64
Figura 39: Transdutor de pressão utilizado para os experimentos.	64
Figura 40: Instalação dos tubos inclinados em diferentes configurações e motores. Na figura da direita com sistema de aquecimento para evitar influência da variação da temperatura ambiente.	65
Figura 41: Instalação do transdutor de pressão diferencial utilizado para medição de nível de óleo.	65
Figura 42: Gráfico que mostra a variação do volume de óleo em função da altura do nível dentro do cárter normal do motor Diesel high speed 3,0L, aplicação de uma pick-up leve de 3500kg PBT.	67
Figura 43: Foto do cárter normal de produção aplicado no motor em estudo.	69
Figura 44: Fotos do cárter especial preparado para melhorar resolução na medição do volume do óleo por meio do monitoramento do nível do mesmo dentro do cárter	69
Figura 45: Comparativo do cárter original do motor com o protótipo construído para aumentar a precisão da medição. Pequena variação do volume gera grande variação de nível.	70
Figura 46: Gráfico da variação da altura de nível em função do volume de óleo dentro do cárter proposto para melhorar precisão.	71
Figura 47: Gráfico de nível de óleo em função do tempo após a retirada de quantidades diferentes de óleo do cárter que utiliza a medição de nível por tubo inclinado.	72
Figura 48: Variação do nível de óleo do motor com a retirada de pequenas quantidades de óleo para mapear a relação Volume x Nível com o uso de um transdutor de pressão. O gráfico mostra a média móvel de 30 segundos de medição com frequência de aquisição de 2Hz.	73
Figura 49: Variação do nível de óleo no cárter em função da temperatura do óleo a 2000rpm. Em vermelho os valores com o uso do fator de correção.	75
Figura 50: Variação do nível do óleo em função da sua temperatura com o uso de um transdutor de pressão para medição. Os valores são a média móvel de 1 minuto de medição.	76
Figura 51: Variação do nível de óleo após a parada do motor. A linha tracejada mostra a parte que foi ampliada no gráfico da Figura 52	77
Figura 52: Ampliação da área do gráfico do comportamento do nível após a parada do motor na repetição de 4 testes. A linha azul mostra o teste com a temperatura da água em um valor inferior	78
Figura 53: Temperatura da água do motor no momento de parada do motor e nos minutos posteriores.	78
Figura 54: Gráfico da variação do nível do óleo em função da temperatura da água do motor com o uso de o sistema de vasos comunicantes e tubo inclinado	79
Figura 55: Variação do nível de óleo em função da alteração da temperatura da água do motor com o uso do transdutor de pressão diferencial.	80

Figura 56: Avaliação do comportamento do nível de óleo no tempo, após a parada do motor, com o uso de um tubo inclinado para medição do nível. ....	82
Figura 57: Repetição de três testes nas mesmas condições para avaliar o comportamento do nível de óleo após a parada do motor, com o uso de um transdutor de pressão para medição. ....	83
Figura 58: Influência na variação da temperatura do ar ambiente no comportamento do nível de óleo após a parada do motor com o uso de um transdutor de pressão diferencial. ....	84
Figura 59: Gráfico que mostra a influência da temperatura ambiente na velocidade de resfriamento do óleo lubrificante .....	85
Figura 60: Variação do nível de óleo em relação a temperatura ambiente em teste com o motor em funcionamento .....	85
Figura 61: Gráfico que mostra a variação da temperatura do óleo lubrificante devido a variação da temperatura interna da sala, durante o teste com vasos comunicantes mostrado na Figura 60.	86
Figura 62: Medição da variação do nível de óleo lubrificante em função da temperatura do ar ambiente .....	87
Figura 63: Equalização de pressões do motor, a esquerda a tomada de pressão no bocal de enchimento do motor e a direita ligação no tubo inclinado .....	88
Figura 64: Fotos do sistema de equalização de pressões. A esquerda detalhe da tomada de pressão no tubo da vareta de nível de óleo do motor e a direita mangueira leva essa pressão até o instrumento.....	88
Figura 65:Equalização de pressões. Tomada de pressão no bocal de enchimento do motor e ligação no tubo inclinado .....	89
Figura 66: Gráfico da variação do nível em função da variação da vazão dos gases de Blow by, indicado com pressão interna do cárter. ....	90
Figura 67: Formação do menisco com óleo lubrificante e ângulo de inclinação de 5° .....	91
Figura 68: Formação do menisco com óleo lubrificante e ângulo de inclinação de 10° .....	91
Figura 69: Transdutor de pressão diferencial utilizado para medição de nível de óleo montado na sala de teste.....	92
Figura 70: Variação do nível de óleo no cárter em função da rotação do motor com o uso de um tubo graduado na vertical ao lado do motor. ....	93
Figura 71: Variação do nível em diversas rotações do motor, com o uso de um tubo inclinado para medição .....	93
Figura 72: Medição do nível em função da rotação do motor. Com tempo de estabilização de um minuto em cada rotação.....	94
Figura 73: Medição do nível em função da rotação do motor. Com tempo de estabilização de dez minutos em cada rotação .....	95
Figura 74: Oscilação do nível em cada rotação do motor com o uso de um transdutor de pressão para aquisição dos dados. ....	96
Figura 75: Resumo da variação da amplitude de oscilação do nível de óleo em cada rotação, baseado na Figura 74.....	97
Figura 76: Dados coletados com transdutor de pressão com frequência de aquisição de 2 Hz a rotação de 1000rpm e plena carga do motor. ....	97
Figura 77: Nível de óleo do motor após o uso de médias móveis de 1 e 5 minutos de medição, com os dados coletados mostrados na Figura 76 como entrada.....	98
Figura 78: Nível de óleo medido com transdutor de pressão diferencial por um período de 20 horas de teste. ....	104
Figura 79: Consumo de óleo lubrificante medido pelo método de drenar e pesar verificado no motor usado para validar o método proposto neste trabalho.....	105

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Complexidade, precisão e custos de diferentes tipos de teste de consumo de óleo lubrificante de um motor de aplicação heavy duty (caminhão de PBC 57ton).....	29
Tabela 2: Tabela que demonstra os custos de diferentes tipos de teste de consumo de óleo de um motor de aplicação de pick-up leve (PBT 2750 kg).....	30
Tabela 3: Dados obtidos na medição da altura do nível de óleo em função do volume do cárter em estudo .....	68
Tabela 4: Valores obtidos da variação da altura de nível em função do volume de óleo dentro do cárter proposto para melhorar precisão. ....	70
Tabela 5: Taxa de variação do cárter medida com motor em funcionamento com o uso do método de medição de nível por tubo inclinado .....	73
Tabela 6: Taxa de variação do nível em função da massa de óleo.....	74
Tabela 7: Taxas de variação de nível em função da variação das temperaturas da água e do óleo, encontradas durante o experimento de variação da temperatura da água do motor, com o uso do sistema de nível inclinado. ....	80
Tabela 8: Taxas de variação do nível em função da variação das temperaturas da água e do óleo, encontradas no experimento de variação da temperatura da água do motor, com o uso do transdutor de pressão diferencial. ....	81
Tabela 9: Resumo dos parâmetros estudados, em consideração ao risco de introdução de erro de medição para cada sistema proposto .....	101

## Nomenclaturas

### *Letras latinas*

A - altura de ascensão capilar prevista,  
dm - unidade infinitesimal de massa  
dv - unidade infinitesimal de volume  
g - aceleração da gravidade, equivale a  $9,81 \text{ m/s}^2$   
h - Altura do nível  
L - Litros, Cilindrada total do motor  
m- massa  
r - raio do tubo de vidro para medição de ascensão capilar  
v - volume  
V - Volume final  
Vo - Volume inicial

.....

### *Letras gregas*

$\rho$  - Densidade, relação de massa por volume  
 $\gamma$  - Coeficiente de dilatação volumétrica  
 $\phi$  - coeficiente de tensão superficial do líquido,  
 $\Delta\rho$  - diferença entre massa específica do líquido e do gás  
 $\Delta T$  - Variação da temperatura  
 $\Delta V$  - Variação do volume

.....

### *Abreviações*

cv - Cavalo Vapor, unidade de potência  
g/h - Gramas por hora, consumo gravimétrico ou vazão gravimétrica  
g/cvh - Gramas por cavalo vapor hora, Consumo específico por unidade de potência.  
l/h - Litros por hora, consumo volumétrico ou vazão volumétrica  
Nc - Nível corrigido  
NI - Nível lido  
PBC - Peso Bruto Total Combinado, refere-se ao peso total do veículo carregado totalmente mais a capacidade de tracionar outra carreta.

**PBT** - Peso Bruto Total do veículo, refere-se a capacidade total de carga do veículo, mais o peso dele próprio

**PMS** - Ponto motor superior. Significa a posição do virabrequim na qual o cilindro número 1 se encontra no ponto mais alto do seu curso.

**Tal** - Temperatura ambiente lida

**Tar** - Temperatura ambiente de referência

**Tol** - Temperatura do óleo do cárter lido

**Tor** - Temperatura do óleo do cárter de referência

.....

### *Siglas*

**DETF** - Departamento de Engenharia Térmica e Fluidos

**EESC** - Escola Estadual de São Carlos

**FEM** - Faculdade de Engenharia Mecânica

**SEM** - Departamento de engenharia Mecânica

**UNICAMP** - Universidade Estadual de Campinas

**USP** - Universidade de São Paulo

.....

### *Termos específicos*

**Blow by** - Vazão de ar de dentro para fora do motor por meio de um respiro de gases oriundos do turbo compressor e do vazamento de compressão pelos anéis de pistão.

**Carga do motor** - significa o valor do torque aplicado no eixo do motor

**Common rail** - Sistema de injeção eletrônica de motores Diesel criado nos anos 90 e patenteado pela Bosch alemã e utilizado pela maiorias dos motores Diesel com tecnologia de emissões EURO3 e EURO4.

**Dinamômetro** - Dispositivo com capacidade de frear o eixo de um motor, medir o torque e a rotação, de onde se obtém a potência do motor.

**EURO3 e EURO4** - Normas criadas na década de 90, pelas quais a legislação européia se baseia para estabelecer os limites de máximos de emissões de veículos automotores novos, de gases e partículas que são nocivos ao meio ambiente. A legislação brasileira é baseada também nos limites descritos nessas normas.

**Heavy Duty** - Indica aplicações pesadas, por exemplo, grandes caminhões.

**Ligth duty** - Indica aplicações leves como caminhões pequenos e pick ups.

**Média móvel** - Média de um número fixo de valores, a qual se altera a medida que novos dados são obtidos. A fim de manter sempre o mesmo número de valores da média (por exemplo, média de 10 valores), os dados mais antigos são substituídos pelos novos obtidos.

**Motor High Speed** - Motor Diesel de alta rotação

**Teste de durabilidade policíclico** - Testes de durabilidade nos quais o motor passa por diversas condições de rotação torque e temperatura, onde geralmente se simula uma rota ou trajeto executado repetidamente e se acumula horas de teste ou sua equivalência em distância percorrida.

.....

# 1. Introdução

O consumo de óleo lubrificante sempre foi um tema importante na indústria automobilística do Brasil. Até os anos 90 não havia grande preocupação sobre esse aspecto e, podia-se dizer que possuía apenas uma conotação econômica. Até essa época, o objetivo com relação a consumo de óleo (muitas vezes não alcançado), era apenas de que não houvesse a necessidade de adição de óleo no motor entre as trocas. Quanto ao aspecto econômico, para usuários de veículos particulares, mesmo nos casos onde havia a necessidade de adição de óleo entre as trocas, dificilmente tinha-se alguma preocupação desse tipo, pois o óleo representa um valor muito pequeno em relação as outras despesas do veículo. Já para frotas de ônibus, caminhões e máquinas agrícolas, o consumo de óleo já tinha uma conotação econômica forte, uma vez que quando se anda milhares de quilômetros em um mês, ou se trabalha com várias máquinas por centenas de horas, o consumo de lubrificante passa a ser algumas centenas de litros, o que torna o consumo de óleo um diferencial no produto, portanto um item a ser considerado no desenvolvimento do motor.

Para se ter uma idéia disso, vamos fazer uma conta rápida: um caminhão ou ônibus que roda em média 500 km por dia, com um consumo de 2,5km/litro de Diesel, consome diariamente 200L de combustível. Esse veículo, com o consumo de lubrificante de 0,5% do consumo de combustível (considerado normalmente como limite, antes de se fazer uma intervenção no motor), consumirá 1L por dia, ou 25L por mês. Em valores atuais, com o custo do óleo lubrificante em torno de R\$10 por litro, significa uma despesa de R\$250 por mês. Para um frotista com 50 caminhões, R\$12.500 por mês de despesa, ou mais de R\$150.000 por ano. Nesta conta não foram considerados as trocas do lubrificante, onde não seria necessária a reposição do óleo consumido, mas não invalida o fato que independente se for um caminhoneiro ou um

frotista, o consumo de óleo, se não controlado, pode ter um impacto econômico grande. Ou seja, também é um fator que pode definir a escolha do equipamento no momento da compra.

A partir dos anos 90, quando a legislação de emissões veiculares passa a tomar forma, o uso de catalisadores no sistema de escapamento dos veículos a gasolina ficou mais comum. Em veículos a Diesel, a restrição na emissão de material particulado torna-se um sério problema. A partir daí, o consumo de óleo torna-se um ponto fundamental no desenvolvimento de motores, pois:

- a) Para motores a gasolina a preservação do catalisador está intimamente ligada ao consumo de óleo, uma vez que a queima dos componentes do óleo lubrificante contamina os elementos químicos que compõem o catalisador, o que pode inutilizá-lo rapidamente.
- b) Para motores Diesel, a emissão de material particulado nos gases de escape está intimamente ligada ao consumo de lubrificante e, chega representar até 70% deste poluente segundo alguns estudos, como pesquisado por Inowe (1997)<sup>1</sup> em paper do SAE.

Com o aumento do rigor da legislação sobre emissões dos motores, o uso de catalisador para tratamento dos gases de escape tornou-se indispensável para conseguir atingir os limites impostos. No Brasil, de acordo com especialistas do setor, ônibus e caminhões nos próximos três anos devem também iniciar o uso de catalisadores e se tornará um item necessário para se alcançar os limites de emissões a partir de 2012 (informação verbal).

Dessa forma, o consumo de óleo lubrificante passa a ter uma importância fundamental para preservação dos catalisadores automotivos e emissão de poluentes, e, assim, o controle e diminuição do consumo de óleo lubrificante são inevitáveis nos próximos anos.

Aplicações de grandes motores que, por exemplo, a alguns anos atrás consumiam 40g/h de óleo, hoje consomem 20g/h e nos próximos anos 5g/h poderão passar a ser os valores normais a serem medidos. Com a diminuição do consumo de óleo lubrificante, as técnicas de medição precisam ser melhoradas, pois para o desenvolvimento de motores, os métodos tradicionais como o de pesagem, precisam de um elevado número de horas para se obter um valor preciso de consumo que é a principal motivação deste trabalho.



O gráfico da Figura 1 ilustra a medição obtida pelo processo de medição tradicional do consumo de óleo de drenar e pesar, com intervalo entre medições de 10 horas, em um motor em teste de durabilidade cíclica, durante o desenvolvimento de um componente do motor.

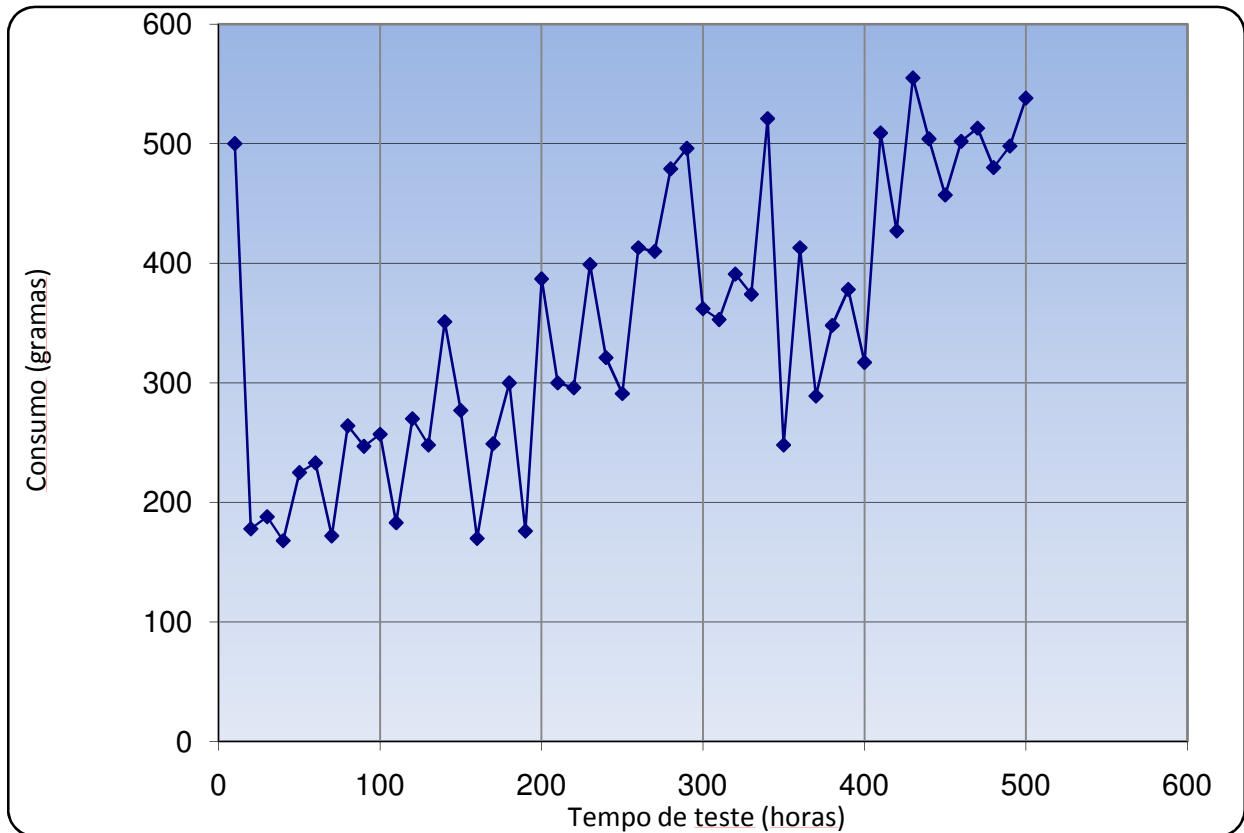


Figura 1: Gráfico de consumo de óleo de um motor durante o teste de durabilidade de 500h medido pelo método de drenar e pesar a cada 10 horas. Dados obtidos no laboratório de testes da MWM International na planta de Canoas - RS.

Como podemos observar, temos uma variação de até 100% entre uma medição e outra, o que indica a imprecisão do método. Por exemplo, entre 330 e 340 horas esse motor consumiu 520 gramas de óleo e, nas 10 horas seguintes observou-se um consumo de 240 gramas. Sabe-se, entretanto, que o consumo de óleo possui um comportamento muito mais estável que esse mostrado na Figura 1. O gráfico de consumo de óleo da Figura 2a, mostra no amaciamento de um motor, executado em laboratório, o comportamento estável com o passar do tempo, quando se usa um método mais preciso de medição. Note que houve 40 medições nas primeiras 20 horas de vida do motor com uma dispersão mínima entre cada uma. Na Figura 2b, (a direita) em um teste comparativo entre o método de pesagem e esse mais preciso, por radio isótopos (explicado no

cap. 1.1.2) desenvolvido pela Dana Corporation, podemos observar como é na realidade o consumo de óleo com o passar do tempo.

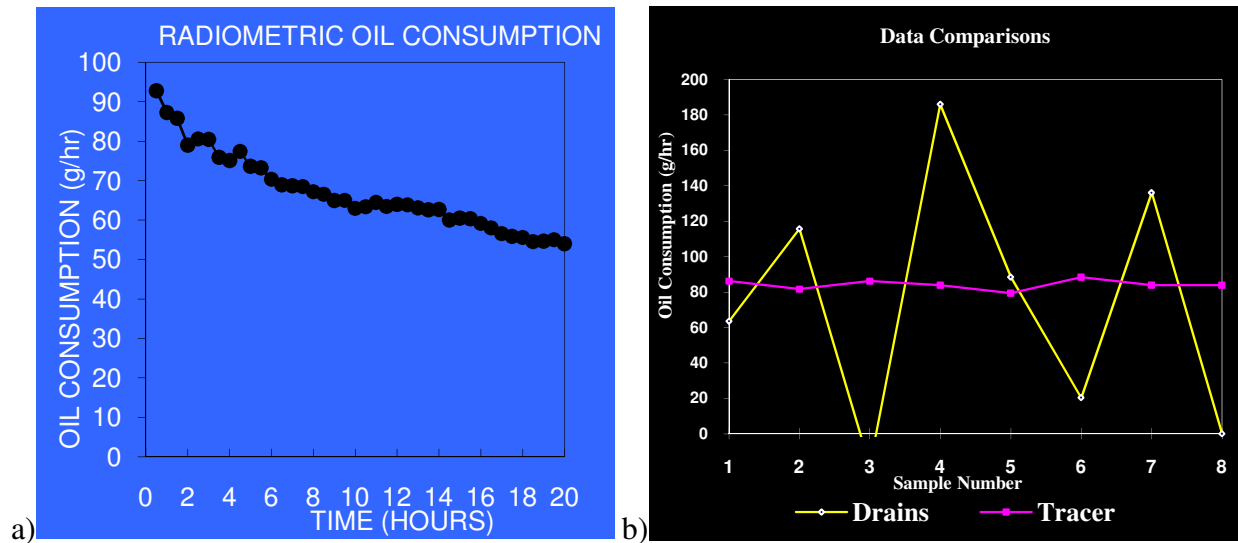


Figura 2: Gráfico comparativo entre o método de drenar e pesar e um método por radio tracer, que utiliza isótopos radioativos desenvolvido pela Dana Corporation, fabricante de autopeças.

Outras técnicas de medição foram e tem sido desenvolvidas e utilizadas pelas empresas de autopeças no desenvolvimento de motores e seus componentes, mas, em função da dificuldade da detecção desse parâmetro, são normalmente complexas e bastante custosas.

Uma alternativa para contornar essa situação é aprimorar os métodos usuais de medição a fim de manter a simplicidade e obter valores precisos em poucas horas de teste, que é o tema deste trabalho

## 1.1 Revisão da literatura

Para medição de consumo de óleo lubrificante de um motor de combustão interna, muitas técnicas têm sido desenvolvidas pelos fabricantes de motores, fabricantes de equipamentos de medição, montadoras, fabricantes de componentes automotivos entre outros.

Existem vários trabalhos já divulgados que aperfeiçoa os métodos atuais, onde se tem o objetivo de obter mais precisão na medição. Devido as inúmeras técnicas já desenvolvidas, para facilitar a discussão, classifiquei todas em dois grandes grupos:

1) Medição direta, quando se monitora diretamente a quantidade de óleo do cárter com o passar do tempo;

2) Medição indireta, quando se mede outros parâmetros do motor e por meio de cálculos correlacionar essas medições com o consumo de óleo, por exemplo, detectando-se a concentração de substâncias nos gases de escape que são provenientes do óleo lubrificante.

### **1.1.1 Técnicas de medição direta**

Basicamente seguem o seguinte princípio:

1 - Coloca-se uma quantidade de óleo conhecida no motor.

2 - Executa-se o ciclo de trabalho desejado.

3 - Ao final do ciclo de trabalho, mede-se a quantidade restante de óleo.

A medição direta pelo monitoramento do volume de óleo no cárter é um método muito utilizado devido a sua simplicidade. A forma mais rudimentar é o acompanhamento pela vareta de nível do motor, onde se observa a quantidade de óleo inicial que com o passar do tempo irá diminuir. Acrescenta-se, então, mais óleo até obter o mesmo nível original e se obtém, dessa forma, o consumo sofrido nesse intervalo de tempo. Esse é o método utilizado pelo usuário final para monitorar o consumo de óleo de um carro, trator ou equipamento industrial, por exemplo. Com base nesse princípio, podemos considerar todas as outras técnicas de medição direta semelhantes a essa, porém, um pouco mais sofisticadas, onde se tenta controlar com mais precisão os parâmetros que influenciam na medição. Entretanto, invariavelmente, encaixam-se em uma fórmula simples: quanto maior a precisão, maior a complexidade e o custo da medição.

Conforme comentado anteriormente, um método bastante simples e utilizado praticamente por todos os fabricantes de motores, componentes automotivos e montadoras, é método de drenar e pesar. Também conhecido como “drain and weight”, ele consiste em colocar uma massa de óleo conhecida no motor, executar um ciclo de trabalho por 10 ou 20 horas, drenar o óleo do motor e, ao final desse ciclo, medir a quantidade de óleo que restou. Obtém-se com a diferença de massas, o consumo sofrido nesse intervalo de tempo (vide Figura 3).

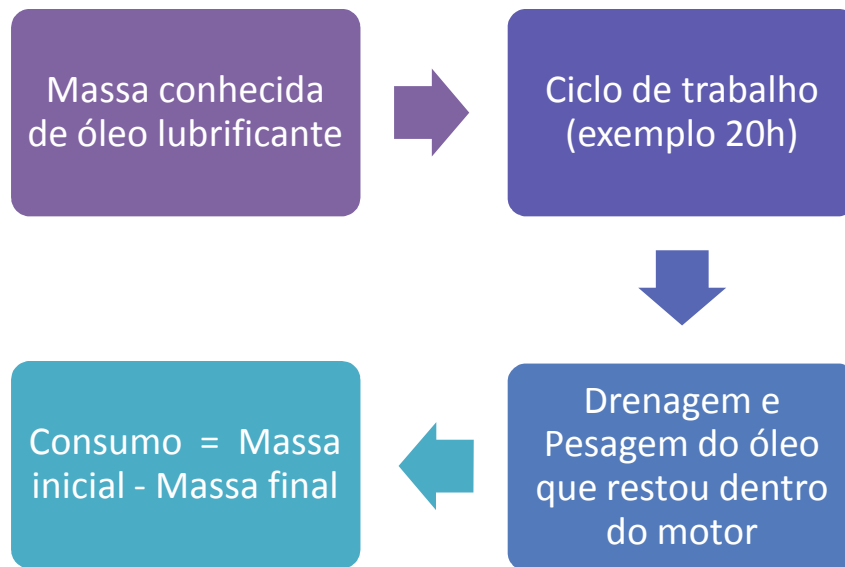


Figura 3: Funcionamento do método de medição de consumo de óleo lubrificante de drenar e pesar

O ponto fundamental desse método é o procedimento de pesagem, que precisa ser rigorosamente seguido para se obter alguma precisão e segue basicamente os seguintes passos:

- 1) Estabilizar o motor a uma determinada rotação e carga.
- 2) Aguardar a temperatura do óleo atingir o valor de referência (normalmente 90°C).
- 3) Parar o motor e iniciar a contagem do tempo.
- 4) Drenar o óleo por um determinado período de tempo (10 a 30 minutos).
- 5) Pesar a quantidade de óleo no final desse tempo.
- 6) Colocar uma massa conhecida.
- 7) Executar o ciclo de trabalho que se deseja medir.
- 8) Executar novamente os itens 1 a 4.
- 9) Drenar e pesar o óleo novamente.
- 10) Avaliar o consumo de óleo sofrido.
- 11) Repetir esses passos novamente até conseguir um resultado confiável.

É um método simples, pois requer para medição apenas um balde, uma balança e um cronômetro. Para garantir a precisão desse método, é necessário um rigoroso controle dos parâmetros que influenciam na quantidade de óleo drenado como: temperatura do óleo, tempo de

Outro sistema bastante antigo de medição direta, foi desenvolvido e patenteado pela por Klink (1965)<sup>2</sup> da Daimler-Benz na Alemanha, que utiliza um sistema semi fechado de óleo entre o motor e um tanque. Uma bomba circula o óleo entre esses dois reservatórios constantemente, conforme Figura 4.

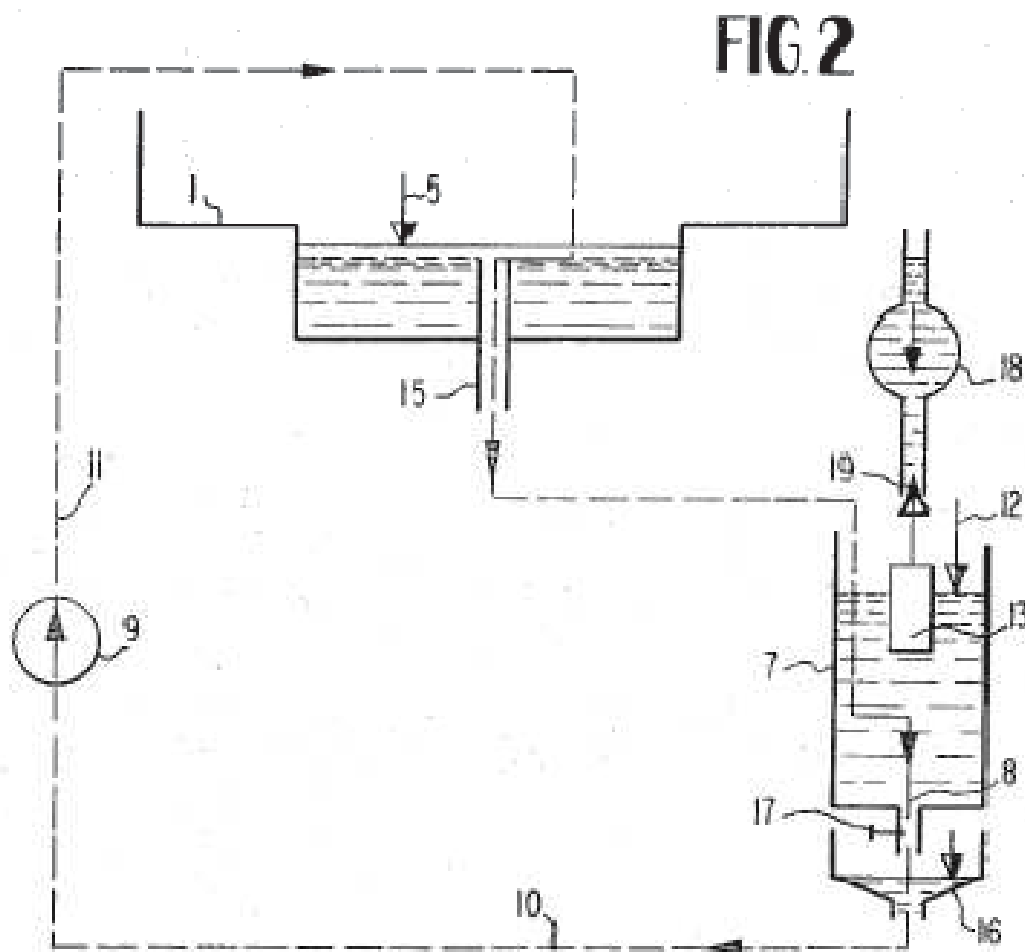


Figura 4: Esquema do sistema desenvolvido pela Daimler-Benz em 1965 para medição de consumo de óleo, onde um circuito semi fechado mantém o volume de óleo do cárter do motor (1) e reservatório (7) sempre constantes. Um outro reservatório (18) alimenta o sistema para manutenção dos níveis.

Com o passar do tempo, o óleo consumido pelo motor causa a diminuição do volume do tanque anexo. Outro reservatório alimenta o sistema e mantém os dois níveis sempre constantes. A diminuição da quantidade de óleo desse reservatório indica o consumo do motor.

Alguns sistemas fazem uso de vasos comunicantes e simplesmente acompanham o nível de óleo do cárter por meio de um reservatório próximo ao motor. Nesse reservatório externo utilizam-se equipamentos precisos para identificar a mudança no nível de óleo, como, por exemplo, um sensor de ultrasom, a exemplo do patenteado na Alemanha por Gerve (1986)<sup>3</sup>, conforme mostra a Figura 5.

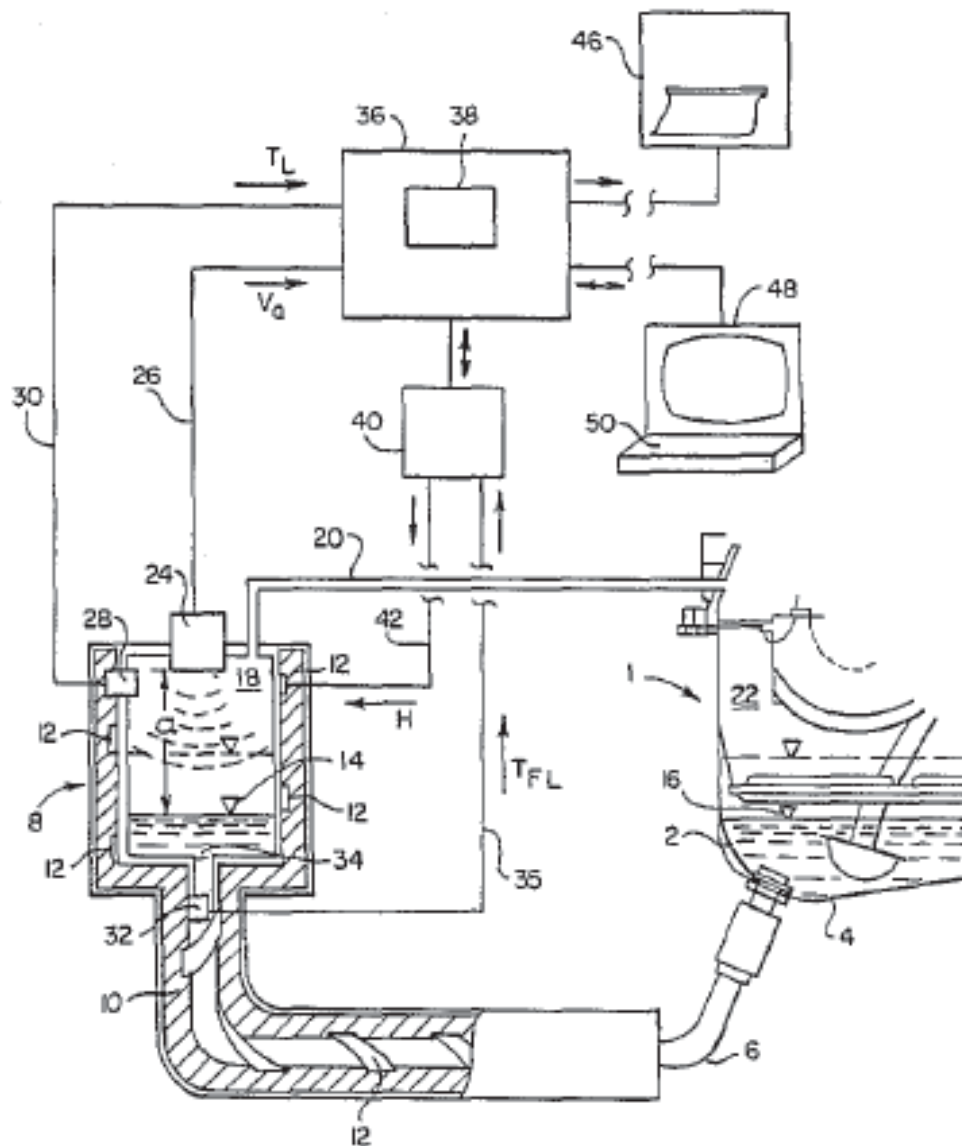


Figura 5: Sistema patenteado em 1986 para medição por vasos comunicantes do nível de óleo em um motor com um sensor ultrasom

É interessante notar a colocação de um tubo (20) que liga o interior do motor com o reservatório a fim de manter as duas pressões iguais e garantir o mesmo nível dos dois lados do sistema.

Outro sistema de medição de consumo de óleo por meio do acompanhamento do nível no cárter, foi patenteado por Hegemier (1993)<sup>4</sup> da Dana Corporation. Esse sistema, já um pouco mais automatizado, consiste em um reservatório de óleo que se comunica com o motor de modo a indicar exatamente o nível de óleo do mesmo. Esse reservatório possui um flutuador com um detector de posição muito preciso que pode dessa forma, indicar o volume de óleo que está do cárter a cada momento. Com o motor em funcionamento, numa determinada condição de rotação, carga e temperatura do óleo, é tomada como referência uma posição inicial do flutuador. Um processador procura continuamente essa condição de referência (temperatura, rotação e carga) durante funcionamento do motor e, quando a encontra, compara a posição encontrada com a posição inicial pré-determinada; então, caso encontre alguma diferença, bombeia um pequeno volume de óleo para dentro do cárter, a fim de voltar o flutuador para posição inicial. O sistema bombeia pequenos volumes até que não exista mais diferença entre o nível inicial e o último nível lido. Esses pequenos volumes bombeados são precisamente conhecidos uma vez que provém de um reservatório de peso controlado. Dessa forma, como o volume de óleo que o motor perde é conhecido, assim como o momento que se detectou essa perda de óleo, pode-se facilmente calcular o consumo em função do tempo. O sistema é bastante complexo e, segundo o próprio autor, precisa ser minuciosamente calibrado para evitar erros. Por ser totalmente automatizado, evita erros humanos relativos a falta de treinamento ou desatenção. A Figura 6 mostra um croqui do sistema:

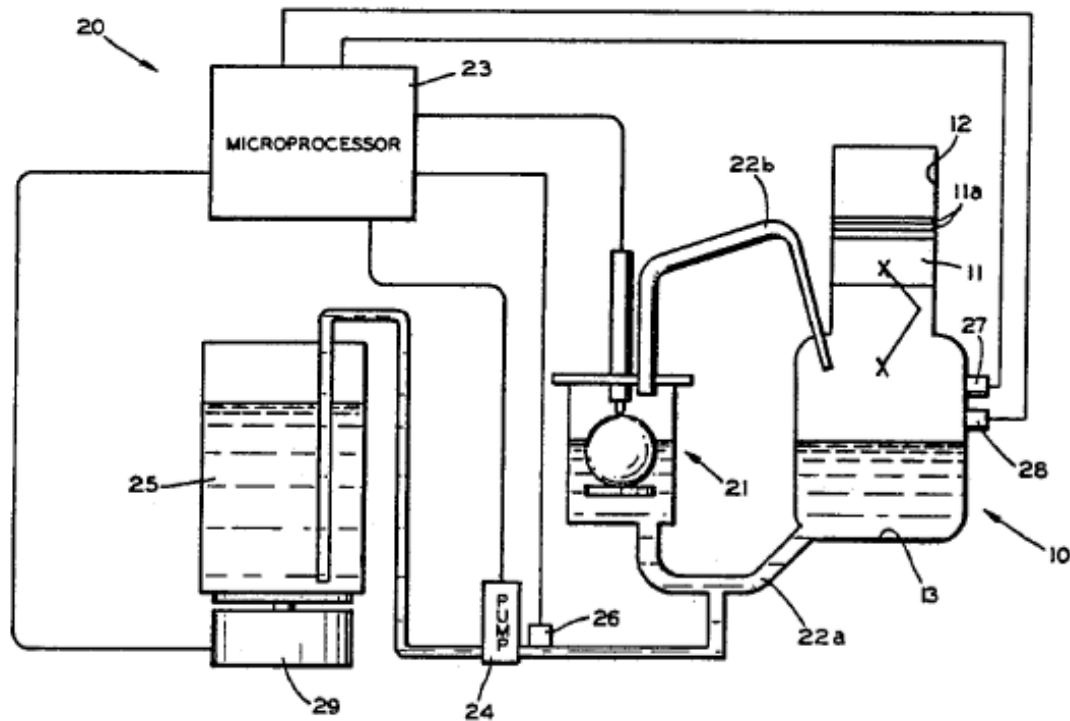


Figura 6: Croqui do sistema desenvolvido pela Dana para medição automatizada de consumo de óleo com vasos comunicantes e flutuador pra indicar o nível

Em um trabalho de investigação da Oronite European Technical Center na Holanda, Dam (1996)<sup>5</sup> estudou a influência do tipo de lubrificante no consumo de óleo em um motor Mercedes Benz OM 364A. Ele utilizou um método para medição de consumo, que mostrou, na prática, a possibilidade de se medir de forma simples e com precisão o consumo de óleo por meio do acompanhamento do nível no cárter. Apenas com uma escala graduada e por meio do princípio de vasos comunicantes, ele monitorou o nível de óleo com uma mangueira transparente ao lado do motor, onde podia identificar o nível no interior do mesmo e obteve melhores resultados que o método tradicional de drenar e pesar, conforme a Figura 7:



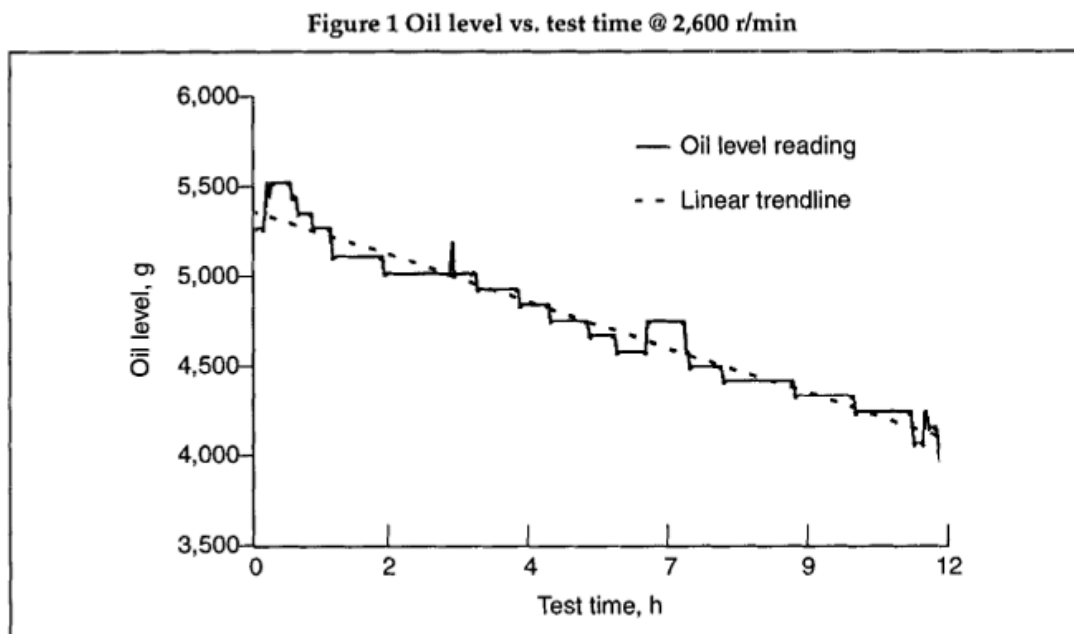


Figura 7: Exemplo de medição de consumo por acompanhamento de nível do cárter, com diversas leituras em apenas 12 horas de teste

A grande vantagem desse sistema foi obter o consumo de óleo durante o teste do motor e não apenas nas drenagens. É um método muito simples e de baixíssimo custo e complexidade. O resultado obtido mostra o grande potencial da medição do consumo de óleo pelo nível no cárter, onde basta apenas desenvolver um sistema mais confiável para as leituras.

Por outro lado, nesse método, as medições podem apresentar grandes erros, especialmente se realizadas por pessoas diferentes (erros de paralaxe e influências na formação do menisco no tubo), o que deixa o método pouco confiável para medições de curto espaço de tempo. Além disso, não foi estudada a influência dos fatores externos ao motor na medição do nível e, assim, não se pôde avaliar a repetibilidade dos resultados, mesmo porque não era o objetivo do trabalho; porém, explicaria algumas divergências nos resultados desse estudo.

Em uma investigação de consumo de óleo lubrificante pelo turbo compressor do motor, Payri (2005)<sup>6</sup>, da Universidade politécnica de Valencia (Espanha), criou um método de medição muito interessante. Ele montou um circuito fechado de lubrificação do turbo composto basicamente por um reservatório de óleo com seu peso precisamente medido e uma bomba para circular o óleo do reservatório para o turbo.

Manni (2002)<sup>7</sup>, da Agip Petroli fez um experimento similar para estudar a influência do tipo de óleo no consumo do turbo compressor e divulgou em um paper do SAE. Os croquis dos dois sistemas são mostrados na Figura 8:

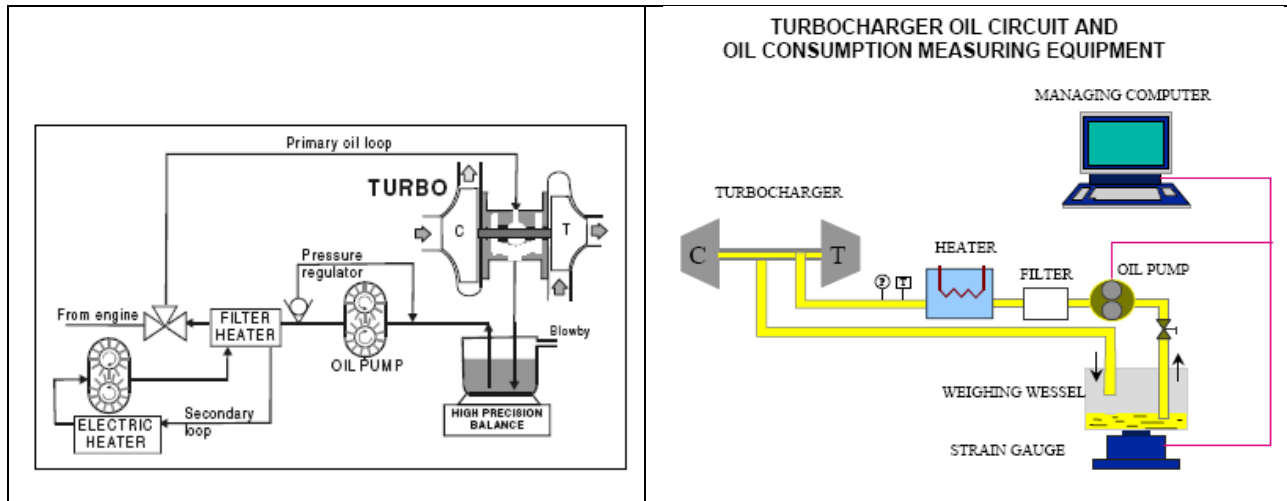


Figura 8: Sistema de medição de consumo de óleo lubrificante de um turbo compressor que utiliza um circuito fechado com uma balança. A esquerda o sistema da Universidade de Valencia e a direita o sistema desenvolvido pela Agip Petroli.

O que fica muito claro nesses dois trabalhos é a importância de se controlar a temperatura do óleo para esse tipo de leitura contínua, uma vez que pequenas variações de temperatura têm enorme influência na quantidade de óleo que permanece no circuito, mais especificamente no dreno do turbo até o reservatório controlado. Uma vez que o restante do circuito está completamente cheio de óleo, esse tem seu volume constante. Outra observação importante é a possibilidade de se criar um modelo de correção do peso em função da temperatura com resultado muito bom, como mostrado na Figura 34 mais a frente.

Um sistema semelhante, também com o uso de bomba e balança para medição de consumo de óleo de um motor, já foi desenvolvido pela AVL Automotive GmbH da Áustria apud Weng (2000)<sup>8</sup>. Nesse sistema, chamado AVL 4001 (já em desuso), é necessário parar o motor para fazer a pesagem, assim como no método de drenar e pesar, entretanto, o processo é realizado automaticamente, de forma que o operador não interfere na medição, o que diminui o risco de erros. Esse é na verdade, apenas uma automação do método de drenar e pesar. A Figura 9 mostra seu funcionamento:

## ENGINE OIL CONSUMPTION MEASURING EQUIPMENT

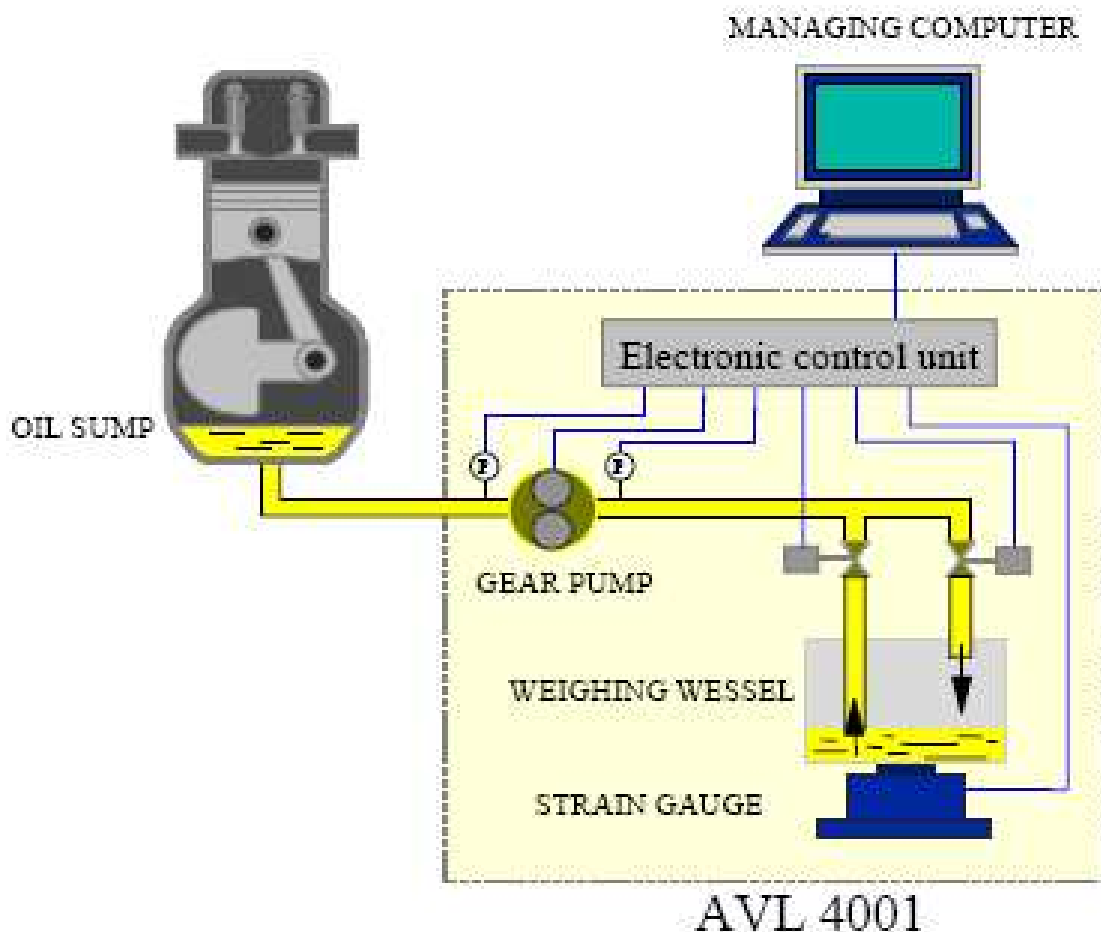


Figura 9: Sistema de medição desenvolvido pela AVL para medição de consumo de óleo lubrificante. A unidade de controle eletrônica pára o motor, drena o óleo, pesa, devolve o óleo para o motor e reinicia o ensaio.

Posteriormente, a mesma AVL Automotive GmbH<sup>9</sup> desenvolveu um novo equipamento para medição de consumo de óleo lubrificante que é comercializado nos dias de hoje (2010, data deste trabalho) a um valor de aproximadamente US\$40.000. O princípio de funcionamento é o uso de um tubo de sucção que retira, com a ajuda de uma bomba de engrenagens, parte do óleo do motor, que o deixa próximo ao nível mínimo. Esse óleo vai para dentro do equipamento onde é pesado e em seguida retorna novamente para o cárter. Um croqui desse sistema pode ser observado na Figura 10:

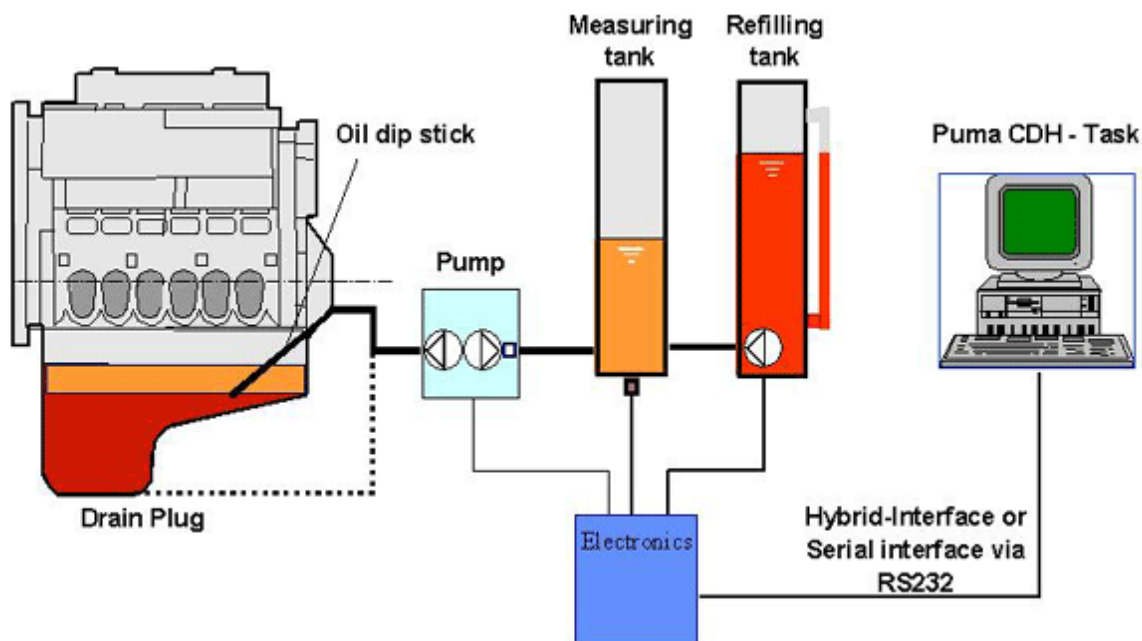


Figura 10: Esquema de funcionamento do sistema comercializado pela AVL para medição de consumo de óleo lubrificante com o motor em funcionamento.

Uma grande vantagem desse método é o fato da medição ser realizada com o motor em funcionamento e, evita interrupções no teste para pesagens. A precisão declarada pelo fabricante é de  $\pm 10\text{g}$  para a maioria dos motores (cárter com área de  $4000\text{cm}^2$ ), mas pode chegar a  $\pm 5\text{g}$  para motores pequenos (cárter com área de  $600\text{cm}^2$ ).

A Toyota motor Corp. tem alguns sistemas patenteados por Masatoshi (1984)<sup>10</sup>, de medição de consumo, dentre os quais destacamos dois que utilizam o sistema por vasos comunicantes. Por meio de diferentes formas se consegue monitorar o nível de óleo e, conseqüentemente, o consumo. Croquis desses sistemas seguem na Figura 11.

No primeiro, JP59079815 uma bomba mantém os níveis de óleo do motor e de um tanque anexo a ele, no mesmo valor e circula esse óleo continuamente. A medida que o motor consome o lubrificante, um reservatório com peso monitorado alimenta o sistema a fim de manter o nível inicial e, dessa forma, detecta-se o consumo do motor. O outro sistema, JP59063522, também com vasos comunicantes, utiliza um sensor óptico que detecta a alteração do nível em um tanque ao lado do motor. Com a diminuição, é acionado um sistema que, por meio de um cilindro que penetra em um reservatório, injeta óleo no cárter. Ao se monitorar o deslocamento do cilindro é

possível conhecer a quantidade de óleo injetada para se manter o nível inicial e, dessa forma, calcula-se o consumo do motor.

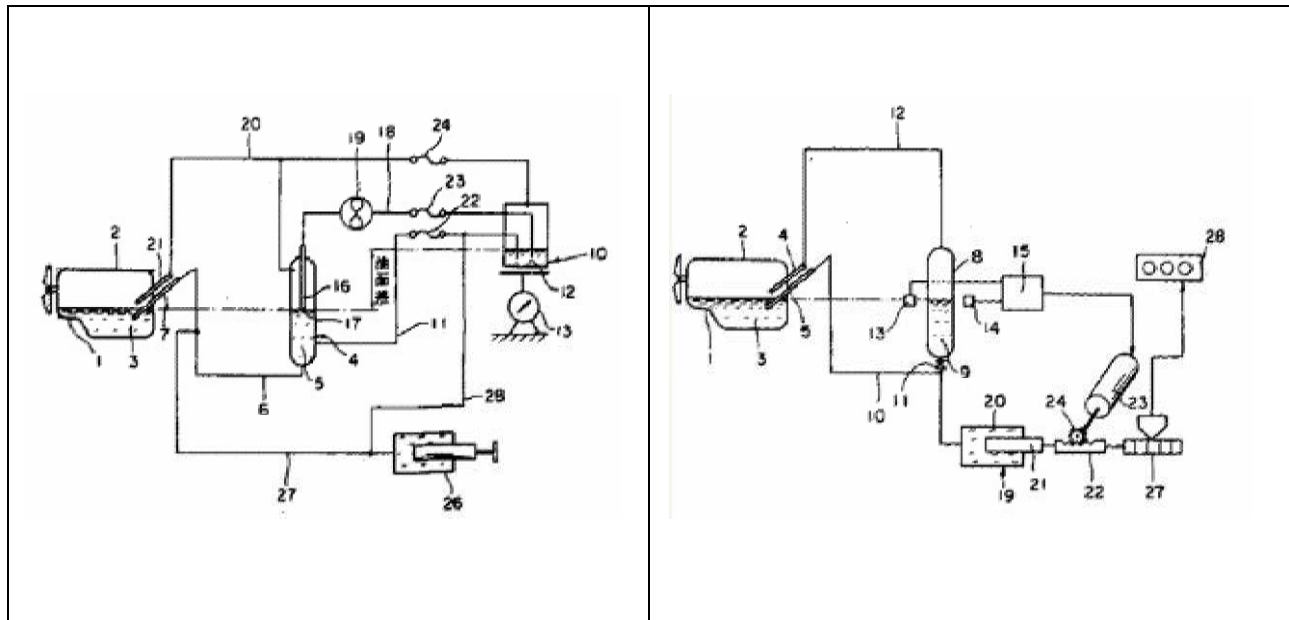


Figura 11: Sistemas de Masatoshi patenteados pela Toyota para medição de consumo de óleo automatizada. Em ambos utiliza-se o princípio de vasos comunicantes e por sistemas distintos, mantém-se o nível de óleo sempre no mesmo ponto. Tais sistemas monitoram a quantidade de óleo injetado no circuito para se manter o nível dos mesmos. Na esquerda a patente JP59079815 e na direita a patente JP59063522, ambas de 1984

A Cummins, fabricante independente de motores Diesel, também criou seus próprios sistemas de medição de consumo de óleo. Na Figura 12, é possível visualizar dois deles. A figura da esquerda mostra o primeiro desenvolvido em 1984 explicado por Weng (2000)<sup>8</sup>, que não possui elevado nível de automação. Nele se mantém o nível de óleo do motor constante por meio de um sistema de bóia e um reservatório. A medida que o motor consome o óleo, o nível diminui e a bóia libera a passagem do reservatório de peso monitorado para o tanque de nível idêntico ao motor. Pela diminuição do peso do reservatório sabe-se o consumo de óleo.

O sistema da direita, divulgado também pela Cummins em paper do SAE por Weng, monitora o volume de óleo do cárter com sensores de nível. Um sensor no motor mede a alteração do nível e um sistema de controle alimenta-o com óleo a fim de voltar ao valor inicial. A quantidade de óleo enviada do reservatório para o motor é monitorado por outro sensor de nível e a partir desse o consumo é calculado.

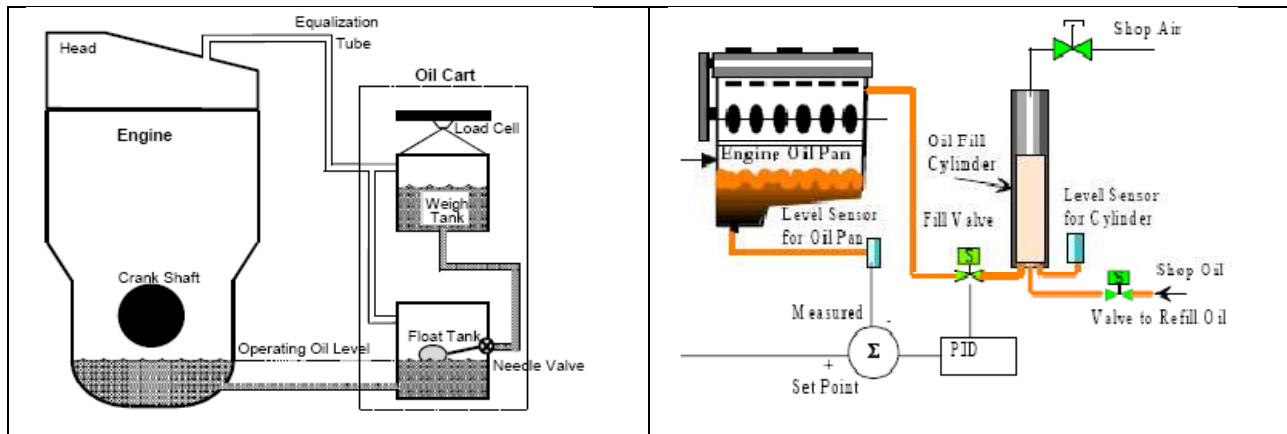


Figura 12: Sistemas de medição direta de consumo de óleo desenvolvido pela Cummins Engine Co. que utiliza o princípio de vasos comunicantes e sensor de nível para detectar o nível de óleo do motor e medir seu consumo.

Outras técnicas são citadas pelo artigo de Weng, como o de um sistema de medição de nível por sensor capacitivo conforme Figura 13 (lado esquerdo), que não requer muitas explicações pela simplicidade do mesmo e, do lado direito que mostra o sistema desenvolvido pela Federal Mogul, fabricante de autopeças, semelhante a outros que circula continuamente o óleo entre o motor e um tanque externo a fim de manter um nível constante. A medida que o óleo é consumido pelo motor, o tanque superior completa o nível para voltar ao valor inicial e, como esse tem seu peso monitorado, é possível mensurar o consumo de óleo.

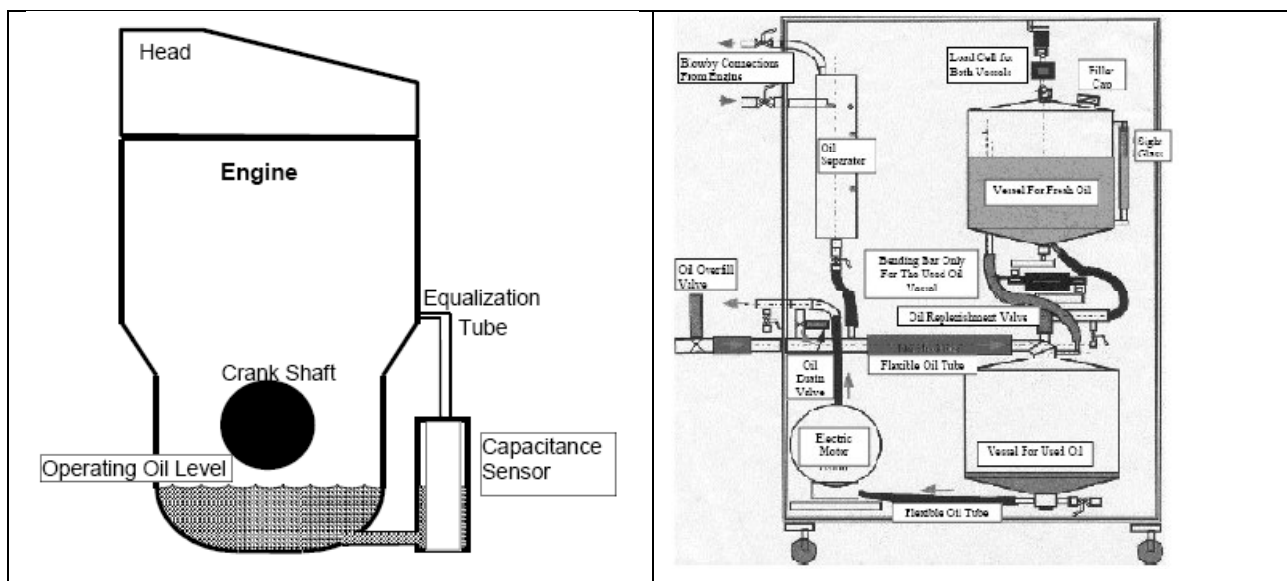


Figura 13: Sistema de medição de consumo de óleo com acompanhamento do nível por sensor capacitivo a esquerda e sistema desenvolvido pela Federal Mogul a direita, com manutenção do nível de óleo constante e monitoramento do peso dos tanques para cálculo do consumo de óleo.

### 1.1.2 Técnicas de medição indireta

Esses métodos consistem basicamente em detectar a concentração de certas substâncias nos gases de escape do motor e comparar com as concentrações das mesmas no óleo lubrificante, que são previamente conhecidas. Nessa técnica, utilizam-se substâncias que sejam facilmente detectadas, que podem ser adicionadas ao óleo como Bromo e Cloro, ou provenientes dele mesmo, como o enxofre, fósforo, zinco, magnésio, cobre e cálcio.

As grandes vantagens desses métodos são a precisão e a rapidez em se obter resultados confiáveis de consumo e, conseqüentemente, a redução dos custos do teste relacionados a esse fato. E do outro lado, as grandes desvantagens estão no elevado custo para o desenvolvimento do método, equipamento e sistema necessário para medição, além de geralmente ter alta complexidade, que necessita mão de obra especializada para sua operação.

Entre os métodos de detecção dessas substâncias, os mais utilizados são espectrometria por luz para substâncias não radioativas e fluorescência nos casos de marcação química do óleo com isótopos radioativos, que veremos mais a frente.

Nos sistemas que utilizam espectrometria a luz, existe um lado emissor e outro receptor. O lado emissor consiste em uma fonte de luz que pode emitir uma faixa bastante ampla de comprimentos de onda como, por exemplo, laser ou lâmpada halógena, ou fontes de comprimentos restritos como ultravioleta, infravermelho e diodos emissores de luz (LED). Esses últimos não necessitam filtros para retirar os comprimentos de onda que não interessam. No outro lado, receptor, existe um detector ou espectrômetro para detectar quanto da luz emitida foi absorvida pelos gases de escape.

O princípio de funcionamento baseia-se no fato que os elementos químicos do óleo quando passam pela câmara de combustão do motor, devido a alta temperatura, aparecem na forma gasosa nos gases queimados, o que permite serem detectados em função da absorção óptica característica que cada substância possui (comprimento de onda característico).

Foley (2005)<sup>11</sup> da SPX Corporation, patenteou um sistema de espectrometria a laser que utiliza os próprios elementos do óleo lubrificante para identificar a quantidade de óleo consumida pelo motor. Uma dificuldade relatada por ela nesse método é a proximidade do valor de comprimento de onda dos elementos do óleo com os elementos naturais dos gases de combustão, o que pode induzir a uma leitura errada. Por exemplo, o zinco que é normalmente presente nos

óleos lubrificantes absorve a luz ultravioleta em 214 nanômetros, que é muito próximo do monóxido de nitrogênio NO (226 nanômetros), do butadieno C<sub>4</sub>H<sub>6</sub> (210 nanômetros) e da amônia NH<sub>3</sub> (208 nanômetros), que estão todos em abundância nos gases de escape. Usa-se, então, os elementos como o fósforo, por exemplo, que tem comprimento característico bastante diferenciado dos outros gases de combustão significativos. Apesar de que nos últimos anos os espectrômetros para o range de luz visível ou ultravioleta se tornaram menores e mais baratos, conforme comentado anteriormente, o sistema e equipamento são bastante complexos. Em especial, o desenvolvimento para correlacionar de forma confiável o consumo de óleo com a concentração desses gases no escapamento é bastante custoso e demorado. Para se ter uma idéia, Benson (1998)<sup>12</sup> da University of Northern Iowa pela John Deere, desenvolveu um equipamento similar com espectrometria a laser a um custo de US\$758.000.

Outra forma de medir o consumo pela análise dos gases queimados do motor é através da adição de um elemento químico conhecido no óleo lubrificante. Um exemplo desse método é o sistema patenteado pela Cummins Engine Company e desenvolvido por Dimitroff (1982)<sup>13</sup>. Nesse trabalho, a medição de consumo é feita com a adição de “dialkilditiofosfato” não radioativo no óleo lubrificante. Ao se medir a concentração deste elemento nos gases de escape é possível determinar o consumo de óleo do motor. A Figura 14 mostra um croqui desse sistema.

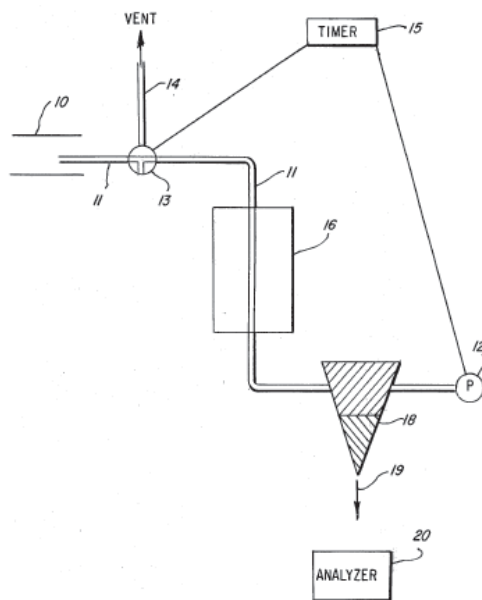


Figura 14: Croqui do sistema de medição de consumo de óleo com marcação química no óleo com compostos de zinco. Os gases são condensados e na forma líquida é feita a medição da quantidade de zinco presente.



Nesse método, condensa-se (numero 16 no croqui) uma vazão conhecida de gases de escape (10) por 5 minutos; passa-se por um separador líquido-líquido (18) que contém um orgânico n-decano. A parte decantada (19) é colocada numa célula colorimétrica (20), adicionado água deionizada, hidróxido de sódio e uma solução de zinco. Misturam-se tudo e, então, no calorímetro, após 5 minutos, se obtém a quantidade de zinco, a qual é diretamente proporcional ao consumo de óleo lubrificante. De acordo com o autor, é possível obter com esse método a precisão de 0,023g/cvh, isto significa em um motor de 150cv, por exemplo, uma precisão de 3,5g/h.

No entanto, o elemento mais pesquisado para medição indireta é dióxido de enxofre,  $\text{SO}_2$ , provavelmente em função da facilidade de detectá-lo e também pela rapidez na obtenção de cada medida (cerca de 30 segundos de acordo com o método). O  $\text{SO}_2$  é o resultado da fácil combinação do enxofre com o oxigênio durante e depois da combustão e é oriundo do óleo lubrificante e do combustível. Diversos métodos já foram desenvolvidos para detectá-lo e existem registros de trabalhos nesse sentido desde 1974 em paper do SAE por Kawamoto, (1974)<sup>14</sup>.

Uma maneira bastante utilizada para detecção do  $\text{SO}_2$  é por espectrometria com diodo variável a laser, divulgado por Benson, comentado na página anterior, ou, por exemplo, no trabalho de Carduner (1992)<sup>15</sup> da Ford Motor Company. Apesar do bom tempo de resposta, possui uma desvantagem quanto a sua precisão, que, apesar de muito boa, na maioria das condições, é muito pobre quando temos presença de água, que, diga-se de passagem, é abundante nos gases de combustão. Dessa forma, requer rigorosos controles para se obter boa repetibilidade nos resultados. A sensibilidade é muito boa e chega-se a detectar até cerca de 1ml de óleo a cada 1000km, para um carro médio, por exemplo. Para garantir que todo o enxofre se transforma em  $\text{SO}_2$ , um catalisador de platina é usado antes do espectrômetro.

Além da interferência da água, a janela por onde o feixe de laser entra na câmara de medição absorve cerca de 5% da luz emitida o que influencia também na medição. Outras interferências que se acredita haver nesse método é a presença de hidrocarbonetos não queimados e carbono; porém, isso é uma suposição da própria autora em função de algumas discrepâncias na medição durante os testes realizados. Por exemplo, a diferença encontrada em 13 medições com o motor gasolina 3,8L V6 aspirado em uma mesma condição foram de 9,02 a 18,12g/h, o que mostra a grande dispersão do método. O croqui da Figura 15 mostra o esquema construtivo do equipamento.



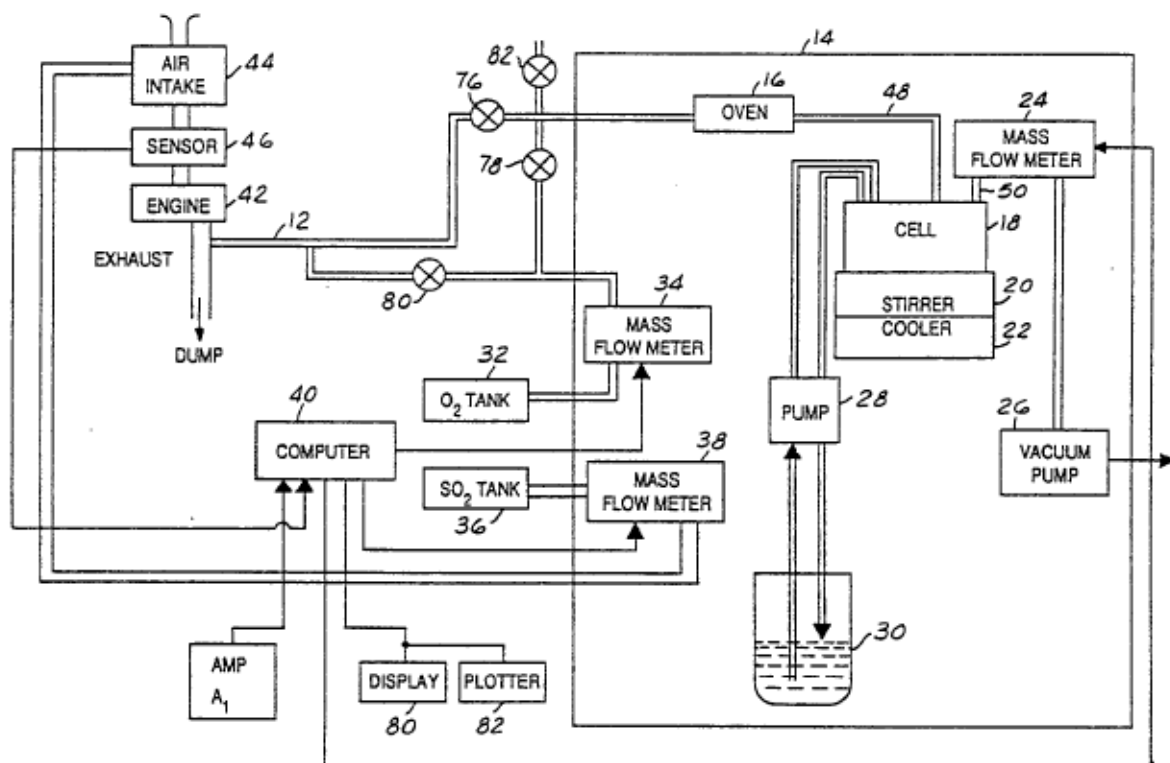


Figura 16: Sistema de medição de consumo de óleo pela detecção de Dióxido de enxofre nos gases de escape por meio de uma célula eletroquímica desenvolvido pela Ford em 1992.

Outro método bastante comum é a marcação do óleo com isótopos radioativos, que já foi desenvolvido e utilizado por várias empresas. Existem registros de métodos com isótopos radioativos em papers do SAE desde 1969 (Knop, 1969)<sup>17</sup>. Um sistema bastante interessante é aquele estudado por Zellbeck (2000)<sup>18</sup> da universidade de Dresden, Alemanha. Ele utiliza um isótopo radioativo, Brometo  $^{82}\text{Br}$ , onde várias porções do óleo podem ser individualmente marcadas de forma a detectar cada porção nos gases de escape. O incrível, é a possibilidade de se medir o consumo de óleo de vários tipos de lubrificante em um mesmo teste e, detecta-se dessa maneira, o consumo proveniente do comportamento de cada um deles, da evaporação e da queima de cada tipo de óleo testado. Para essa medição, os gases de escape são lavados em uma solução de nitrato de prata, que tem a capacidade de capturar o bromo radioativo lá presente. Nesse método, 20 minutos são necessários para medição de consumo em cada condição do motor. O brometo radioativo tem a meia vida de apenas 36 horas, o que favorece o uso de equipamentos comuns para medição e pouca preocupação com relação segurança devido a radiação. Por outro lado, é necessário sempre porções novas de óleo por não ser possível seu armazenamento. Esse é um método bastante preciso, assim como outros métodos radioativos,

porém, uma série de cuidados são necessários para se obter uma boa precisão nos resultados, tais como: marcação uniforme do óleo lubrificante; não alterar as propriedades do óleo; pequena volatilidade da substância de marcação; e prevenção sobre a absorção do marcador nas paredes do motor, no tubo de escape e nas paredes do equipamento de captura do brometo. A Figura 17 mostra um esquema construtivo desse sistema.

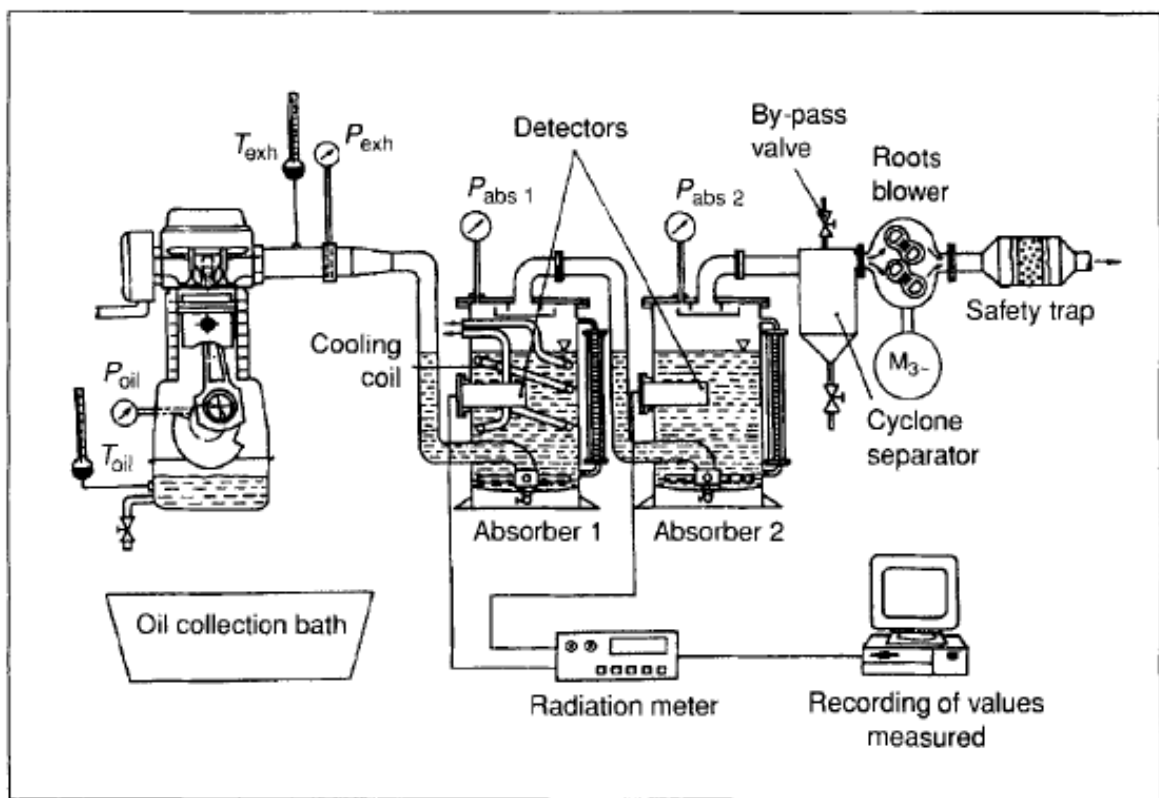


Figura 17: Método de medição de consumo de óleo com marcação do óleo lubrificante com brometo radioativo  $^{82}\text{Br}$ , desenvolvido pela Universidade de Dresden, Alemanha. O esquema mostra a lavagem dos gases de escape em uma solução de nitrato de prata

Outro trabalho bastante criativo que usa isótopos radioativos foi desenvolvido pela Toyota, por Inowe (1997)<sup>19</sup>, com objetivo de analisar a influência do consumo de óleo de cada componente do motor no material particulado. No estudo, ele adicionou enxofre radioativo  $^{35}\text{S}$  no óleo e detecta-se presença do mesmo nos gases de escape na forma de dióxido de enxofre marcado  $^{35}\text{SO}_2$ . O material captado nos gases de escape é completamente queimado para garantir a total conversão de  $^{35}\text{S}$  em  $^{35}\text{SO}_2$  e, então, reagido com  $\text{H}_2\text{O}_2$  para se formar  $\text{H}_2^{35}\text{SO}_4$ . Mede-se a intensidade de radiação emitida por essa solução relacionado-a com o consumo de óleo. Com

essa estratégia utilizada por Inowe, pode-se utilizar qualquer combustível sem a preocupação com o enxofre contido nele, pois agora o enxofre do óleo lubrificante é diferente (radioativo) das outras fontes de enxofre como o combustível e o ar. Esse é um diferencial em relação aos outros métodos de detecção de SO<sub>2</sub>, que sempre perdem precisão por influência do enxofre presente no combustível (vide croqui na Figura 18).

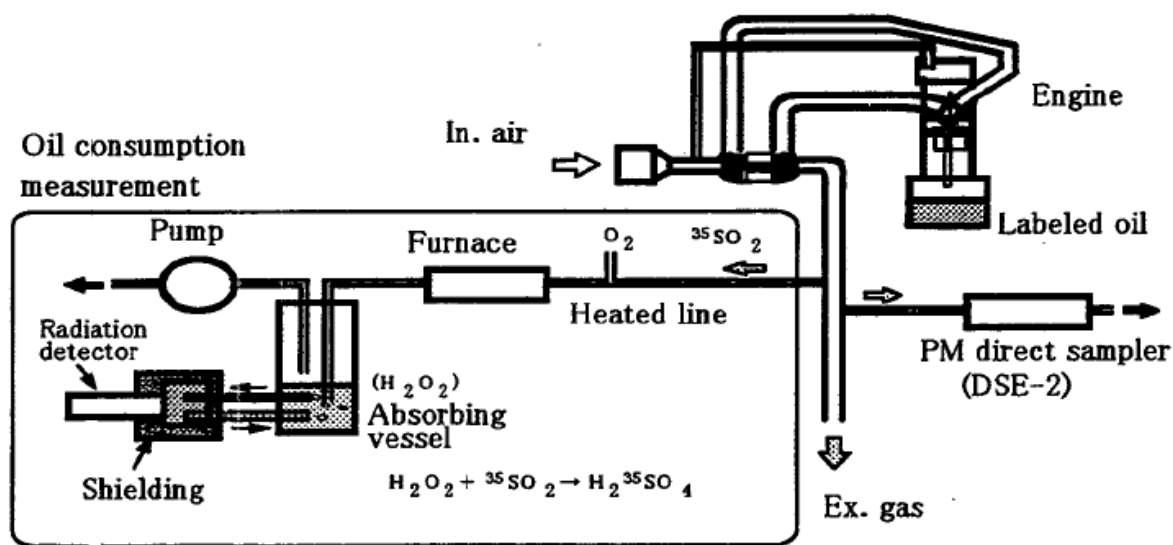


Fig.3 Oil consumption measurement (<sup>35</sup>S tracer method) <sup>(8)</sup>

Figura 18: Sistema desenvolvido pela Toyota para medição de consumo de óleo de diferentes formas para avaliar a formação de material particulado. Nesse caso usou enxofre radioativo, <sup>35</sup>S e carbono <sup>14</sup>C no óleo do motor.

Segundo aquele autor, o método possui uma grande precisão, suficiente para detectar separadamente o óleo que vem dos anéis e das guias de válvula. Ainda nesse mesmo trabalho, para medir a quantidade de óleo não queimado, o método utilizado é também com um isótopo radioativo, o <sup>14</sup>C. O mesmo é sintetizado para que se incorpore no óleo como uma cadeia de hidrocarboneto. Detecta-se a presença dele no escape por meio da captura do material particulado com um filtro e, após a pesagem, retira-se o óleo a ser medido por meio de lavagem com um solvente orgânico. Por contador de cintilação obtém-se a quantidade de <sup>14</sup>C presente no líquido e é possível relacionar este valor com o consumo de óleo lubrificante do motor que não foi queimado. Foram ainda separados os circuitos de óleo do cabeçote e turbo compressor a fim de

avaliar a participação do consumo de cada componente e também a influência deles na formação do material particulado do motor (vide croqui da Figura 19).

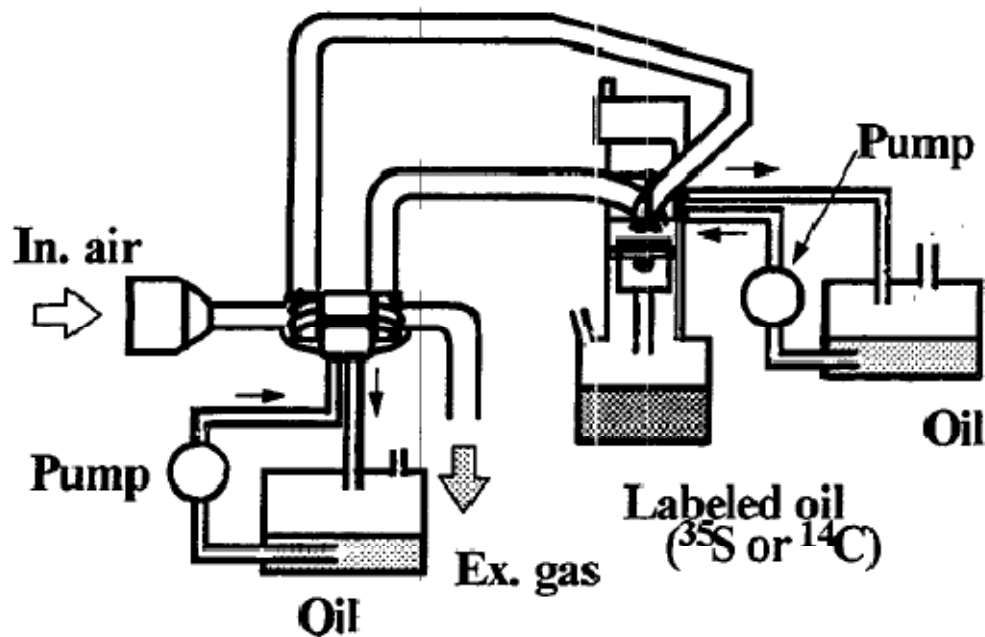


Figura 19: Separação dos circuitos de óleo efetuado pela Toyota para medição separada do consumo apenas das guias de válvulas do turbo compressor e dos anéis de pistão.

Ainda com isótopos radioativos, a Dana Corporation<sup>20</sup> desenvolveu um sistema com o uso de Trítio  $^3\text{H}_2$ , onde o óleo lubrificante é sintetizado para que em algumas cadeias de hidrocarbonetos do óleo o hidrogênio seja substituído por trítio. O princípio de funcionamento é o seguinte: sabe-se que o hidrogênio só pode vir de 3 fontes:

$\text{H}_2$  do combustível, que é um hidrocarboneto ( $\text{H}_x\text{C}_x$ )

$\text{H}_2\text{O}$  contido no ar de admissão

$\text{H}_2$  do óleo lubrificante que também é composto por cadeias de hidrocarbonetos e, nesse caso, marcado quimicamente com trítio  $^3\text{H}_2$ .

Por balanço de hidrogênio é possível, então, determinar uma relação entre o trítio encontrado nos gases de escape e o consumo de óleo lubrificante. Para medição do trítio, é realizada a condensação da água dos gases de escape e, então, por cintilação é possível determinar a concentração de  $^3\text{H}_2\text{O}$  na água condensada.

O esquema da Figura 20 ilustra o sistema:

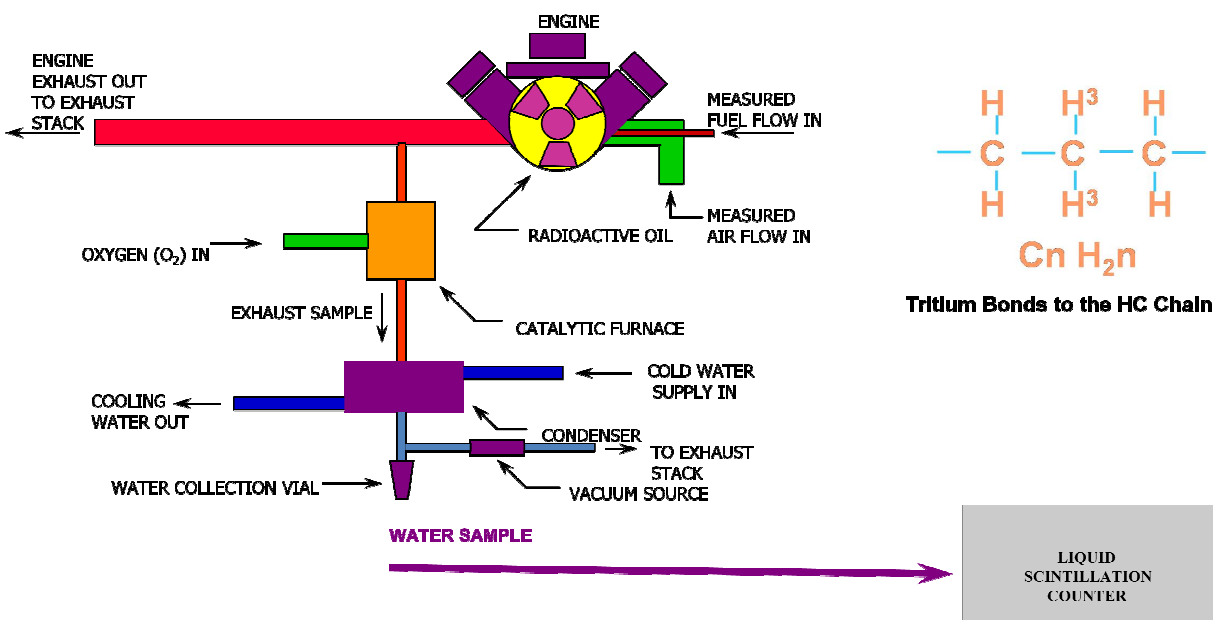


Figura 20: Sistema de radio tracer da Dana Corporation para medição de consumo de óleo por meio da marcação radioativa do óleo lubrificante com Trítio  $^3H$

Uma grande vantagem do sistema é a manutenção das propriedades do óleo lubrificante original, uma vez que não é adicionado nenhum aditivo no óleo, além disso, tem sua precisão e repetibilidade como pontos fortes, como pode ser observado na Figura 2.

Para medição de consumo de óleo em tempo real, Lee (1991)<sup>21</sup>, da General Motors, patenteou um método que utiliza marcadores não radioativos; o brometo e cloreto na forma de bromo e cloro orgânico. Estes são adicionados ao óleo e quando queimados se transformam em brometos e cloretos hidrogenados. Uma amostra dos gases de escape é coletada e colocada em uma linha de absorção, onde os mesmos podem ser detectados com a aplicação de radiação monocromática transmitida por meio da amostra na frequência de absorção dos componentes analisados. Dessa forma, é possível medir a quantidade dos isótopos HCl e HBr pela utilização de espectroscopia a laser com diodo variável que facilmente detecta esses dois componentes.

Outro método que não altera o óleo do motor e não utiliza isótopos radioativos foi desenvolvido no Japão por Arai (1993)<sup>22</sup> do Centro de Engenharia Avançada da ISUZU. Nesse trabalho, para rastrear o óleo lubrificante, usa-se os próprios componentes do óleo que são encontrados nas cinzas dos gases de escape do motor tais como, cálcio, zinco e fósforo. Ali foi possível reduzir o tempo de medição de consumo para um décimo do tempo usual do método de drenar e pesar. Para detecção, dois métodos são utilizados e acordo com a substância que se

deseja detectar: espectrometria de absorção atômica e espectrometria a plasma de dupla indução. O método consiste em coletar o material particulado em um filtro, de maneira similar a medição de quantidade de material particulado por pesagem. O material coletado é decomposto em uma solução de ácido sulfúrico, ácido nítrico e peróxido de hidrogênio, depois colocado em água régia e finalmente evaporado. Após, uma porção é decomposta em ácido hidrocloreídrico e fervido em água. Esta solução é, então, analisada pelos espectrômetros, com a aspiração da solução para um maçarico a plasma ou queimador. Apesar da precisão do método ter melhorado em relação ao usual teste de drenar e pesar, foram relatados problemas com interferências de outros componentes presentes na solução para leitura no espectrômetro, sendo recomendado ser mais estudado a fim de melhorar sua precisão.

Além desses métodos, dezenas de outros podem ser encontrados em artigos e patentes; entretanto, podemos considerá-los variações desses métodos citados nesse capítulo.

## **1.2 Comparativos de alguns sistemas de medição**

O grande problema das técnicas de medição de consumo de óleo está no balanceamento de:

- a) Complexidade do sistema de medição.
- b) Precisão.
- c) Custo dos equipamentos.
- d) Custo da medição.
- e) Custo de desenvolvimento do método

Vemos que, hoje, os sistemas desenvolvidos estão amarrados nesse balanceamento e não existe um sistema perfeito, ou seja, que seja simples, com boa precisão e que tenha um baixo custo total. Invariavelmente, sistemas de medição precisos são complexos e tem um custo de desenvolvimento e de equipamentos bastante elevado. Da mesma forma, sistemas mais simples têm a precisão comprometida, tempo de teste maior, mas possuem baixo custo dos equipamentos de medição.

Para podermos discutir este problema, vamos primeiramente, ter uma idéia de quais valores de consumo, custo de equipamento, custo de teste e precisão são necessários medir.

Para os valores de consumo, segue na Figura 21 um exemplo de mapa de consumo de óleo lubrificante de um motor médio, de 180cv, cilindrada total de 6,0L comercializado por volta do



ano 2000 conforme estudo de consumo de óleo lubrificante apresentado no congresso SAE Brasil por Gerhard (1992)<sup>23</sup> da MWM International Motores:

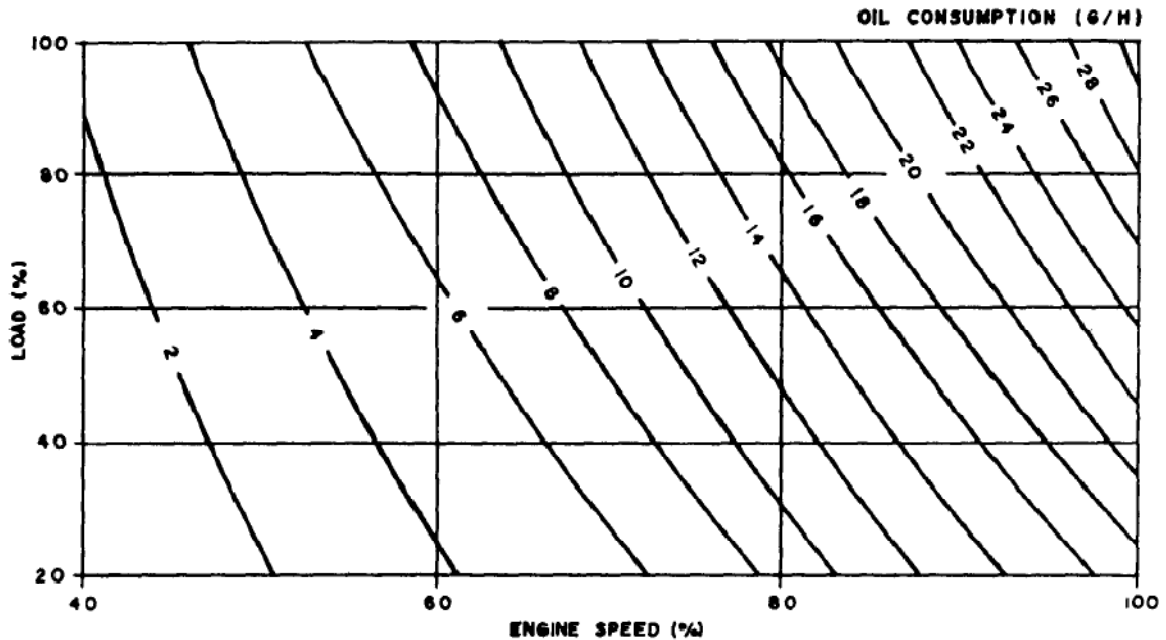


Figura 21: Curvas de iso-consumo de óleo lubrificante de um motor Diesel médio de 6 Litros de cilindrada total e potência de 180cv, aplicado em caminhões médios e ônibus.

Se considerarmos que, em geral, procuramos obter o consumo de óleo lubrificante em potência máxima ou cargas parciais e que os motores consomem cada vez menos óleo lubrificante, podemos considerar que o menor valor de consumo que procuramos medir é de até 2g/h. Em outras palavras, se utilizarmos uma conversão média usada para teste de motores de 100 km para cada hora de teste de motor; equivale a um consumo percebido pelo usuário de 0,2 litros para cada 10000 km, o que é coerente com valores encontrados para uma ampla gama de motores para veículos comerciais.

Para ficar mais fácil a compreensão dos outros elementos da equação, (custo/complexidade/precisão), vamos adotar três exemplos de medição para ilustrar isso.

Primeiramente num motor grande: para medir o consumo de óleo, por exemplo, para aplicação de um caminhão de 57 toneladas, motor de 370cv, com cilindrada total de 9,3L e injeção eletrônica, a uma precisão de +/- 3g/h, teríamos:

### **1.2.1 - Método de drenar e pesar**

Neste método de medição mais simples, por pesagem, os custos dos equipamentos são:

Balde -	US\$2
Balança -	US\$500
Cronômetro -	US\$20

O tempo de teste usual para medição pelo método de drenar e pesar são normalmente 3 ciclos de 20h, num total de 60h, de onde se calcula a média das três medições. Isto se deve justamente a imprecisão do método que pode chegar a mais de 100% de diferença entre uma leitura e outra como visto anteriormente, de forma que alguns fabricantes usam até 100h para esse tipo de procedimento. O custo do teste, somado com a ocupação do banco de US\$40,00 por hora e custo do Diesel de US\$1,00 por litro é de aproximadamente:

60h de dinamômetro:	US\$2400
3600 litros de Diesel:	US\$3600

A complexidade desse método é mínima, de forma que um mecânico capaz de realizar o ensaio. Assim, o custo total do teste é de US\$522 de equipamento e US\$6000 de custos variáveis (combustível + ocupação da bancada de teste).

### **1.2.2 - Método de drenar e pesar automatizado**

Com o uso de um equipamento da AVL Automotive GmbH <sup>24</sup>, AVL oil consumption meter 406, temos um custo de aquisição desse equipamento de US\$ 40.000, conforme cotação realizada em novembro de 2009.

O fabricante do equipamento garante para este tipo de motor uma precisão de +/- 10g em cada medição e, um teste comum nesse caso, é de aproximadamente 5h, portanto o custo do teste será de aproximadamente:

5h de dinamômetro:	US\$200
300 litros de Diesel:	US\$300

A complexidade desse método é moderada e é necessário um técnico treinado para operação do equipamento.

Sendo assim, o custo total do teste é de US\$40.000 de equipamento e aproximadamente US\$500 de custos variáveis.

### 1.2.3 - Método de medição indireta de SO<sub>2</sub> por espectrometria a laser

Um equipamento de espectrometria a laser (não existe disponível no mercado) tem um custo de desenvolvimento e construção conforme trabalho desenvolvido na tese de doutorado de Benson (1998)<sup>12</sup> da University of Northern Iowa de US\$758.000

O tempo de teste para cada medição para esse tipo de sistema varia de poucos segundos até alguns minutos. Por exemplo, o desenvolvido pela Ford por Carduner (1992)<sup>15</sup>, citado anteriormente, precisa de 30 segundos para cada medição; o sistema de espectrometria de Benson, 10 minutos; e outros, como o Método de brometo radioativo que leva 20 minutos para cada medição (no caso do artigo de Zellbeck<sup>18</sup>)

Portanto, se considerarmos o tempo de calibração do equipamento, condicionamento do motor e, em alguns casos, necessidade de várias medições, vamos estimar o tempo de teste de 1h para cálculo dos custos.

1h de dinamômetro: US\$40

60 litros de Diesel: US\$60

A complexidade nesse caso é alta e é necessário um engenheiro para realização dos experimentos.

Dessa forma, o custo total do teste é de: US\$760.000 de equipamento e aproximadamente US\$100 de insumos.

A Tabela 1 resume estes resultados:

Tabela 1: Complexidade, precisão e custos de diferentes tipos de teste de consumo de óleo lubrificante de um motor de aplicação heavy duty (caminhão de PBC 57ton).

Tipo de teste	Complexidade	Precisão	Custo do equipamento de teste (US\$)	Custo do ensaio (US\$)
Pesagem manual	BAIXA	BAIXA	520	6.000
Pesagem automatizada	MÉDIA	MÉDIA	40.000	500
Espectrometria a laser	ALTA	ALTA	760.000	100

Fica claro nesta tabela que a opção mais adequada é definida economicamente pelo número de testes que se prevê fazer.

Para melhor visualizar, o gráfico da Figura 22 simula o custo para diferentes quantidades de testes para cada técnica de medição mencionada.

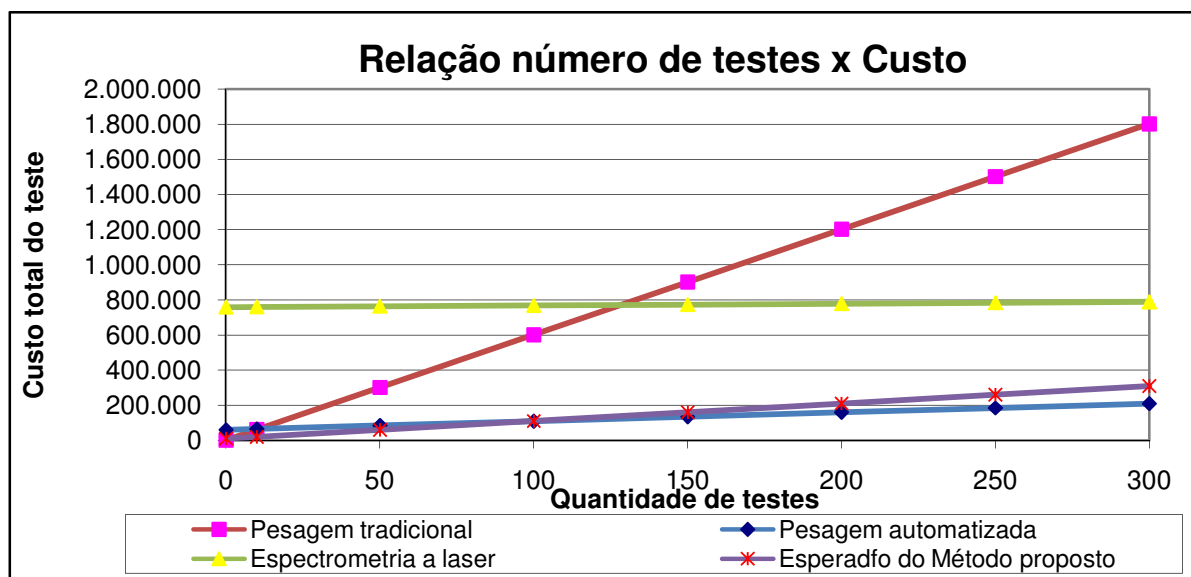


Figura 22: Gráfico que mostra o custo total do teste para 3 métodos de medição diferentes para um motor aplicação heavy duty (caminhão 57 ton.), em diferentes quantidades de testes.

Vê-se que até aproximadamente 10 testes, o método de pesagem é mais vantajoso financeiramente; porém, acima disso, um investimento inicial maior torna-se mais interessante. Se avaliarmos o outro extremo, o mesmo estudo para um motor considerado pequeno, como, por exemplo, um motor de uma pick-up leve de 2750 kg, motor de 160cv e cilindrada total de 3,0L, para se obter uma precisão de +/- 3g/h, chegamos aos seguintes valores da Tabela 2.

Tabela 2: Tabela que demonstra os custos de diferentes tipos de teste de consumo de óleo de um motor de aplicação de pick-up leve (PBT 2750 kg)

Tipo de teste	Custo do equipamento de teste (US\$)	Custo do teste
Pesagem manual	220	3900
Pesagem automatizada	40.000	325
Espectrometria a laser	700.000	65

Da mesma forma, para melhor visualizar, o gráfico da Figura 23 simula o custo para diferentes quantidades de testes em cada técnica de medição.

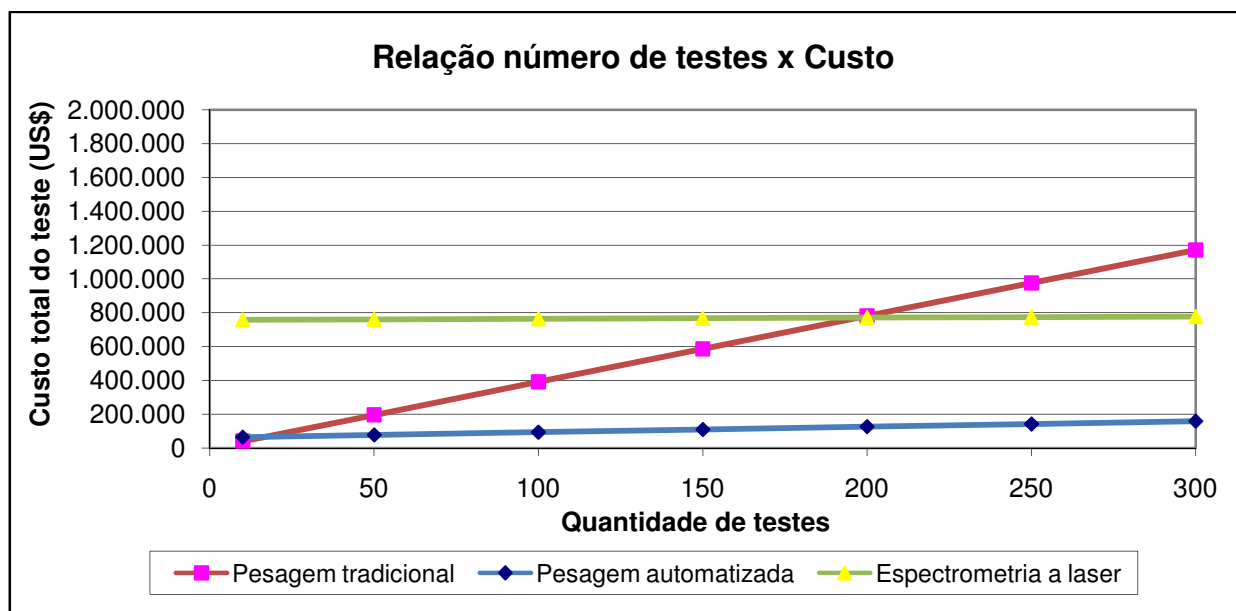


Figura 23: Gráfico que mostra o custo total do teste para 3 métodos de medição diferentes de um motor aplicação ligh duty (pick-up média de PBT de 2750kg), para diferentes quantidades de testes.

Vê-se que até aproximadamente 20 testes o custo do método tradicional é menor que métodos mais sofisticados e, acima disso, o investimento em equipamentos mais sofisticados passa a ser vantajoso.

Além dos testes específicos de consumo de óleo, este parâmetro também é acompanhado em testes de durabilidade. As paradas constantes dos testes a cada 10 ou 20 horas, por cerca de 1,5h para realização da drenagem e pesagem, acarreta uma ocupação adicional da bancada de testes de 6 a 13% que tem um custo mínimo de US\$40 por hora. Com base nisso, é desejável também que o equipamento de medição de consumo de óleo lubrificante tenha a capacidade de realizar a medição sem a necessidade de interrupção do teste de durabilidade.

### 1.3 Objetivo

Tendo em vista que o método tradicional de drenar e pesar para medição de consumo de óleo lubrificante, ainda utilizado pela maioria das empresas do ramo de motores, tem um custo elevado, longa ocupação da bancada de testes, demora na obtenção de resultados, entre outros problemas, este trabalho tem por objetivo estudar alternativas para medição de consumo de lubrificante e propor um método que seja simples, preciso e que ocupe menos os dinamômetros de teste de motores.

No seção anterior, já conseguimos observar que um investimento inicial maior em sistemas de medições mais precisos pode ser muito vantajoso economicamente a médio e longo prazo. A outra parte deste estudo visa explorar mais as causas da imprecisão do método de drenar e pesar e propor um método que atenda a quesitos de simplicidade, precisão e custo do teste de medição de consumo de óleo.

A eliminação ou diminuição dos inconvenientes do método de drenar e pesar que serão buscados neste trabalho são:

- 1) Demora na obtenção de resultados (60h para uma medição).
- 2) Elevado tempo de ocupação do banco de teste.
- 3) Imprecisão dos resultados.
- 4) Falta de agilidade na resposta aos clientes e no tempo de desenvolvimento.
- 5) Paradas constantes (a cada 10 ou 20 horas) nos testes de durabilidade, que eleva o tempo do teste de 6 a 13%.
- 6) Contaminação do meio ambiente nas drenagens e enchimentos do motor.
- 7) Contaminação do operador na manipulação do óleo durante as medições.
- 8) Riscos para o operador ao trabalhar com grandes volumes de óleo a alta temperatura.
- 9) Problemas de ergonomia devido a manipulação de até 40 litros de óleo em uma pesagem.

Além disso, tentar escapar de sistemas de manuseios e calibrações complexas deve guiar a escolha do método durante o desenvolvimento deste trabalho, a fim de se obter um equipamento que possa ter seu funcionamento facilmente entendido.

## 2. Metodologia

### 2.1 Proposta de Trabalho

A proposta deste trabalho é a medição de consumo de óleo lubrificante em um tempo de teste menor que 20h e o custo dos equipamentos para medição em menos de US\$10.000. A complexidade deve ser mínima de forma que um técnico possa operar sem dificuldades este equipamento.

Dessa forma, supondo o custo do equipamento em torno de US\$10.000 e tempo de teste em torno de 20h, podemos comparar com os outros métodos vistos anteriormente:

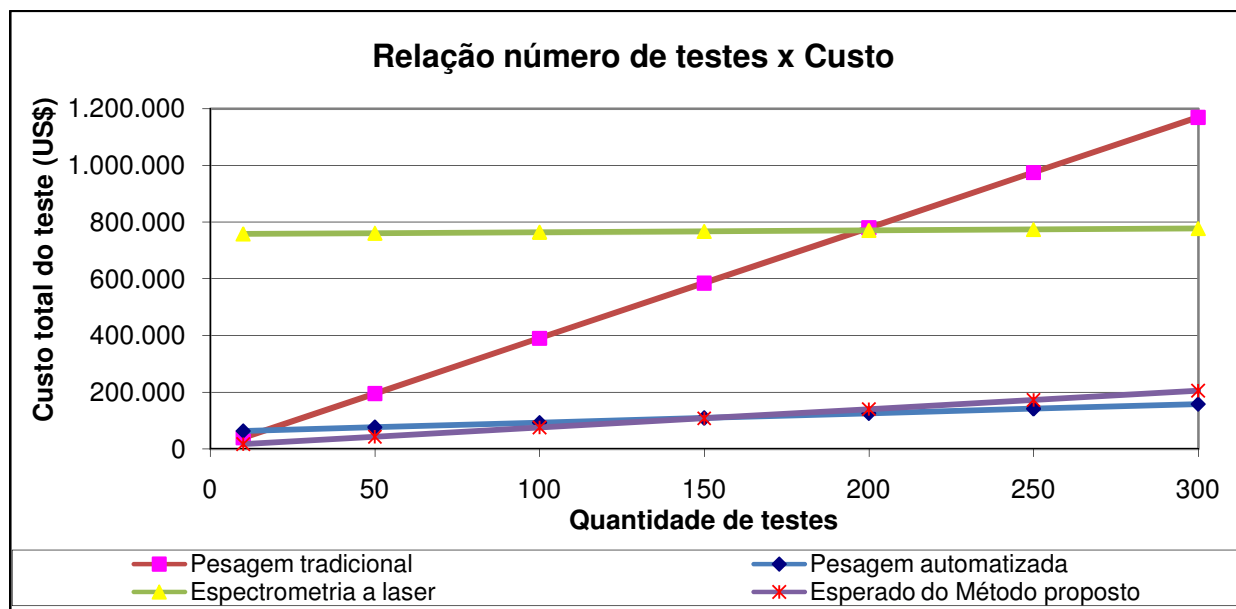


Figura 24: Gráfico que mostra simulação do custo total de teste de consumo de óleo para diferentes quantidades de teste entre os métodos tradicionais e proposto em um motor de aplicação em pick-up leve (PBT 2750kg).

Vê-se que ao atingir as premissas deste trabalho, essa melhoria irá tornar a medição mais vantajosa em relação a outros métodos para até 150 testes. Se compararmos com o teste tradicional, representa uma redução de cerca de 80% dos custos de teste.

## **2.2 Escolha do método de medição**

A premissa inicial do trabalho é ter um sistema simples e de fácil operação. Baseamos-nos nos métodos pesquisados na revisão bibliográfica e após discussão com químicos e especialistas na área de dinamômetro, concluímos que métodos de medição indireta invariavelmente teriam um grau de complexidade elevado, mas, especialmente, demandariam um tempo de desenvolvimento muito grande, o que para este trabalho é um fator crítico.

Desta forma, o número de opções diminui e se restringe aos métodos de medição direta. A idéia inicial foi incorporar mais tecnologia ao sistema tradicional de pesagem em função da grande dispersão dos valores observados nesse método, como mostrado nas Figuras 1 e 2 da introdução, ou desenvolver outro sistema similar aos já desenvolvidos, porém, sem esquecer das premissas iniciais de simplicidade, custo e precisão.

A medição do consumo de óleo por meio do controle de nível de óleo no cárter já foi bastante explorada, como podemos observar na revisão bibliográfica; porém, com a evolução da tecnologia nos últimos anos, novos aparelhos de medição passam a ser possíveis de utilização com resultados muito promissores, especialmente em função da melhoria na precisão de medição e custo dos equipamentos.

Pesquisamos diversas formas de medir o nível de óleo no cárter e estudamos como se poderia adaptar a condição do motor e do teste. O critério básico foi ter uma precisão mínima para o formato do cárter do motor disponível para pesquisa.

Entre os vários sistemas pesquisados, podemos citar alguns possíveis de utilização:

### **2.2.1 Detecção de nível por sensor de ultrasom.**

Se medirmos a distância da superfície do líquido até o sensor é possível mensurar uma variação no volume de óleo. Sensores com precisão na detecção de nível de até 0,1mm estão



disponíveis no mercado, o que já é suficiente na maioria dos casos de medição de consumo de óleo. Na Figura 25 podemos observar um croqui de montagem e funcionamento de um detector de ultrassom.

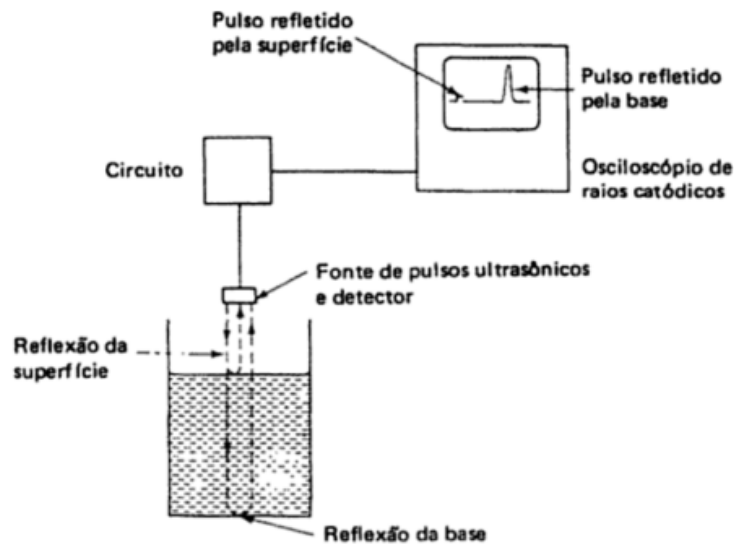


Figura 25: Princípio de funcionamento de um sensor de ultrassom para medição de nível de um líquido. Extraído do livro Instrumentação e controle de Bolton<sup>25</sup> pag. 110

Para nossa aplicação em motores, devido as restrições de locais disponíveis no motor e espaço lateral livre necessário para o feixe de ultrassom, uma montagem possível para isso seria conforme a Figura 26, similar a citada no trabalho de Weng mostrado anteriormente na Figura 13.

### 2.2.2 Detecção de nível com sensor laser.

Também para medir a distância da superfície até o sensor, detectores a laser podem ser encontrados facilmente no mercado com precisão de até 0,002mm na medição de distância. Aqui, também devido as restrições de local para fixar o sensor e pureza do meio (ar) entre o sensor e a superfície, uma montagem possível para esse tipo de sensor seria também conforme a Figura 26.

### Detecção de nível de óleo do motor com sensor laser ou ultrasom

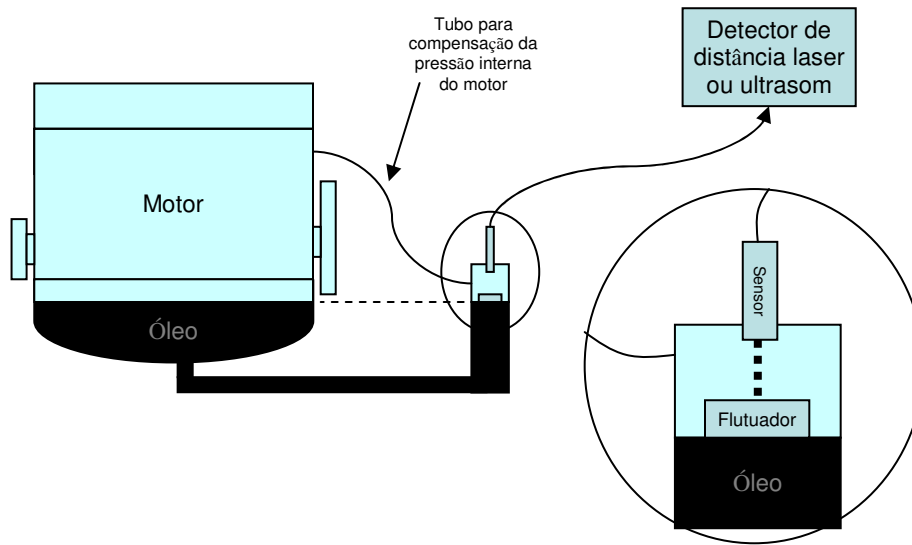


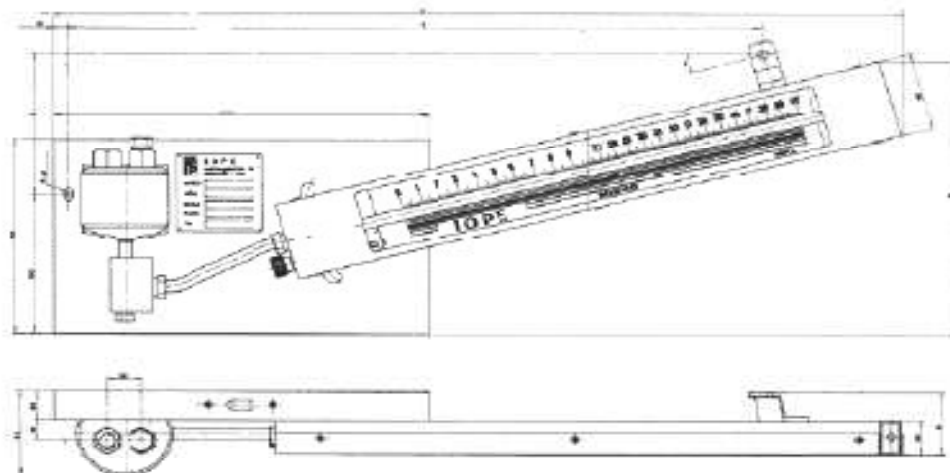
Figura 26: Exemplo de forma construtiva para utilização de um sensor de distância a laser ou ultrasom a fim de detectar o nível de óleo lubrificante do cárter do motor

Consultamos alguns fornecedores de sensores a laser como a Omron e Acuity e testamos a medição com um aparelho Omron ZX LD-100 diretamente na superfície do óleo lubrificante. Concluimos que não é possível detectar com precisão o nível, mas seria obrigatório o uso de um alvo para medição o que fatalmente irá inserir erros na medição.

Além disso, assim como todos os sistemas de vasos comunicantes, teremos também o problema de diferença da temperatura do óleo do motor e do óleo da leitura do nível, que insere erros na leitura conforme demonstrado mais a frente e ilustrado na Figura 35.

#### 2.2.3 Utilização de um tubo inclinado.

A medição do nível por meio da utilização de um manômetro de coluna vertical não é possível devido a resolução, em torno de 0,5mm. Porém, se utilizarmos o princípio do manômetro de tubo inclinado, poderia se alcançar precisão de até 0,1mmca, conforme mostrado no catálogo da IOPE, fabricante de instrumento de medição (Figura 27).



**TABELA "4"**

Modelo	Faixa de Medição (mmCA)	Código	Ângulo de Inclinação	Comprimento da Escala	Subdivisão	Densidade (g/cm³)
MIK 10	10	1	4°40'	150	0,1 mmCA	0,826
MIK 20	20	2	5°30'	250	0,1 mmCA	
MIK 30	30	3	5°10'	400	0,1 mmCA	
MIK 40	40	4	5°45'	400	0,1 mmCA	

Figura 27: Exemplo de medidor de nível inclinado com resolução de 0,1mmca, retirado do catálogo da IOPE, fabricante de equipamentos de medição.

A aplicação do nível inclinado no motor poderia ser conforme a ilustração da Figura 28.

### Detecção de nível de óleo do motor com tubo inclinado

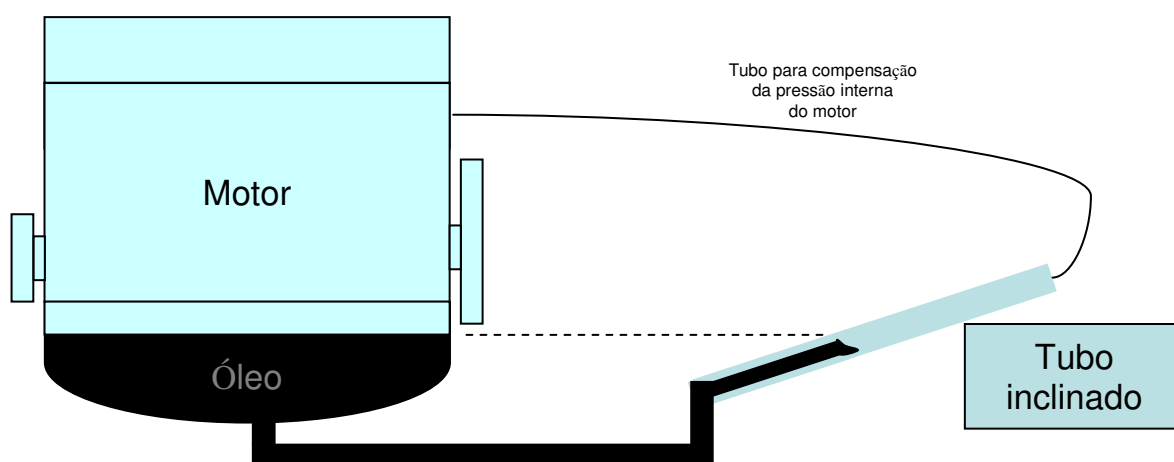


Figura 28: Exemplo de forma construtiva de um sistema de detecção de nível de óleo lubrificante do cárter, por meio do uso de um tubo inclinado.

Em função da simplicidade do método e facilidade de montar experimentos, o sistema por tubo inclinado foi o método escolhido para iniciar as medições. Outro fator interessante é a isenção de erros relacionados a calibração ou mesmo interferências eletrônicas que podem inserir erros ao sistema sem termos consciência disso. Nesse sentido, o tubo inclinado tem a vantagem de permitir uma melhor observação e entendimento do comportamento do sistema. Erros que possam ocorrer ficam bastante evidentes.

#### **2.2.4 Detecção do nível com sensor de pressão diferencial.**

É possível utilizar um sensor de pressão diferencial para medir a variação de pressão manométrica em função da variação de nível. Atualmente (2010, data deste trabalho), temos vários fabricantes de sensores com precisão de até 0,3Pa, o que equivale a variação de 0,03mm no nível. Entretanto, esses sensores mais precisos não suportam líquidos, mas apenas gases, o que traria problemas para essa aplicação, uma vez que nosso meio de medição é o óleo lubrificante. Sensores que suportam líquidos são encontrados com resolução de até 1Pa (0,1mmca), o que já é suficiente nesse caso.

A forma construtiva de um sistema com esse sensor é ilustrado na Figura 29. Temos a grande vantagem de não utilizar o princípio de vasos comunicantes, que elimina, dessa forma, problemas relacionados a temperatura, comentado anteriormente e mostrado na Figura 35. Além disso, é um sistema bastante simples, além da vantagem que as bancadas de teste já estão preparadas para leituras deste tipo de sensor.

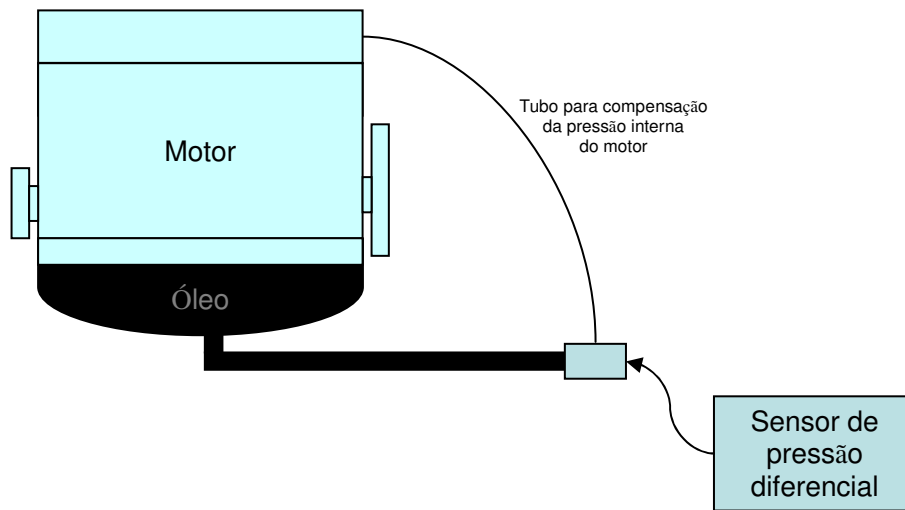


Figura 29: Exemplo de forma construtiva de um sistema de detecção de nível de óleo lubrificante no cárter de um motor por meio da pressão da coluna de líquido que utiliza um sensor de pressão diferencial que possa ter contato direto com o óleo lubrificante.

Dentre os métodos propostos, o uso de transdutor de pressão é, numa primeira análise, o mais adequado, apesar de estarmos presos a sistemas eletrônicos que podem induzir leituras erradas sem termos ciência disso; entretanto, junto com o tubo inclinado usaremos o transdutor de pressão para os testes.

## 2.3 Planejamento do Trabalho

Para efetuarmos a medição de consumo de óleo por meio do monitoramento do nível do cárter, precisamos conhecer os fatores que influenciam na variação do nível de óleo do motor. Podemos efetuar a medição em duas condições:

- 1) Medição com o motor parado; interrompe-se o ciclo de trabalho em intervalos de tempo determinados e se mede o nível do óleo. Assim, obtemos a variação do volume no motor entre cada intervalo. Após parar o motor, o nível irá variar por um tempo, uma vez que teremos que aguardar o óleo voltar ao cárter, sendo necessário, então, definir em que momento será efetuada a leitura. Inicialmente, imaginamos um procedimento similar ao utilizado no método de drenar e pesar, que ficaria assim:

Referenciar o sistema.

- a) Colocar o motor na condição de rotação e carga de referência.
  - b) Aguardar a temperatura do óleo atingir a temperatura de referência.
  - c) Desligar o motor e iniciar a contagem do tempo (exemplo 20 minutos).
  - d) Ao final desse tempo ler o nível de óleo no transdutor ou nível inclinado.  
Consumir o óleo.
  - e) Executar o ciclo de trabalho que se deseja medir.  
Medir o consumo sofrido.
  - f) Executar novamente os itens a, b, c e d.
  - g) Avaliar o consumo de óleo sofrido.
- 2) Medição com o motor em funcionamento, sendo efetuada a leitura do nível de óleo durante o teste. O fator crítico aqui, é que teremos muitas peças internas em movimento durante a medição que causa vibrações e deslocamentos de ar, além de um fluxo de óleo do cárter para os componentes e vice versa que ocorre simultaneamente e, pode causar flutuações no valor lido.

Desta forma, nas análises de erros possíveis, vamos considerar sempre 4 tipos de teste:

- 1) Teste com motor parado.
  - a. Com vasos comunicantes e nível inclinado.
  - b. Com transdutor de pressão.
- 2) Teste com motor em funcionamento.
  - a. Com vasos comunicantes e nível inclinado.
  - b. Com transdutor de pressão.

É necessário, então, definir qual dessas quatro condições é a mais favorável para evitar erros e, assim, fazer uma análise aprofundada dos parâmetros de teste que podem imputar erros na medição.

Se observarmos a bibliografia existente, percebemos que os sistemas mais recentemente desenvolvidos baseados em medição de nível de óleo no cárter normalmente o fizeram com o motor em funcionamento, que num primeiro momento nos indica um provável caminho a seguir.

Para avaliar quais parâmetros podem nos gerar erros de medição, montamos uma árvore de falhas (FTA, Failure Tree Analysis) a fim de avaliar e escolher os parâmetros que podemos ou devemos estudar. Neste método, avaliamos todas as possibilidades de erro. Divide-se cada

possibilidade em caixas e se explora essa até a causa raiz de cada possível erro. É necessário desmembrar o máximo possível para se obter de forma gráfica todas as possibilidades, conforme Figura 31 e Figura 32. Na última caixa aproveitamos para colocar a solução proposta. Estas são coloridas e possuem uma legenda na própria figura.

Numa primeira divisão de possíveis problemas obtemos a Figura 30:

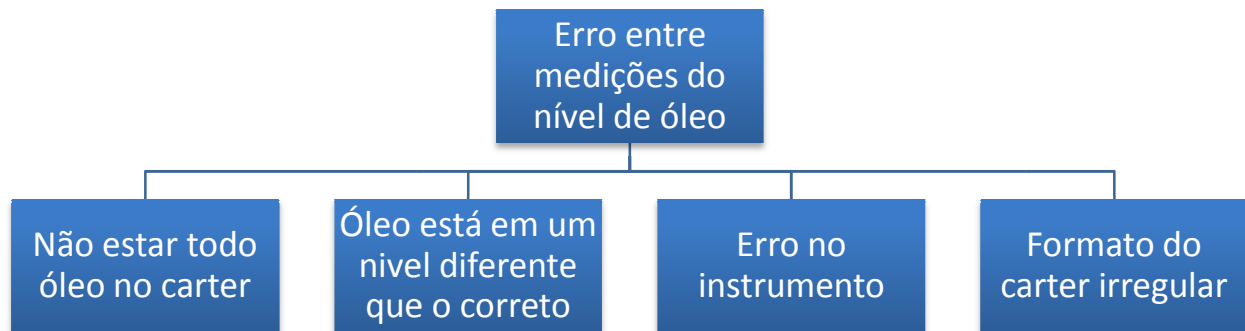


Figura 30: Primeira divisão de possíveis erros de medição do volume de óleo do cárter do motor

A fim de facilitar a compreensão e visualização, dividimos esta árvore em duas partes:

- Erros por descontrole de parâmetros do motor (“Não estar todo o óleo no cárter” e “Óleo está em um nível diferente que o correto”)
- Erros dos equipamentos e meios da medição (“Erro no instrumento” e “Formato do cárter irregular”)

Vamos fazer a análise nas 4 condições de medição propostas. A legenda em cada figura indica se o parâmetro a ser controlado interfere no teste com o motor parado (em azul), em funcionamento (em vermelho) ou em ambos os casos (em amarelo). Na Figura 31, a primeira parte da árvore de falhas dos erros relativos a descontrole dos parâmetros de teste.

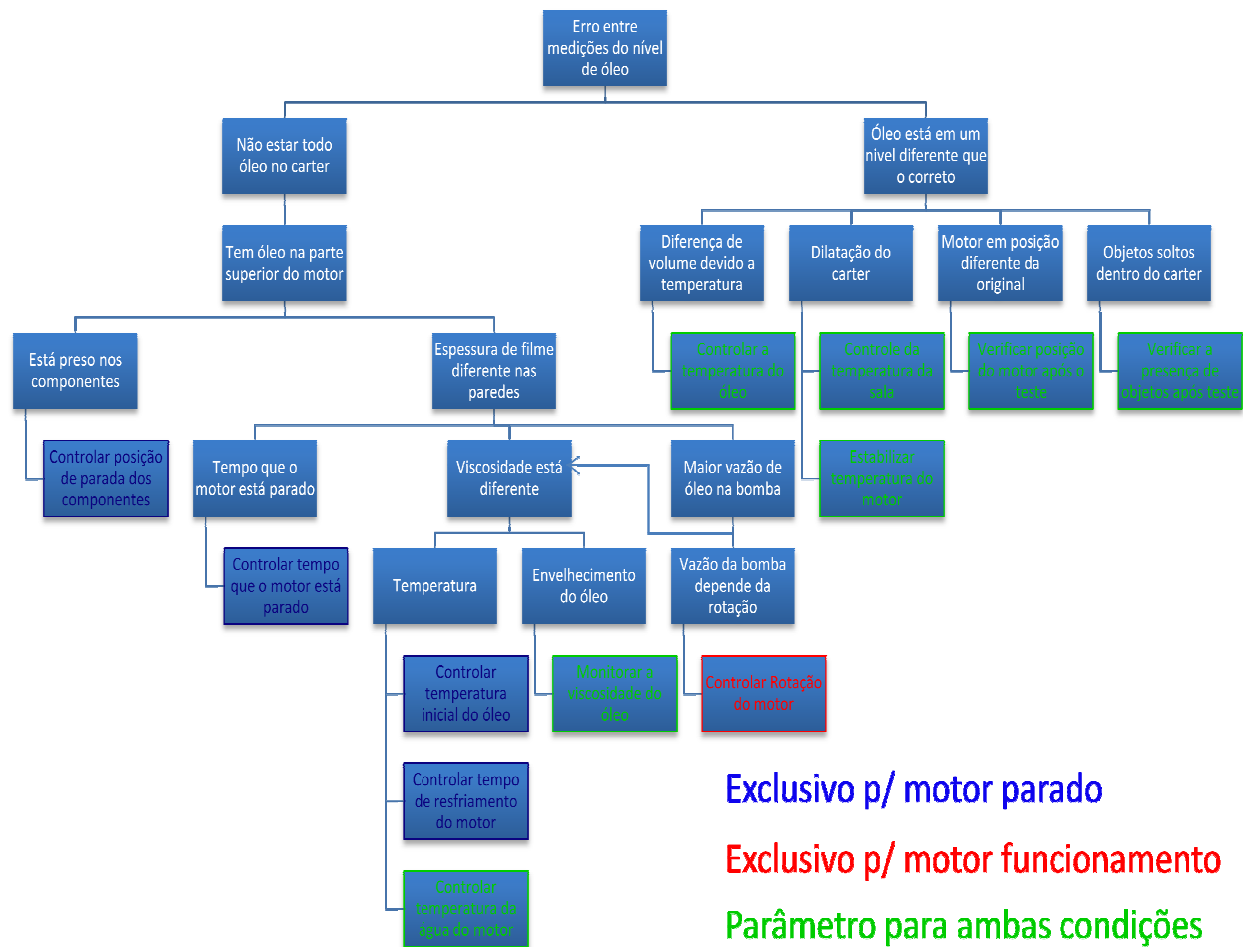


Figura 31: Árvore de falhas para estudo dos erros entre medições de nível de óleo do motor para medição de consumo de lubrificante nas condições de motor parado ou em funcionamento.

Podemos ver que os controles exclusivos para se fazer na medição com o motor parado são:

- 1 - Controle da posição de parada dos componentes internos do motor
- 2 - Controle do tempo que o motor está parado até ser efetuada a medição
- 3 - Controle da temperatura de estabilização do óleo
- 4 - Controle do resfriamento do motor

Os controles exclusivos para medição com o motor em funcionamento são

- 1 - Controle da rotação do motor

E os controles que envolvem ambos os casos são:

- 1 - Controle da temperatura da água do motor
- 2 - Controle da viscosidade do óleo com o tempo
- 3 - Controle da temperatura do óleo do motor



- 4 - Temperatura da sala de teste
- 5 - Estabilização da temperatura do óleo do motor
- 6 - Verificação da existência de objetos soltos no cárter
- 7 - Verificação da alteração da posição do motor na bancada de teste

Continuando a árvore de falhas, para os erros oriundos dos meios de medição temos a análise mostrada na Figura 32

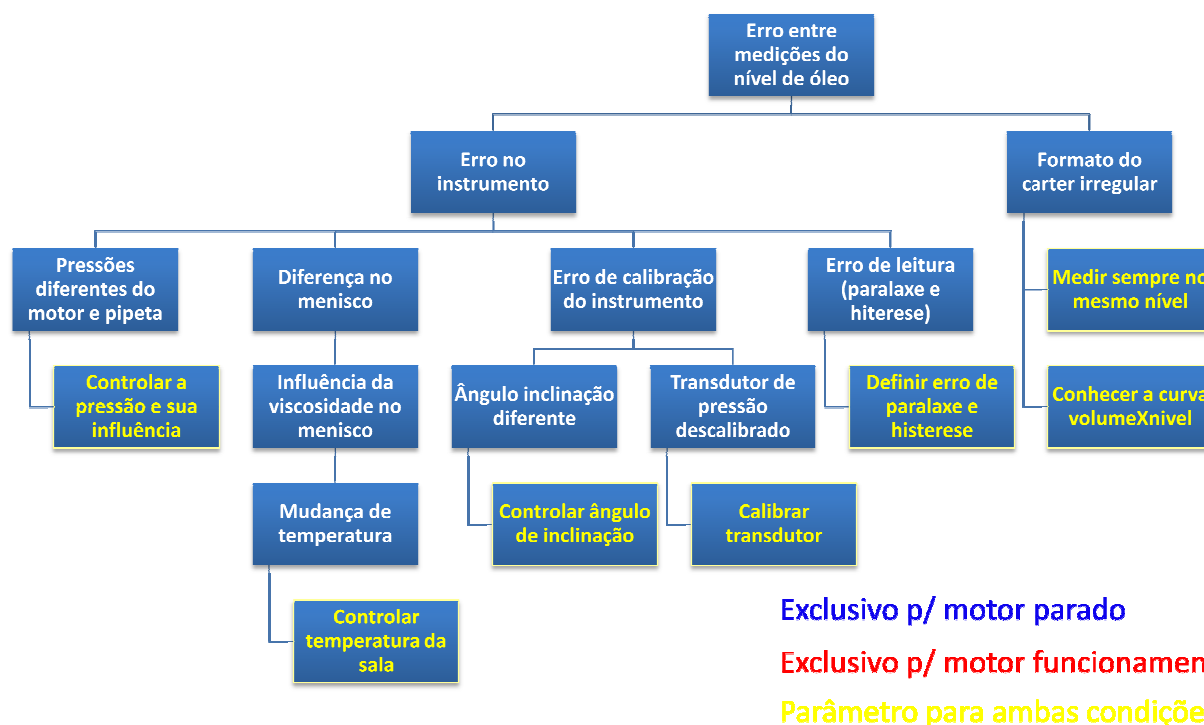


Figura 32: Continuação da árvore de falhas para estudo dos erros entre medições de nível de óleo do motor para medição de consumo de lubrificante nas condições de motor parado e em funcionamento.

Aqui, não temos erros exclusivos para medição com o motor parado ou com motor em funcionamento, e os controles que envolvem ambos os casos são:

- 1 - Controle da manutenção da pressão em ambos os lados para garantir o mesmo nível.
- 2 - Controle da temperatura da sala de teste
- 3 - Controle do ângulo de inclinação do instrumento
- 4 - Controle da calibração do transdutor de pressão
- 5 - Controle do erro de paralaxe e histerese
- 6 - Conhecer a relação de Nível de Óleo x Volume de Óleo

Podemos identificar nesta árvore de falhas, um total de 16 parâmetros diferentes que precisamos controlar e estudar para efetuarmos a medição do nível do óleo sem incorrer a erros. Os parâmetros são:

- 1) Formato do cárter. Para cada nível do cárter, teremos uma taxa de variação (volume x nível de óleo) diferente em função do formato complexo do mesmo.
- 2) Temperatura da água do motor, que influencia na viscosidade e densidade do óleo nas diferentes regiões do motor
- 3) Temperatura do óleo (que influencia no volume e viscosidade do óleo).
- 4) Tempo que o motor está parado (influência na quantidade de óleo que irá escoar para o cárter, e portanto alterar o nível medido).
- 5) Posição de parada dos componentes internos do motor.
- 6) Temperatura ambiente (influência no tempo de resfriamento do motor).
- 7) Resfriamento do motor, dissipação de calor para o ambiente (portas abertas e correntes de ar influenciam no tempo de resfriamento do motor).
- 8) Manutenção da mesma pressão em ambos os lados de medição, motor e instrumento.
- 9) Precisão do instrumento de medição de nível de óleo.
- 10) Rotação do motor (volume de óleo que não está no cárter irá variar de acordo com a rotação do motor).
- 11) Agitação do óleo, que não permite definir um nível exato.
- 12) Alteração da viscosidade e densidade do óleo devido ao envelhecimento.
- 13) Controle do ângulo de inclinação do instrumento e calibração.
- 14) Controle do erros de paralaxe e histerese.
- 15) Peças soltas dentro do cárter.
- 16) Posicionamento do motor.

## **2.4 Análises das variáveis**

A fim de ter sob controle os erros que podem ocorrer nas medições, vamos discutir esses parâmetros separadamente. De qualquer forma, é possível observar já num primeiro momento que a medição com o motor em funcionamento exige controle de 11 parâmetros para medição,

enquanto que a medição com o motor parado é necessário controlar 15 parâmetros que podem nos levar a erros.

Vamos também avaliar a dificuldade de controle de cada parâmetro e sua real influência na medição, para, então, definirmos o melhor procedimento a seguir.

### **Parâmetro 1 - Forma do cárter**

Para medição de consumo de óleo pela análise do nível, é necessário saber o volume de óleo que o nível no cárter representa. Obviamente, isto vai depender da área da superfície do óleo no cárter envolvido na medição. Áreas grandes representam grandes variações de quantidade de óleo para pequenas variações de nível e, da mesma forma, pequenas áreas representam pequenas variações de quantidade de óleo para grandes variações no nível. Dessa forma, precisamos, dentro do possível, trabalhar com pequenas áreas e equipamentos de medição de nível tão precisos quanto possível.

Além disso, o cárter de um motor sempre tem formatos complexos para se adaptar no veículo ou aplicação final. Isto faz com que a relação do “nível no cárter” por “volume de óleo”, não seja constante. Seria portanto necessário ter uma curva de correção para transformar a leitura de nível em volume de óleo.

Para termos idéia de valores, vamos exemplificar com um motor pequeno para avaliarmos o nível de precisão necessário no equipamento. Em função da disponibilidade, o exemplo escolhido é um motor a Diesel, com 3,0L de cilindrada total e sistema de injeção eletrônica comom rail, utilizado numa caminhonete de 2750kg. Segue na Figura 33 o desenho desse cárter:

Nota-se a complexidade da forma do mesmo, que mostra a necessidade de conhecer a curva característica Altura do nível X Volume. Uma das maneiras de melhorar a precisão da medição é diminuir a área do reservatório afim de que uma pequena variação de volume gere uma grande variação de nível. Assim, um mesmo equipamento pode conseguir uma melhor precisão na medição da variação do volume. Essa é uma alternativa que pode ser explorada para se obter melhores resultados. A grande vantagem dessa proposta é a possibilidade de diminuir o tempo de teste pela metade ou até mais; entretanto, teremos a desvantagem da necessidade de trocar essa peça do motor sempre que quisermos fazer esse tipo de medição.

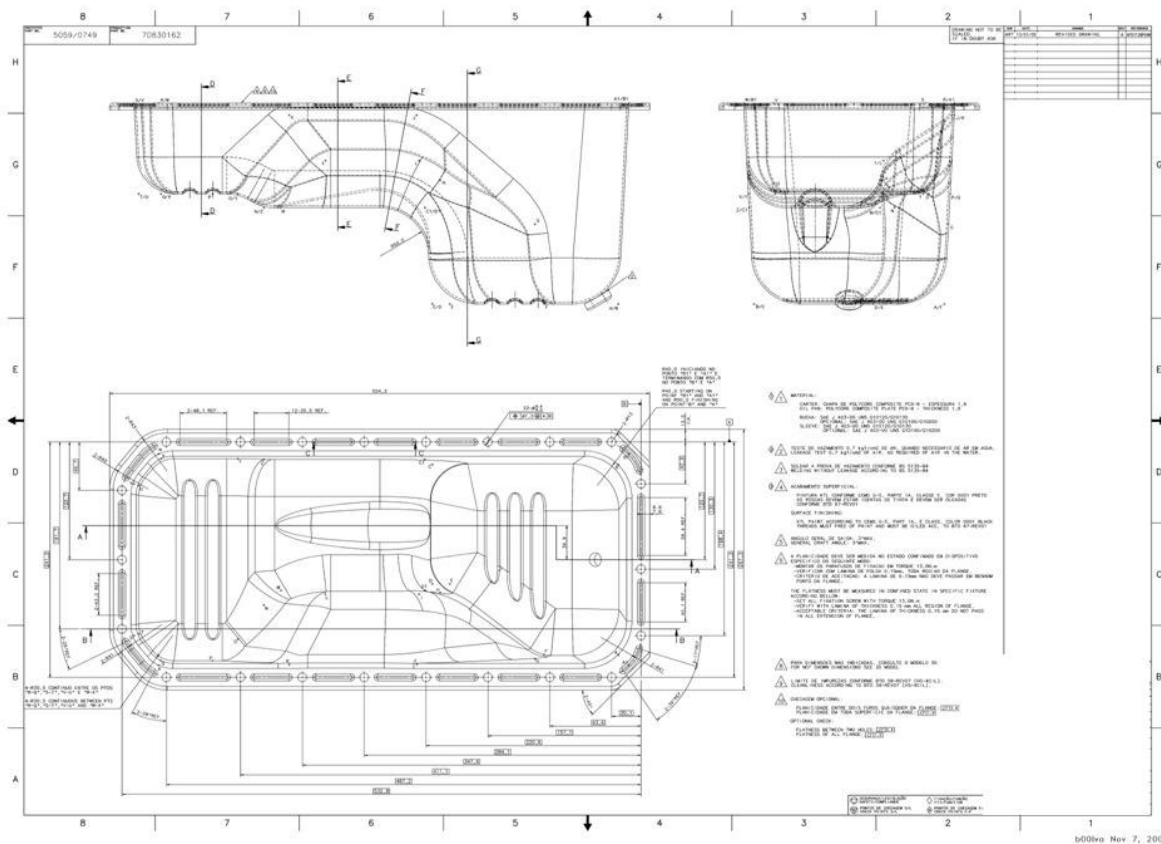


Figura 33: Desenho do cárter de óleo do motor utilizado nos experimentos aplicado em um motor Diesel High Speed de 3,0L de cilindrada total.

Para contornar o problema do formato complexo do cárter, (mas não a precisão necessária para o equipamento) podemos fazer a medição sempre em um mesmo nível. Ou seja, após o teste de 10 ou 20h, completaremos o óleo do cárter até chegamos ao nível inicial. Assim, não importa o formato do mesmo; portanto, não é necessário conhecer a curva característica de cada motor antes do teste. Desta maneira, este parâmetro não gera erros na medição

## Parâmetro 2 - Temperatura da água do motor

A temperatura do motor (água de refrigeração) tem influências diferentes de acordo com o do tipo de medição que será efetuada, ou seja, medição com o motor parado ou em funcionamento.

Para medição com o motor parado, é um parâmetro a ser rigorosamente controlado, pois influenciará na quantidade e tempo que o óleo leva para escoar pelas paredes do motor, uma vez

que a viscosidade é influenciada pela temperatura e irá alterar a quantidade e velocidade (tempo) de retorno do óleo para o cárter do motor, onde será medido. O controle é simples, apenas monitoramento da temperatura da água no momento de início do procedimento de medição. De qualquer forma, é necessário verificar a influência desse parâmetro experimentalmente e, especialmente, o que ocorre com ele após a parada do motor.

Já para medição com o motor em funcionamento, esse parâmetro tem menos importância, pois ele se auto-regula pela válvula termostática ou controle eletrônico, e necessita apenas de monitoramento. Ao se manter o motor em uma mesma condição de rotação e torque, a temperatura do motor se estabiliza sempre em um mesmo valor, se os sistemas de controle de temperatura estiverem operantes. De qualquer forma, o monitoramento da temperatura da água deve ser mantido para assegurar que estamos sempre com a mesma temperatura do motor e do óleo lubrificante, que também é influenciado pela temperatura da água.

Portanto, para este parâmetro, a medição com o motor em funcionamento é mais vantajosa em relação a medição com o motor parado.

### **Parâmetro 3 - Temperatura do óleo**

Para os métodos de medição direta, é consenso entre todos que o utilizam que a temperatura do óleo é o fator mais importante a ser controlado para se obter uma boa precisão na medição. Da mesma forma que o parâmetro anterior, a temperatura influencia na sua viscosidade, mas agora vamos considerar também a alteração no seu volume e, conseqüentemente, da densidade. Aqui, também temos comportamentos diferentes de acordo com o tipo de medição que será efetuada: motor parado ou em funcionamento.

Para medição com o motor parado, esse é um parâmetro a ser rigorosamente controlado, pois a quantidade e o tempo de escoamento do óleo pelas paredes do motor têm influência direta no volume de óleo que retornará para o cárter, onde o mesmo será medido. O controle é simples, necessita apenas o condicionamento do motor por um tempo suficiente, para que a temperatura do óleo alcance sempre o mesmo valor no momento de início do procedimento de medição. Importante lembrar que o condicionamento não é apenas do óleo, mas de todo o motor, de modo que o procedimento de estabilização deverá prever isto.

Já para medição com o motor em funcionamento, existe a grande vantagem que a temperatura do óleo não necessita controle, pois ele se auto-regula. Ao se manter o motor em

uma mesma condição de rotação e torque, a temperatura do óleo do motor se estabiliza sempre em um mesmo ponto. De qualquer forma, o monitoramento da mesma deve ser mantido para assegurar que sempre efetuamos a leitura de nível de óleo com o motor estabilizado. No trabalho citado anteriormente na revisão bibliográfica Payri (2005)<sup>6</sup> da Universidade de Valencia na Espanha, mostrado na Figura 8, analisou-se o consumo de óleo no turbo compressor com um circuito fechado, onde foi constatado a enorme influência da temperatura na quantidade de óleo do reservatório, o que nos geraria um erro de leitura.

Como a medição do consumo de óleo do motor por nível é fundamentado no controle da quantidade de óleo no cárter, podemos fazer uma analogia do circuito utilizado por Payri com um motor, onde o turbo do experimento dele corresponde a parte de cima do motor, os tubos por onde o óleo desce por gravidade seriam as paredes do bloco e o reservatório de peso controlado seria o cárter do motor, onde iremos controlar o nível. Segue na Figura 34 o resultado encontrado por Payri.

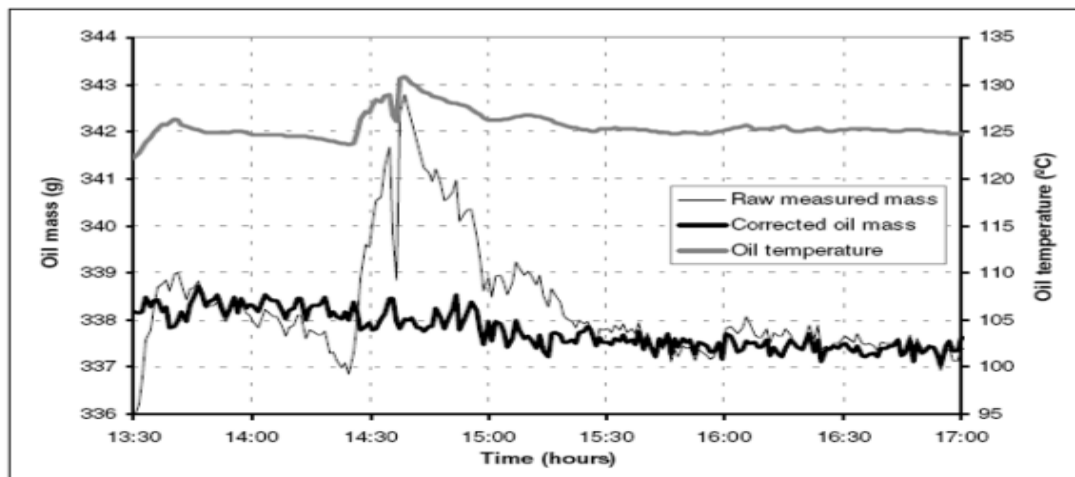


Figura 34: Gráfico que mostra a importância do controle da temperatura do óleo numa medição de circuito fechado de um turbo compressor. O gráfico mostra a medida em um ponto do circuito.

Vê-se que a temperatura tem forte influência na quantidade de óleo do reservatório no experimento de Payri e, analogamente ao motor; o nível do cárter deverá se alterar se houver variação da temperatura do óleo. Observa-se também a possibilidade de fazer correção desse valor se necessário.

Felizmente, conforme comentado, a temperatura do óleo no cárter estabiliza-se sempre no mesmo valor e, portanto, não necessita controle, apenas o monitoramento. Entretanto, para medição, parte do óleo poderá não estar dentro do cárter, como no caso de um sistema de vasos

comunicantes, onde metade do sistema estará sujeito a variações de temperatura e, consequentemente, da densidade, o que gera um erro na medição do nível conforme exemplificado na Figura 35.

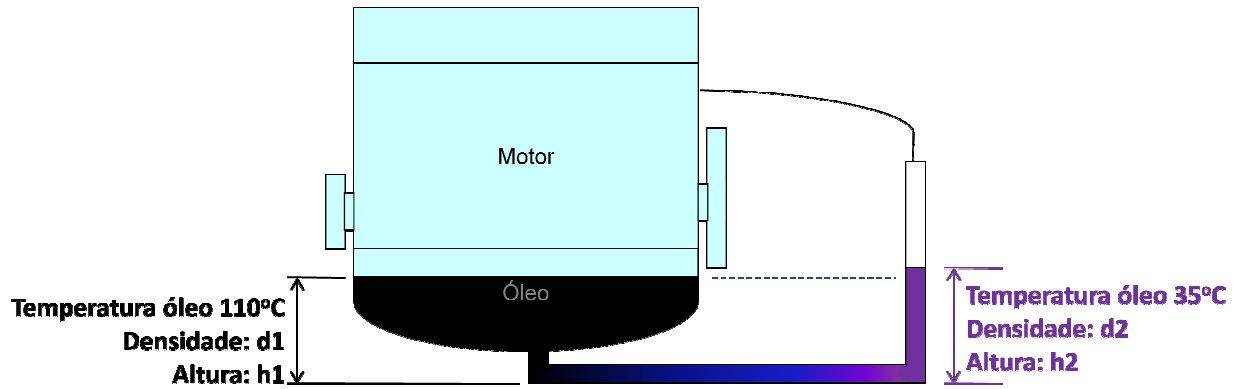


Figura 35: Ilustração que mostra a possibilidade de erro de medição se houver variação de temperatura em um dos lados do sistema de vasos comunicantes

Podemos estudar a variação do nível que teremos entre os dois lados do sistema levando em consideração dois fenômenos que estudaremos separadamente:

- 1) Diferença de densidade do fluido entre os dois lados, que causa uma diferença de nível.
- 2) Variação do volume devido a variação de temperatura, que leva a um aumento ou diminuição geral do nível de óleo do sistema.

#### a) Influência da diferença de densidade do fluido.

Vamos considerar a linha mais baixa dos vasos comunicantes. Lá temos a mesma pressão em ambos os lados e, então, podemos igualar a equação da altura manométrica ( $\rho gh$ ):

$$\rho_1 \times g \times h_1 = \rho_2 \times g \times h_2 \quad (2.1)$$

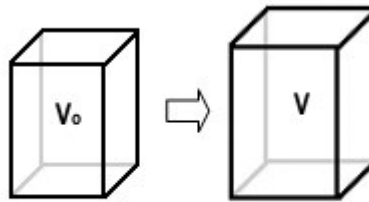
Se densidade ( $\rho$ ) =  $\frac{\text{massa}}{\text{volume}}$  e em unidades infinitesimais  $\frac{dm}{dv}$  substituimos na equação 2.1, e simplificamos o força gravitacional  $g$ :

$$\frac{dm_1}{dv_1} \times h_1 = \frac{dm_2}{dv_2} \times h_2$$

Se a temperatura é a mesma dos dois lados, a densidade, massa, volume e altura será a mesma dos dois lados também. Com a diferença de temperatura, teremos uma diferença de volume e, conseqüentemente, de densidade, entretanto, as massas permanecem as mesmas. Podemos, então, simplificar a equação:

$$h_2 = \frac{d v_2 \times h_1}{d v_1} \quad (2.2)$$

Podemos calcular a variação de volume pelo coeficiente de dilatação volumétrica do óleo lubrificante ( $\gamma$ ):



$$\Delta V = V - V_o = V_o \cdot \gamma \cdot \Delta T \quad (2.3)$$

Onde  $\Delta V$  é a variação de volume;  $V$  = volume final;  $V_o$  = volume inicial;  $\Delta T$  é a variação de temperatura e  $\gamma$  é o coeficiente de dilatação volumétrico do óleo.

Da mesma forma, para unidades infinitesimais, podemos escrever a equação 2.3 assim:

$$dV - dV_o = dV_o \times \gamma \times \Delta T$$

Como no nosso problema existe a diferença de temperatura que causou o aumento de volume, podemos usar o coeficiente de dilatação volumétrica e considerar que  $dV_o = d v_1$  e  $dV = d v_2$  e assim, temos que:

$$d v_2 - d v_1 = d v_1 \times \gamma \times \Delta T$$

Ao integrarmos novamente,

$$v_2 - v_1 = v_1 \times \gamma \times \Delta T$$



$$v_2 = v_1 + v_1 \times \gamma \times \Delta T \quad (2.4)$$

$$v_2 = v_1 (1 + \gamma \times \Delta T)$$

Substituindo na equação 2.2 já integrada, ficamos com:

$$h_2 = \frac{v_1 \times (1 + \gamma \times \Delta T) \times h_1}{v_1}$$

$$h_2 = h_1 \times (1 + \gamma \times \Delta T) \quad (2.5)$$

$$h_2 - h_1 = h_1 \times \gamma \times \Delta T$$

$$\Delta h = h_1 \times \gamma \times \Delta T \quad (2.6)$$

Com a equação 2.6 podemos calcular a variação de altura (erro) pra uma variação de temperatura entre os dois lados.

No caso do motor em estudo, por exemplo, o cárter do motor com 9 litros de óleo possui um nível de 163mm, conforme Tabela 2 (capítulo 3.2.1 - Forma do cárter). Assim, a diferença de altura manométrica devido a temperatura, para este motor em estudo, pode ser calculada pela equação 2.6 para variação unitária da temperatura:

$$\Delta h = h_1 \times \gamma \times \Delta T$$

$$\Delta h = 163 \times 0,000600$$

$$\Delta h = 0,098 \text{mm}/^{\circ}\text{C}$$

Ou seja, a diferença do nível de óleo entre os dois lados dos vasos comunicantes devido a diferença de temperatura entre eles será em torno de 0,1mm/°C em função da diferença de densidade entre os dois lados.

### **b) Influência na variação do volume total do sistema.**

Uma alteração na temperatura também nos levará a uma variação no volume de óleo, e necessita então de outra correção para não haver erros em relação a grandeza medida: a variação de massa de óleo de todo o sistema, ou seja, o consumo de óleo.

Como no nosso caso existe uma diferença muito grande de volume e área entre os dois lados dos vasos comunicantes, podemos considerar apenas as variações que ocorrem dentro do cárter com relação a mudança de volume e assim, desprezar o volume do tubo do vasos comunicantes do cárter até o nível medido.

Assim, se houver uma variação unitária na temperatura do óleo interno no cárter, em um volume de 8 litros de óleo, para este motor em estudo, a variação será conforme a equação 2.3 de:

$$\Delta V = V_0 \times \gamma \times \Delta T$$
$$\Delta V = 8000 \times 0,000600 = 4,8 \text{ml}/^{\circ}\text{C}$$

Ao transformar isto em nível, pela tabela 3 (capítulo 3.2.1 - Forma do cárter), nessa altura possuímos uma relação de 94,3ml/mm. Temos, então, uma variação de  $4,8/94,3 = 0,054 \text{mm}/^{\circ}\text{C}$  no nível do cárter, que será também refletido no nível externo que vamos medir.

### **Cálculo da correção**

Se considerarmos, então, que nosso sistema de vasos comunicantes possui a mesma pressão na superfície do óleo em ambos os lados, a diferença de altura manométrica pode ser corrigida da seguinte maneira.

- 1) Registra-se, juntamente com o valor do nível da primeira medição, o valor de temperatura do óleo interno do cárter e temperatura ambiente (para estimar a temperatura no lado externo dos vasos comunicantes), e adota esses valores como referência.
- 2) Por influência da densidade, para cada diminuição unitária da temperatura do óleo interno do cárter, ou aumento unitário da temperatura ambiente em relação a temperatura de referência inicial, somam-se ao nível encontrado 0,098mm.
- 3) Por influência da variação de volume, para cada diminuição unitária da temperatura interna do cárter, diminuem-se 0,054mm do nível encontrado.

Obviamente, para variações contrárias de temperatura o oposto é válido.

Assim, podemos montar o seguinte fator de correção:

$$Nc = Nl - 0,098 \times (Tol - Tor + Tar - Tal) - 0,054 \times (Tor - Tol) \quad (2.7)$$

Sendo:

Nc = Nível corrigido

Nl = Nível lido

Tor = Temperatura do óleo do cárter de referência

Tol = Temperatura do óleo do cárter lido

Tar = Temperatura ambiente de referência

Tal = Temperatura ambiente lida

É importante lembrar que, para medições com transdutor de pressão, não é necessário esta correção, pois não se trata de vasos comunicantes.

Com esta correção, podemos administrar variações de temperatura do óleo do motor e do óleo no vasos comunicantes externo ao motor sem perda significativa da precisão do instrumento de medição relacionada a esses dois fatores.

Entretanto, as variações de temperatura do cárter ocasionam também dilatações nos componentes do motor como bloco e cárter, que as altera dimensionalmente. Além disso, por influência da diferença de viscosidade oriunda da temperatura, teremos alterações ainda na vazão da bomba de óleo e velocidade de escoamento pelas galerias do motor. Assim, outro fator deverá ser agregado nesta fórmula de correção do nível para compensar estas diferenças, mas somente com dados experimentais poderemos definir o valor desse fator de correção, que será diferente para cada tipo de motor testado.

#### **Parâmetro 4 - Tempo que o motor está parado.**

Esse parâmetro, obviamente, não se aplica para a medição com o motor em funcionamento.

Tem forte influência pois, após a parada do motor, o óleo irá escoar para o cárter onde deveremos medi-lo e, nesse período, a temperatura do óleo e da água do motor irão diminuir no

tempo por influência da transmissão do calor para o ambiente. Isto irá atuar sobre a viscosidade do óleo e na dilatação (dimensões) dos componentes do motor.

O nível de óleo após a parada do motor tem um comportamento no tempo, assintótico a um valor final, de forma que para tempos muito grandes de parada, quase todo o óleo já retornou ao cárter e, dessa forma, menor será a taxa de variação do nível no tempo,  $\Delta(\text{nível})/\Delta(\text{tempo})$ , o que reduz um eventual erro de tempo da leitura. Entretanto, mais suscetível a variações externas estará sujeito, pois após muitos minutos, dificilmente a temperatura do motor será a mesma entre uma medição e outra em função da temperatura ambiente, correntes de ar, entre outros fatores que irão alterar a dissipação do calor do motor. Além disso, tempos maiores causam uma despesa maior, pois o equipamento ficará mais tempo parado e conforme comentado anteriormente, isso representa um custo de ocupação elevado.

No outro extremo, em tempos muito curtos, estaremos mais sujeitos a erros de leitura do nível devido ao elevado volume de óleo que retorna ao cárter e um pequeno erro no tempo poderá representar uma grande diferença de nível. Porém, o teste estará menos suscetível às variações de dissipação de calor do motor, o que melhora a precisão do método. Serão necessárias algumas medições para encontrar o tempo ideal com a melhor relação “variação do nível” X “dissipação de calor”. Os tempos mais comumente utilizados para o sistema de pesagem variam de 10 a 30 minutos que é facilmente controlado por um cronômetro.

#### **Parâmetro 5 - Posição de parada dos componentes internos do motor.**

Da mesma forma que o anterior, se aplica apenas para a medição com o motor parado. Tem sua influência na quantidade de óleo que pode ficar alojada nos componentes móveis internos do motor. Isto é facilmente controlado se posicionarmos o motor sempre na mesma posição após a parada para medição (mesmo ângulo do virabrequim). Esse um procedimento muito comum para o método de drenar e pesar e é necessário verificar se existe alguma influência no nível do óleo.

Em função da complexidade da forma dos componentes e da quantidade de componentes móveis em contato com o óleo é inviável fazer uma tratativa teórica para esse parâmetro. Iremos apenas fazer um experimento para analisar a diferença de quantidade de óleo retido nos componentes do motor para cada posição de parada do virabrequim.

## **Parâmetro 6 - Temperatura ambiente.**

A temperatura ambiente tem sua maior influência na medição com o motor parado, onde irá interferir no tempo de resfriamento das paredes do motor e, conseqüentemente, na velocidade de escoamento do óleo para o cárter, onde será medido. É um parâmetro muito difícil de controlar, pois dependeria de condicionadores de ar muito potentes para manter um valor constante em todas as medições.

Nas medições com o motor parado, uma maneira de evitar que esse parâmetro atrapalhe as medições é manter as portas do banco de testes fechadas e ventiladores desligados após a parada do motor, e assim manter o mais repetitivo possível o micro clima que se forma dentro da sala de teste. Desta forma, em função da temperatura do motor e paredes do banco, a temperatura da sala ficaria bastante independente da temperatura ambiente externa nos minutos consecutivos a parada do motor.

Para medição com motor em funcionamento tem uma influência menor, pois o motor gera continuamente calor e, a manutenção da temperatura da água se dá pela válvula termostática, que regula a temperatura e compensa eventuais diferenças de temperatura ambiente. Além disso, o monitoramento da temperatura do óleo iria indicar alguma eventual diferença entre as medições. De qualquer forma, por menor que seja, poderá influenciar nas medições e é um erro que pode ser estudado experimentalmente para cálculo da incerteza da medição e eventual fator de correção.

O tratamento teórico desse parâmetro poderia ser feito com simulação numérica, porém, a complexidade dos componentes e quantidade dos mesmos inviabiliza esse tipo de cálculo e assim, faremos medições experimentais para ter controle sobre este parâmetro.

Devemos lembrar que para medição por vasos comunicantes, a temperatura ambiente irá alterar o nível do lado da medição em função da variação da densidade conforme estudado no parâmetro 3 (Temperatura do óleo). Desta forma, se faz necessário um sistema de controle de temperatura do óleo na parte dos vasos comunicantes que se encontra fora do motor.

## **Parâmetro 7 - Dissipação de calor do motor para o ambiente.**

Esse parâmetro está intimamente ligado ao anterior, pois a alteração da dissipação de calor é diretamente proporcional a temperatura ambiente. Porém, esta dissipação pode ser amplificada pela circulação do ar enquanto o motor está parado. Desta forma, uma maneira simples de controlar esse parâmetro é desligar ventiladores e manter as portas da sala de teste fechadas. Da

mesma forma que o anterior, irá interferir no tempo de resfriamento das paredes do motor e, então, influenciar na velocidade de escoamento do óleo para o cárter onde será medido.

Para medição contínua tem uma influência menor, pois o motor gera continuamente calor e a manutenção da temperatura da água pela válvula termostática regula a temperatura do motor compensa eventuais diferenças de temperatura ambiente. Além disso, o monitoramento da temperatura do óleo iria indicar alguma eventual diferença entre as medições.

Para o uso de vasos comunicantes tem a mesma tratativa do parâmetro anterior.

### **Parâmetro 8 - Manutenção da mesma pressão em ambos os lados do sistema.**

Numa análise o que ocorre com o motor parado, observamos que não é necessário o controle desse parâmetro para testes nesta condição, pois não existe fluxo de gases em nenhuma parte do motor e assim, a pressão atmosférica se igualará por todo o sistema através da folga entre pontas dos anéis de pistão, válvula de admissão e escape que farão uma comunicação da parte interna do motor (superfície do óleo) para o ambiente externo, onde se encontra o outro lado do vasos comunicantes e será feita a leitura de nível.

Com o motor em funcionamento, existe a passagem de gases para a região do cárter, pelos anéis de pistão e vedações o rotor do turbo compressor do motor. Esses gases por conter uma grande quantidade de vapor e gotículas de óleo, passam por várias galerias com objetivo de separar o óleo do ar antes de ser expelido para fora do motor. A vazão constante desses gases em conjunto com a restrição que encontra para sua saída de dentro do motor, gera uma pressão interna na ordem de 10 a 500mmca (ou 0,1 a 5 kPa).

Para medições com o motor em funcionamento, a pressão do cárter pode trazer erros na medição, uma vez que o nível em um sistema de vasos comunicantes é sujeito a erros se a pressão sobre cada lado não for a mesma, mas isto é facilmente resolvido se interligarmos os dois lados do sistema. Ainda assim, um teste para validar a equalização das pressões é importante ser feito para verificar a eficiência deste sistema.

### **Parâmetro 9 - Precisão do instrumento de medição.**

A precisão do instrumento de medição do nível de óleo, obviamente, implica diretamente no erro da medição. Nesse parâmetro, quanto melhor a precisão do equipamento, melhor será a medição. Conforme comentado anteriormente, foram pesquisados diversas formas de medição do nível. Optou-se nesta fase do trabalho pelos equipamentos mais simples e fáceis de serem obtidos

para utilização nos experimentos (tubo inclinado e transdutor de pressão), mas numa continuação deste trabalho novas formas de medição podem ser estudadas para se melhorar, ou mesmo facilitar a aquisição de dados.

Erros de leitura em um sistema de tubo inclinado podem vir da formação do menisco e também da ascensão capilar que precisam permanecer as mesmas para evitar erros de leitura. Nesse caso, precisamos lembrar que quando temos a interface gás-líquido-sólido é necessário estudar o comportamento das superfícies interfaciais para evitar erros oriundos da tensão superficial, pois quando em um líquido uma das fronteiras é um gás, as moléculas superficiais ficam desbalanceadas mecanicamente, o que origina a força de tensão superficial estudada pela química das superfícies (Shaw, 1975)<sup>26</sup>.

Entretanto, sabe-se que a tensão superficial líquido-sólido é máxima com as superfícies completamente limpas; como nos nossos experimentos o tubo inclinado estará com óleo em sua superfície podemos considerá-lo “sujo” de forma que o valor da ascensão capilar sofrido nos testes deverá ser consideravelmente menor do que o previsto pelo modelo de balanço de forças dado por Duncan na equação 4.4 (página 44):

$$\varphi = \frac{r \times A \times \Delta\rho \times g}{2} \text{ e assim, a altura da ascensão capilar é:}$$

$$A = \frac{2 \times \varphi}{r \times \Delta\rho \times g}$$

Onde:

A é a altura de ascensão capilar prevista,

$\varphi$  é o coeficiente de tensão superficial,

r é o raio do tubo de vidro,

$\Delta\rho$  é a diferença entre massa específica do líquido e do gás, e

g é a aceleração da gravidade.

Como podemos observar a viscosidade não tem influência na ascensão capilar de forma que não precisamos nos preocupar com a temperatura do óleo. Além disso, devido ao fato de que a “sujeira” da superfície, ou seja, o óleo, é o mesmo líquido medimos, a ascensão capilar devido a

tensão superficial é muito pequena, pois passamos a não ter mais interface líquido-sólido, necessária para tensão superficial. No caso de medição com transdutor de pressão, este parâmetro não tem influência.

Para tubos inclinados, quanto maior a inclinação, mais conseguimos ampliar o movimento do menisco. Fabricantes de equipamentos como a IOPE (2009)<sup>27</sup>, comercializam instrumentos com inclinações menores que 5° (graduação ou resolução de 0,1mm/divisão) como os modelos MIK conforme mostrado na Figura 27, portanto esse valor poderá ser testado, se necessário, com boas chances de sucesso.

### **Parâmetro 10 - Rotação do motor**

A rotação do motor influencia na quantidade de óleo no cárter, uma vez que a bomba de óleo envia uma quantidade de óleo diferente para lubrificação do motor de acordo com a rotação, pois a mesma é acionada diretamente pelo eixo do virabrequim do motor.

O comportamento esperado para esta variável é a diminuição do nível de acordo com o aumento de rotação do motor, uma vez que com o aumento da vazão da bomba de óleo com o aumento de rotação, maior a quantidade que fica retida na parte de cima do motor, o que diminui o volume no cárter e, conseqüentemente, seu nível, que é nossa referência para medição.

O controle desse parâmetro é simples, pois basta manter a mesma rotação do motor sempre que se fizer a leitura do nível e, no caso de medição com o motor parado, fazer a estabilização do motor sempre na mesma rotação.

### **Parâmetro 11 - Agitação do óleo não define um nível exato**

Esta variável se aplica apenas para medições com motor em funcionamento; porém, é facilmente contornável, pois para medição precisamos apenas de um nível médio. Isto pode ser conseguido se amortecermos as pulsações causadas pela agitação do óleo; mecanicamente, com restrições nas tubulações, ou pulmões, que ligam os vasos comunicantes ou o transmissor de pressão; ou eletronicamente, no caso do transdutor de pressão.

Experimentalmente, definiremos a influência desse parâmetro pela análise da variação do nível com o motor estabilizado em uma condição. Por outro lado, um amortecimento muito grande pode nos indicar um nível de óleo com atraso no tempo, o que não é desejável, especialmente em testes policíclicos, onde o tempo de operação do motor em uma determinada



condição não é grande e podemos ler valores incorretos por não alcançar estabilização do nível interno do motor.

Um estudo experimental se faz necessário para analisar a dinâmica da variação do nível e a quantidade de amortecimento mais adequado. Obviamente, amortecimentos demasiados também não são desejáveis, pois atrasam o valor lido, o que pode gerar erros.

### **Parâmetro 12 - Variação da viscosidade e densidade devido ao envelhecimento do óleo.**

Sabe-se que, com o envelhecimento do óleo existe uma alteração na sua viscosidade que por sua vez, tem influência na vazão da bomba de óleo e velocidade de retorno do óleo para o cárter. Além disso, a concentração de elementos metálicos durante o uso do motor também irá aumentar, o que pode alterar a densidade do óleo. Entretanto, estes fatores não serão estudados neste trabalho em função dos recursos disponíveis e é mais uma recomendação para uma análise mais aprofundada desse parâmetro num próximo trabalho.

### **Parâmetro 13 - Ângulo de inclinação do instrumento.**

Esse parâmetro influencia apenas para medições com nível inclinado e pode ser facilmente controlado com a colocação de um nível de bolha na base do instrumento, que mostra se a inclinação está correta. De qualquer forma não será necessário controle, pois o mesmo é fixado na bancada de teste e mantido sempre lá. Se existir algum erro, o mesmo não irá interferir na precisão, pois será realizada uma curva Volume no cárter x Nível de Óleo e qualquer erro será compensado ou considerado nesta curva. Ou seja, o erro ocorreria em cálculos teóricos, mas na prática, com esse mapeamento podemos usar qualquer ângulo, desde que se mantenha sempre o mesmo durante todos os testes. A preocupação com o valor é apenas para obtermos a resolução desejada na medição.

### **Parâmetro 14 - Erros de paralaxe e histerese**

Com relação ao erro de paralaxe, da mesma forma que o anterior, terá influência apenas para medições com nível inclinado, porém, será um erro mínimo, pois ao colocarmos a escala graduada na parte superior do tubo, o menisco forma uma linha muito bem definida conforme Figura 67 e Figura 68 mais frente, porém, um estudo de repetibilidade pode ser realizado com a leitura por pessoas diferentes e avaliar um eventual erro.

O problema de histerese na medição não precisa ser considerado para teste com o motor parado, pois após a parada do mesmo o nível irá sempre subir, de forma que esse tipo de erro, se houver, será sempre o mesmo.

Para teste com o motor em funcionamento, com uso do tubo inclinado esse erro poderá ocorrer devido a tensão superficial e esse deve ser estudado para definir um método de medição, a fim de evitar que esse erro influencie nos resultados. Porém, conforme comentado anteriormente, o fato da parede do tubo inclinado estar “suja” sempre com o mesmo líquido que está em medição, a tensão deve ser mínima e, mesmo que exista, será sempre muito semelhante entre uma leitura e outra e, portanto, não influencia na medição. Da mesma forma, um teste deve ser realizado para comprovar isto.

Para o uso do transdutor de pressão, esse fenômeno precisa ser avaliado experimentalmente apesar de normalmente informado pelo fabricante. Caso o valor da histerese seja menor que a oscilação do nível do cárter devido ao funcionamento do motor, também não trará grandes problemas, pois irá apenas cortar picos de valores medidos, o que trará valores mais próximos de um valor médio, que é o que buscamos nos testes com motor em funcionamento.

### **Parâmetro 15 - Peças soltas dentro do cárter**

Baseado na experiência com testes de motores, a não ser que haja um problema muito sério no motor, o que já invalidaria o teste de consumo de óleo, é um fato muito raro de acontecer sem que seja percebido durante o teste funcional do motor.

Ainda assim, se houver uma peça solta dentro do cárter, irá haver um aumento no nível de óleo equivalente ao volume dessa peça; porém, não temos controle sobre isto durante o teste, apenas ao final dele quando invariavelmente ocorre a desmontagem do motor para análise dos componentes. Nesse momento poderemos verificar a existência de peças estranhas dentro do cárter e invalidar o teste se for necessário.

### **Parâmetro 16 - Posicionamento do motor**

Caso ocorra uma variação no posicionamento do motor na bancada de teste, ocorrerá uma variação no nível de óleo medido, uma vez que o sensor não está fixado a ele e, mesmo que estivesse, poderiam ainda ocorrer erros na leitura do nível de óleo caso o motor se incline. Entretanto, uma pequena variação no posicionamento dificilmente não é percebida, pois em

função da alta rotação do motor que é transmitido ao dinamômetro, ocasionaria vibração excessiva de todo o conjunto e falha catastrófica do eixo de transmissão. Da mesma forma que o anterior, é muito raro de ocorrer sem que se perceba a falha, portanto não iremos estudar esse parâmetro, e deixar isto para um trabalho futuro.

Podemos considerar também uma diferença no posicionamento do aparelho que poderia ser controlado por meio da verificação desse posicionamento ao final do teste.

### **3. Análise experimental**

A fim de avaliar os erros que podem vir de cada parâmetro evidenciado, é necessário conhecer de forma experimental a influência de cada um e confirmar ou definir os fatores de correção caso quando necessário.

Para avaliação experimental, precisamos também definir o instrumento de medição mais adequado para o tipo de medição e que atenda as premissas do trabalho. Conforme analisado anteriormente, a fim de atender os quesitos de simplicidade e custo do equipamento, decidimos optar pelo tubo inclinado e transdutor de pressão diferencial.

#### **3.1 Equipamentos utilizados**

Para as medições, foram utilizadas as instalações de dinamômetros da engenharia de produto da MWM International Motores em Canoas - RS, que possui 7 bancos de teste com dinamômetros dedicados a testes de durabilidade. Foram aproveitados vários os testes de durabilidade em andamento em diversas bancadas, e não gerou custos adicionais de ocupação dos bancos de testes ou consumo de combustível.

Para medição da inclinação do tubo inclinado, foi utilizado um medidor de nível, marca Mitutoyo, modelo S950-316 com resolução de  $0,01^\circ$  e  $0,05^\circ$  de precisão.

Nos testes comparativos com o método de drenar e pesar, foi utilizado uma balança de fabricação interna da MWM International Motores, com capacidade até 20kg e resolução de 0,1 grama e para medição de tempo foi utilizado um cronômetro comum.

Segue nas fotos da Figura 36 e Figura 37, a bancada de teste e sistema de aquisição de dados respectivamente, utilizados para coletar dados dos experimentos.

Na Figura 36, podemos observar o dinamômetro Schenck, modelo W230 para teste em motores de até 230kW de potência e rotação máxima de 7500rpm e 750Nm de torque e aspecto externo da bancada de teste de uso exclusivo para teste de motores de combustão interna.



Figura 36: Foto do dinamômetro utilizado acoplado ao motor e aspecto geral da bancada de controle, onde fica o sistema de aquisição de dados

Na Figura 37, temos um exemplo de tela de controle do software de controle e aquisição de dados da SP-TRONIC, E-CAT , durante monitoramento dos parâmetros do motor



Figura 37: Aspecto do software de aquisição de dados utilizado para leituras do transdutor de pressão junto com os outros parâmetros do motor

Para os testes com vasos comunicantes com tubo inclinado foi utilizada uma pipeta graduada de 50ml com graduação de 0,1ml, fixada em uma placa de acrílico conforme Figura 38:



Figura 38: Foto da pipeta utilizada para construção do tubo inclinado

Para os testes com transdutor de pressão, foi utilizado um transdutor de pressão diferencial da marca Gulton, modelo GTIPD-A com capacidade de 0 a 200mmca, resolução de 0,1mmca e precisão de 0,5% do fundo de escala. A Figura 39 mostra uma foto desse equipamento.



Figura 39: Transdutor de pressão utilizado para os experimentos.



Na Figura 40 e Figura 41, podemos observar o aspecto da montagem dos sistemas de tubo inclinado com vasos comunicantes e do transdutor de pressão respectivamente, montados dentro da sala de teste junto ao motor em teste.

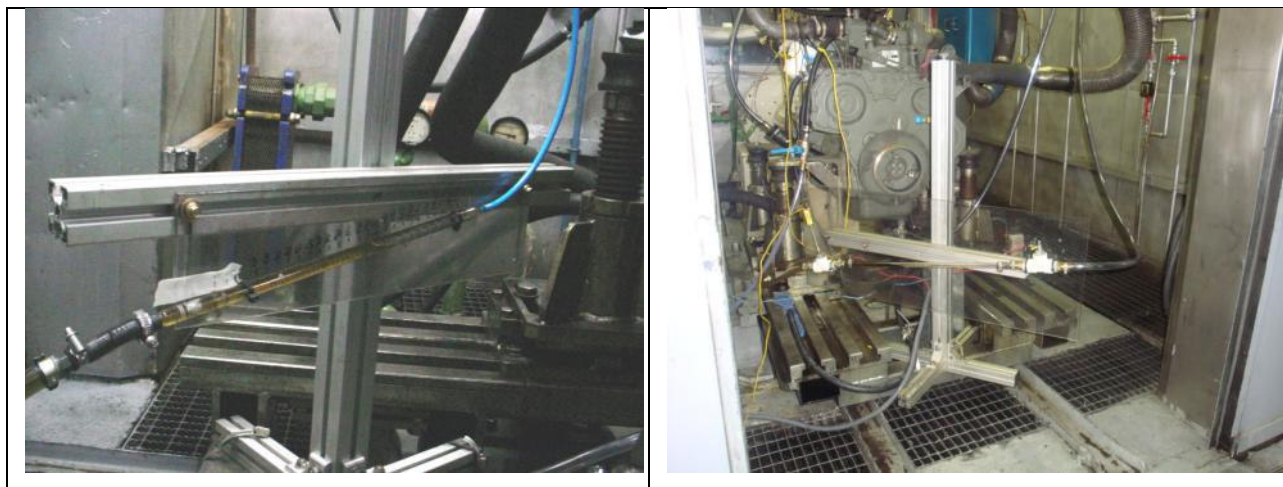


Figura 40: Instalação dos tubos inclinados em diferentes configurações e motores. Na figura da direita com sistema de aquecimento para evitar influência da variação da temperatura ambiente.

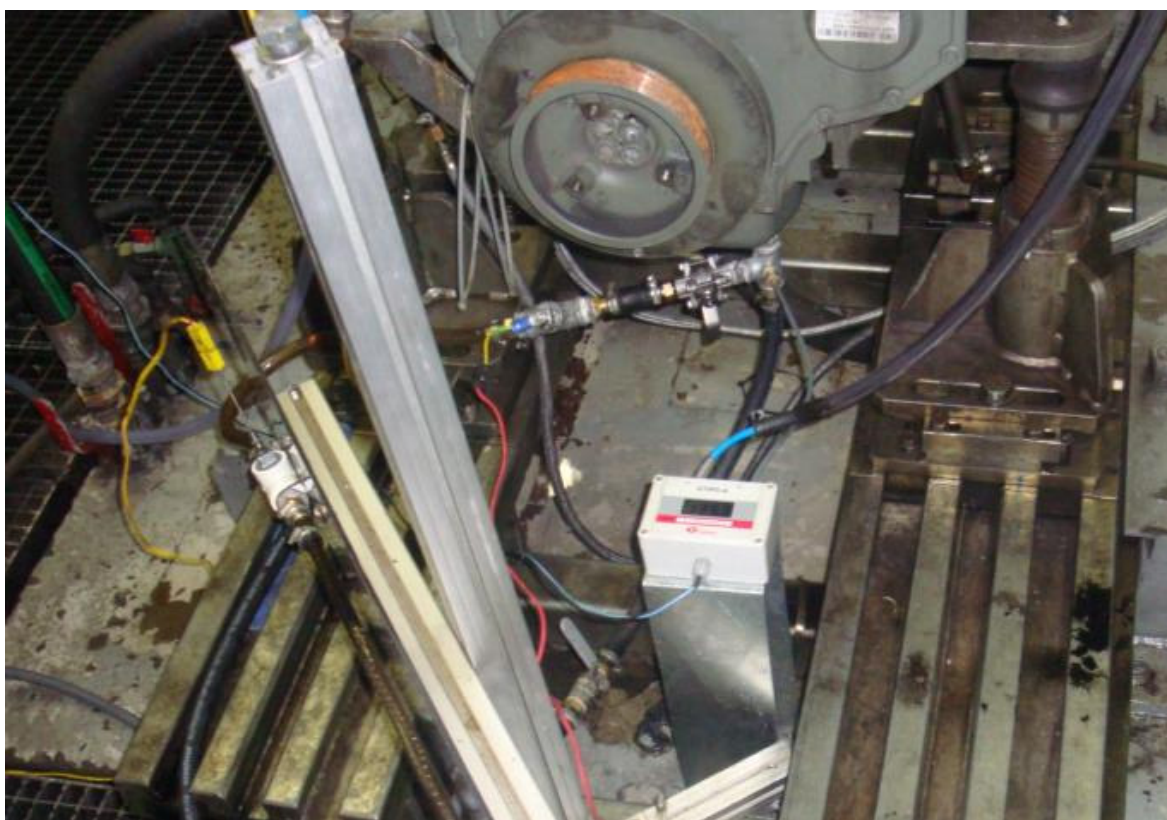


Figura 41: Instalação do transdutor de pressão diferencial utilizado para medição de nível de óleo.

## 3.2 Estudos das variáveis

Para este estudo, vamos considerar as 4 situações propostas para teste:

- 1) Teste com motor parado
  - a. Com vasos comunicantes e nível inclinado
  - b. Com transdutor de pressão
- 2) Teste com motor em funcionamento
  - c. Com vasos comunicantes e nível inclinado
  - d. Com transdutor de pressão

### 3.2.1 - Forma do cárter

Temos a possibilidade de contornar erros provenientes desse parâmetro se adicionarmos, ao final de um período de medição, uma quantidade conhecida de óleo no motor até retornarmos ao nível de óleo inicial e, desta forma, conhecer o consumo no período. Assim, qualquer que seja o formato do cárter não haverá erros oriundos desse parâmetro. Entretanto, um estudo da variação da relação “nível x volume de óleo” é interessante para facilitar o entendimento do fenômeno e também conhecer o consumo durante todo o teste.

Ainda com o mesmo exemplo utilizado na análise teórica, para termos idéia de valores, vamos usar o mesmo motor médio para avaliarmos o nível de precisão necessário no equipamento e a precisão que um método de pesagem tradicional oferece.

Medimos, então, a variação do volume em função do nível nas duas situações propostas; motor parado e motor em funcionamento:

#### **Medição com motor parado**

Para medição com o motor parado, adaptamos um tubo transparente graduado ao lado do cárter e colocamos água gradualmente. Encontramos então a curva característica da Figura 42.



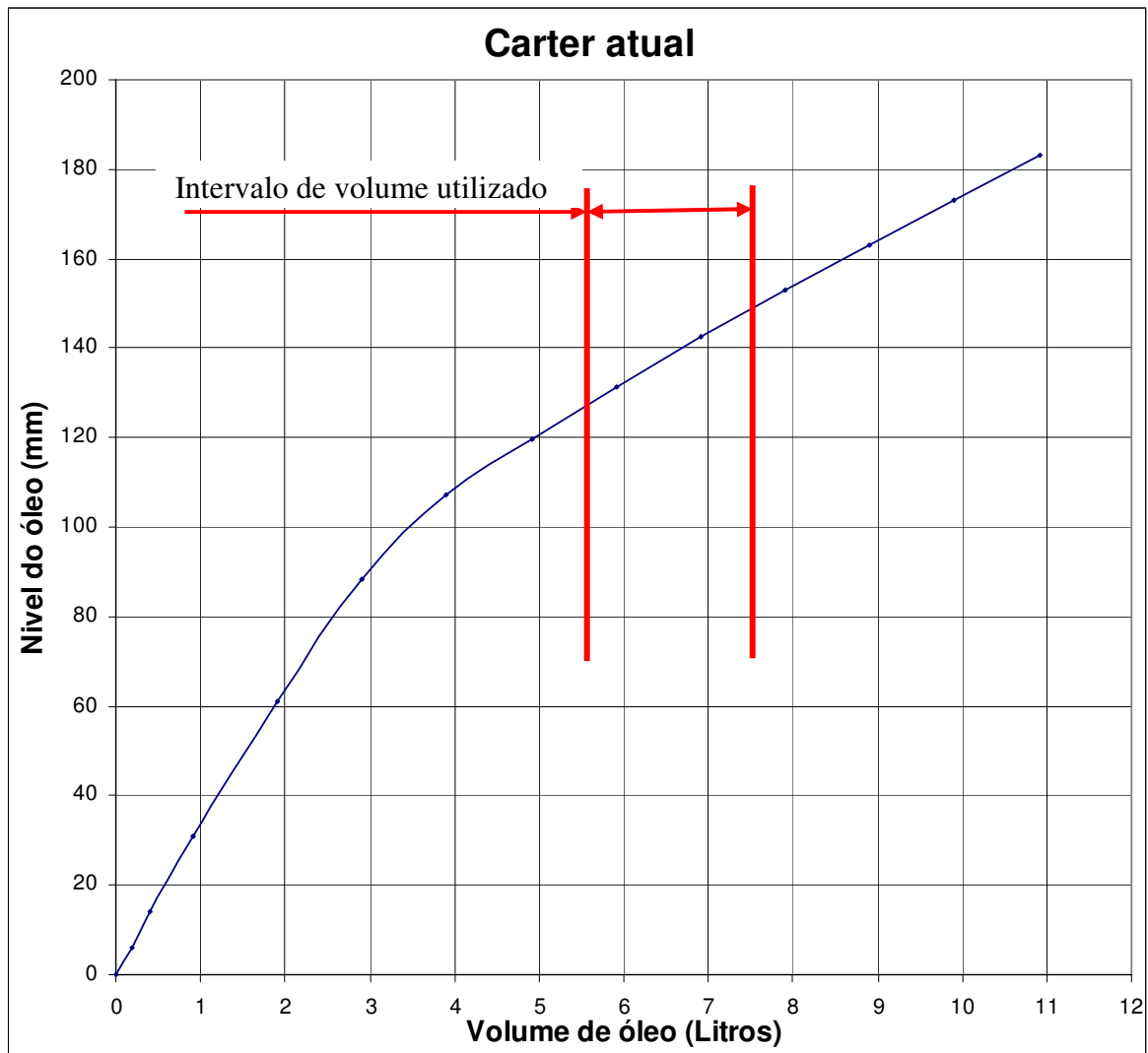


Figura 42: Gráfico que mostra a variação do volume de óleo em função da altura do nível dentro do cárter normal do motor Diesel high speed 3,0L, aplicação de uma pick-up leve de 3500kg PBT.

Num primeiro momento parece que a faixa de utilização está num trecho linear, mas se olharmos com atenção a Tabela 3 observamos que a parte linear desta curva é apenas a partir de 9 litros, quando superamos as formas complexas e temos uma forma uniforme (retangular) da peça. Desta forma, concluímos que, na faixa de utilização deste cárter, a taxa de variação do volume do cárter não é constante em função do formato irregular, não tendo uma relação única de volume x altura do nível, mas nota-se que é em torno de 77g/mm.

Tabela 3: Dados obtidos na medição da altura do nível de óleo em função do volume do cárter em estudo

Volume de óleo (litros)	Nível (mm)	Peso de óleo (kg)	Taxa de variação (ml/mm)	Taxa de variação (g/mm)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,2	6,0	0,2	30,8	26,2
0,4	14,0	0,3	28,1	23,9
1,0	31,0	0,8	29,4	25,0
2,0	61,0	1,6	33,3	28,3
3,0	88,5	2,5	36,4	30,9
4,0	107,2	3,3	53,5	45,5
5,0	119,8	4,2	79,4	67,5
6,0	131,5	5,0	85,5	72,6
7,0	142,5	5,9	90,9	77,3
8,0	153,1	6,7	94,3	80,2
9,0	163,1	7,6	100,0	85,0
10,0	173,1	8,4	100,0	85,0
11,0	183,1	9,3	100,0	85,0

No caso do motor em questão, conhecemos um consumo de óleo considerado normal para os regimes que serão testados que é cerca de 25g/h.

Com estes dados, já podemos identificar a precisão mínima necessária para medição do volume por meio do nível de óleo. Para uma medição com precisão de +/- 3g/h, em um teste de 10h a precisão do equipamento precisa ser menor que 30g ( $10h \times 3g/h$ ).

Para uma taxa de variação de 77g/mm, precisamos medir o nível com uma incerteza de no máximo  $\frac{30g}{77g/mm} = 0,39mm$  no nível. Para o motor em questão teríamos uma variação no nível de  $\frac{25g/h}{77g/mm} = 0,32mm/h$

Para uma medição direta do nível, incerteza de 0,40mm poderia ser obtida com vasos comunicantes comuns, mas com o artifício do “tubo inclinado” melhora-se a precisão.

Já para medição por pressão diferencial, a incerteza precisa ser menor que 4 Pa ou 0,4 mmca, que, conforme comentado anteriormente, é facilmente encontrado.

Uma das maneiras de melhorar a precisão da medição é diminuir a área do reservatório afim de que uma pequena variação de volume gere uma grande variação de nível e assim, um mesmo equipamento consegue uma melhor precisão na medição da variação do volume. Assim, foi confeccionado, então, um cárter especial deste motor de forma que ainda se possa ensaiar o motor com um volume de óleo similar ao original. Segue na Figura 43 e Figura 44 fotos do cárter

normal de produção, do protótipo preparado para melhorar a precisão do método e desenho comparativo do protótipo com o cárter original na Figura 45.



Figura 43: Foto do cárter normal de produção aplicado no motor em estudo.



Figura 44: Fotos do cárter especial preparado para melhorar resolução na medição do volume do óleo por meio do monitoramento do nível do mesmo dentro do cárter

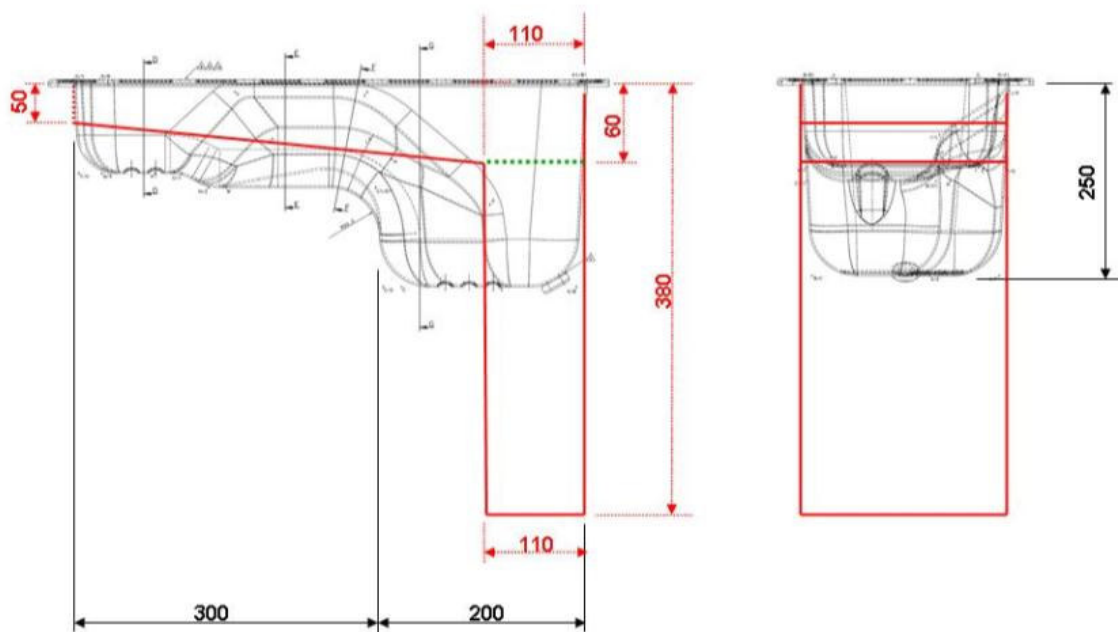


Figura 45: Comparativo do cárter original do motor com o protótipo construído para aumentar a precisão da medição. Pequena variação do volume gera grande variação de nível.

Resultados obtidos com este cárter, podem ser observados na Tabela 4 e Figura 46.

Tabela 4: Valores obtidos da variação da altura de nível em função do volume de óleo dentro do cárter proposto para melhorar precisão.

Volume de óleo (litros)	Nível (mm)	Massa de óleo (kg)	Taxa de variação (ml/mm)	Taxa de variação (g/mm)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,0	45,0	0,8	21,1	17,9
2,0	91,8	1,7	21,4	18,2
3,0	138,8	2,5	21,3	18,1
4,0	185,5	3,4	21,4	18,2
5,0	232,3	4,2	21,4	18,2
6,0	279,1	5,1	21,4	18,2
7,0	325,0	5,9	21,8	18,5
8,0	339,5	6,8	69,0	58,6
9,0	350,3	7,6	92,6	78,7
10,0	360,5	8,5	98,0	83,3
11,0	369,5	9,3	111,1	94,4

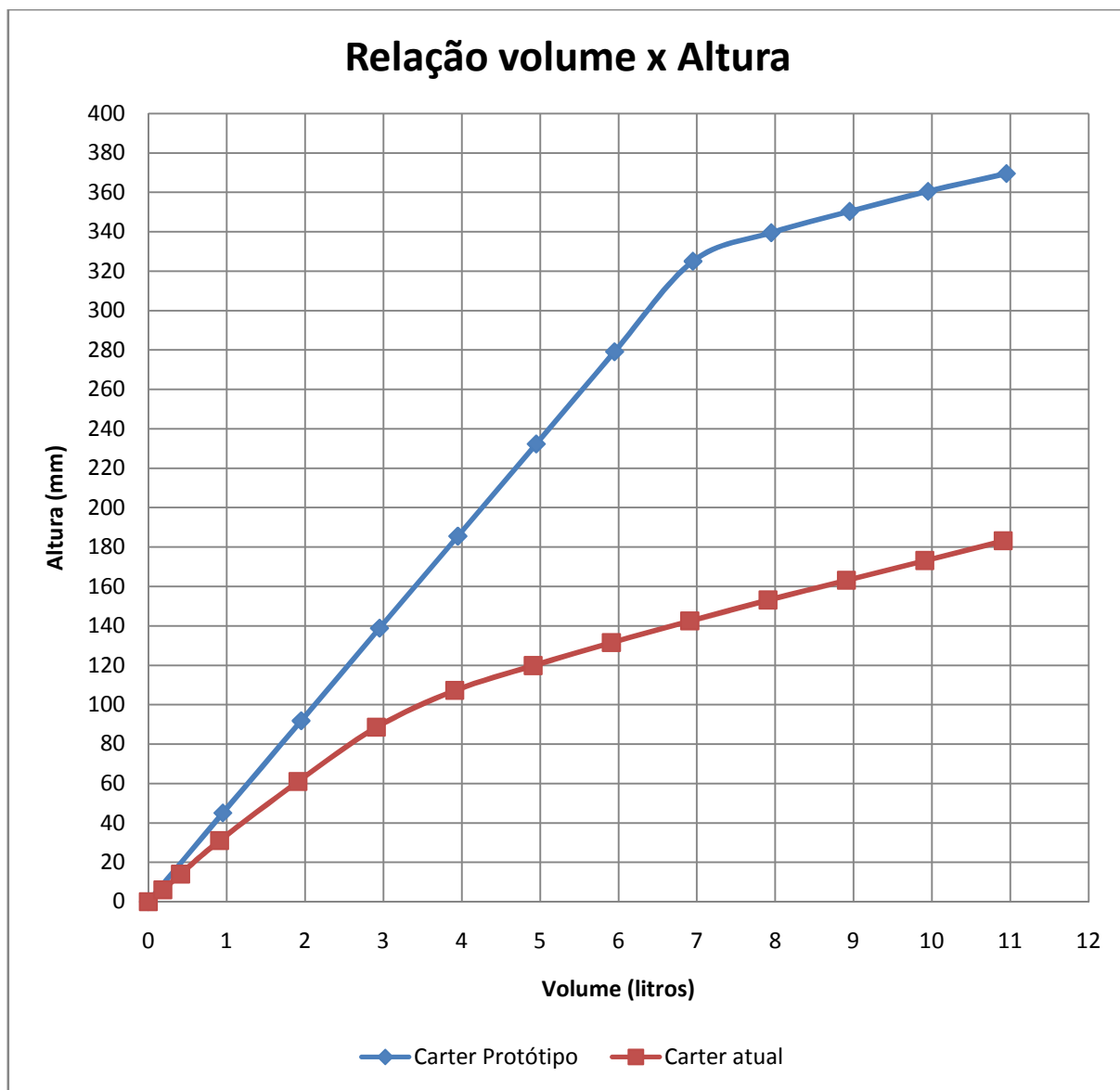


Figura 46: Gráfico da variação da altura de nível em função do volume de óleo dentro do cárter proposto para melhorar precisão.

Vê-se que numa comparação com o cárter original do motor a precisão pôde ser melhorada de 85g/mm para cerca de 18g/mm (em torno de cinco vezes), o que já mostra um caminho para a melhoria da precisão, caso seja necessário em função da incerteza total do sistema de medição ou para diminuição do tempo de teste de 10 para 2 horas, por exemplo.

Nesta proposta, para uma medição do nível com a mesma precisão proposta, a incerteza admissível na medição do nível subiria de 0,4mm para 2,0mm.

### Medição com motor em funcionamento

Para medição com o motor em funcionamento, após a estabilização do nível, foram retirados pequenos volumes de óleo e analisada a leitura do nível com o tubo inclinado e com o transmissor de pressão.

Para teste com tubo inclinado, após a retirada do volume de óleo, iniciava-se o cronômetro e era aguardado o nível se estabilizar para definir o valor do mesmo, normalmente após 25 minutos. Retiramos mais uma quantidade de óleo e anotamos o nível por mais 25 minutos. Assim, fizemos isto sucessivamente até um total de 500 gramas de óleo do motor. Os resultados estão na Figura 47. Em função da montagem do sistema, para retirada do volume de óleo necessitava-se: 1)fechar o registro que ligava os vasos comunicantes; 2)abrir um registro para retirada do óleo; 3)fechar esse registro após de drenagem e 4)abrir novamente o registro para o vasos comunicantes. Como o procedimento era manual, existem algumas diferenças no formato da curva após o acionamento do cronômetro, mas isto não interfere no resultado, pois aguardamos a estabilização do valor para definir o novo nível. O valor indicado representa o nível em relação a um ponto inicial imaginário, próximo ao nível de óleo mínimo do motor.

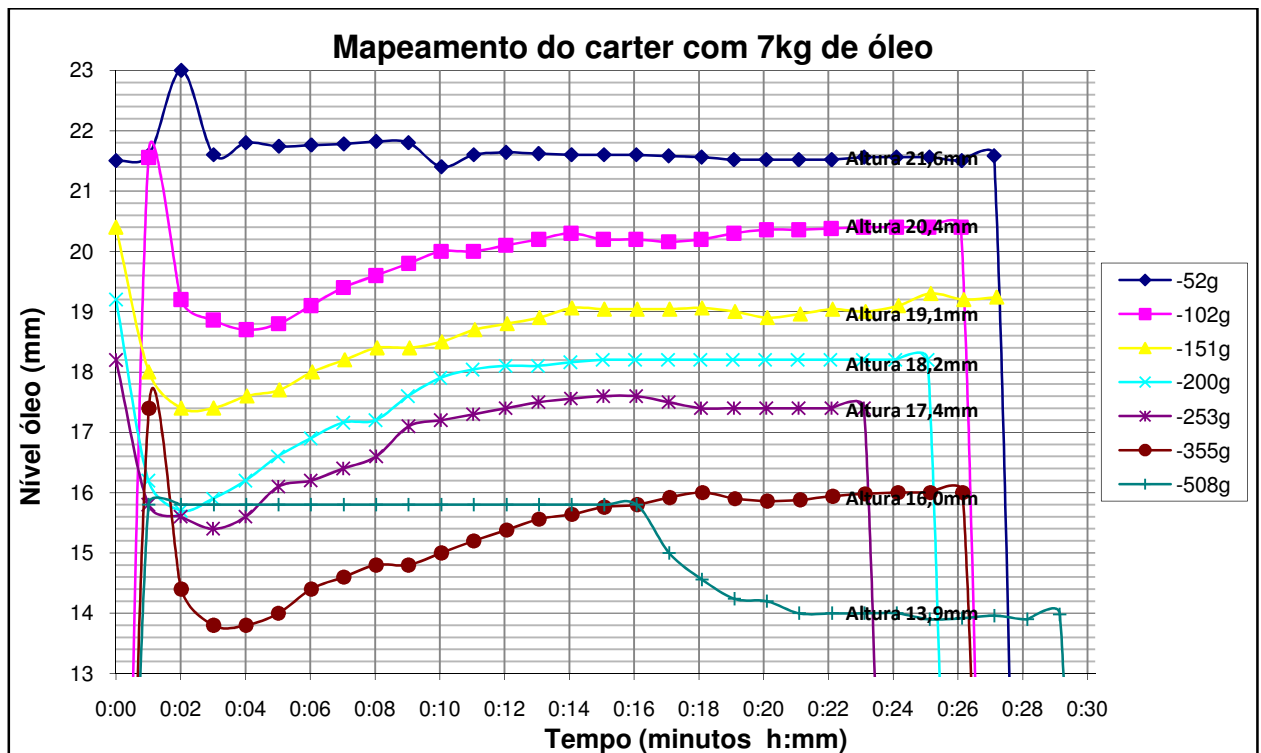


Figura 47: Gráfico de nível de óleo em função do tempo após a retirada de quantidades diferentes de óleo do cárter que utiliza a medição de nível por tubo inclinado.

A partir deste gráfico podemos obter as seguintes taxas de variação mostrado na Tabela 5.

Tabela 5: Taxa de variação do cárter medida com motor em funcionamento com o uso do método de medição de nível por tubo inclinado

Óleo retirado (g)	Nível lido (mm)	Taxa de variação (g/mm)
52	21,6	
102	20,4	43,5
151	19,1	40,4
200	18,2	44,2
253	17,4	48,4
355	16,0	54,6
508	13,9	59,6

Nos testes com transdutor de pressão, temos a vantagem de ter a leitura automatizada e, assim, apenas retiramos uma quantidade de óleo e aguardamos 5 minutos para retirada da próxima. Repetimos isto 6 vezes conforme podemos observar na Figura 48. Tivemos que utilizar outro motor, pois o motor utilizado para medição por tubo inclinado não estava mais disponível. Este é um motor de 4 cilindros, 4,2 litros de cilindrada total e, aplicado em caminhões pequenos até 12 toneladas.

Aqui, o valor de nível indicado representa a distância até transdutor de pressão, que se encontrava próximo ao fundo do cárter.

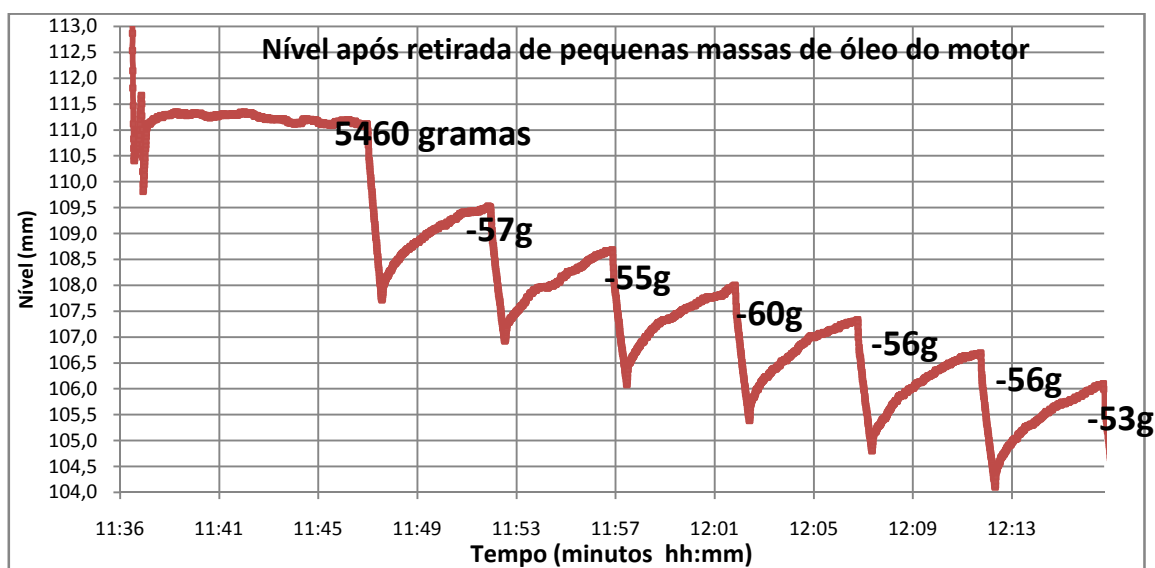


Figura 48: Variação do nível de óleo do motor com a retirada de pequenas quantidades de óleo para mapear a relação Volume x Nível com o uso de um transdutor de pressão. O gráfico mostra a média móvel de 30 segundos de medição com frequência de aquisição de 2Hz.

Obtemos com este gráfico as seguintes taxas de variação:

Tabela 6: Taxa de variação do nível em função da massa de óleo

Delta massa (g)	Massa (g)	Nível (mm)	Delta Nível (mm)	Taxa g/mm
	5460	111,1		
57	5403	109,4		
55	5405	108,7	0,7	
60	5400	108,0	0,7	82,1
56	5404	107,4	0,6	85,5
56	5404	106,7	0,7	84,1
53	5407	106,1	0,6	84,8

A primeira retirada de óleo não foi considerada, pois o motor encontrava-se estabilizado a muito mais que 5 minutos, diferentemente das outras medições. A medição consecutiva também não foi considerada, pois a resolução do aparelho para uma variação tão pequena representa 15% do valor lido. Então, a partir da terceira medição iniciamos o cálculo da taxa de variação, que podemos considerar, portanto, em torno de 85gramas/mm.

Conforme comentado no início desse item, podemos evitar erros provenientes desse parâmetro, se adicionarmos ao final de um período de medição uma quantidade conhecida de óleo no motor até retornarmos ao nível de óleo inicial e, desta forma, conhecer o consumo no período. Assim, qualquer que seja o formato do cárter não imputará erros oriundos desse parâmetro. De qualquer forma este estudo é útil para orientar a quantidade de óleo necessário para voltar ao valor inicial, além de coletar mais dados para análise de fatores de correção e aumentar o entendimento dos fenômenos que ocorrem nesse tipo de medição.

### 3.2.2 - Temperatura do óleo

Para estudar a influência da temperatura do óleo com o motor em funcionamento, realizamos um teste de variação da temperatura do óleo sem alterar outros parâmetros do motor por meio do aumento de carga.

Primeiramente, para teste com sistema de nível inclinado, fizemos 3 medições com a temperatura do óleo de 98 a 112°C. Devido a restrições no recurso do dinamômetro, foi



necessária a parada do motor entre cada medição sendo necessário um tempo de estabilização para cada teste, o que explica as interrupções do gráfico da Figura 49.

Conforme discutido anteriormente no capítulo 2.4 Análises das variáveis, a temperatura do óleo e a sua diferença com a temperatura ambiente pode influenciar de duas maneiras no nível medido: variação no volume do óleo e variação na densidade. Ao aplicarmos a correção proposta dada pela fórmula 2.7, plotamos a curva vermelho no gráfico. Apenas lembrando:

$$Nc = Nl - 0,098 \times (Tol - Tor + Tar - Tal) - 0,054 \times (Tor - Tol)$$

Sendo:

Nc = Nível corrigido

Nl = Nível lido

Tor = Temperatura do óleo do cárter de referência

Tol = Temperatura do óleo do cárter lido

Tar = Temperatura ambiente de referência

Tal = Temperatura ambiente lida

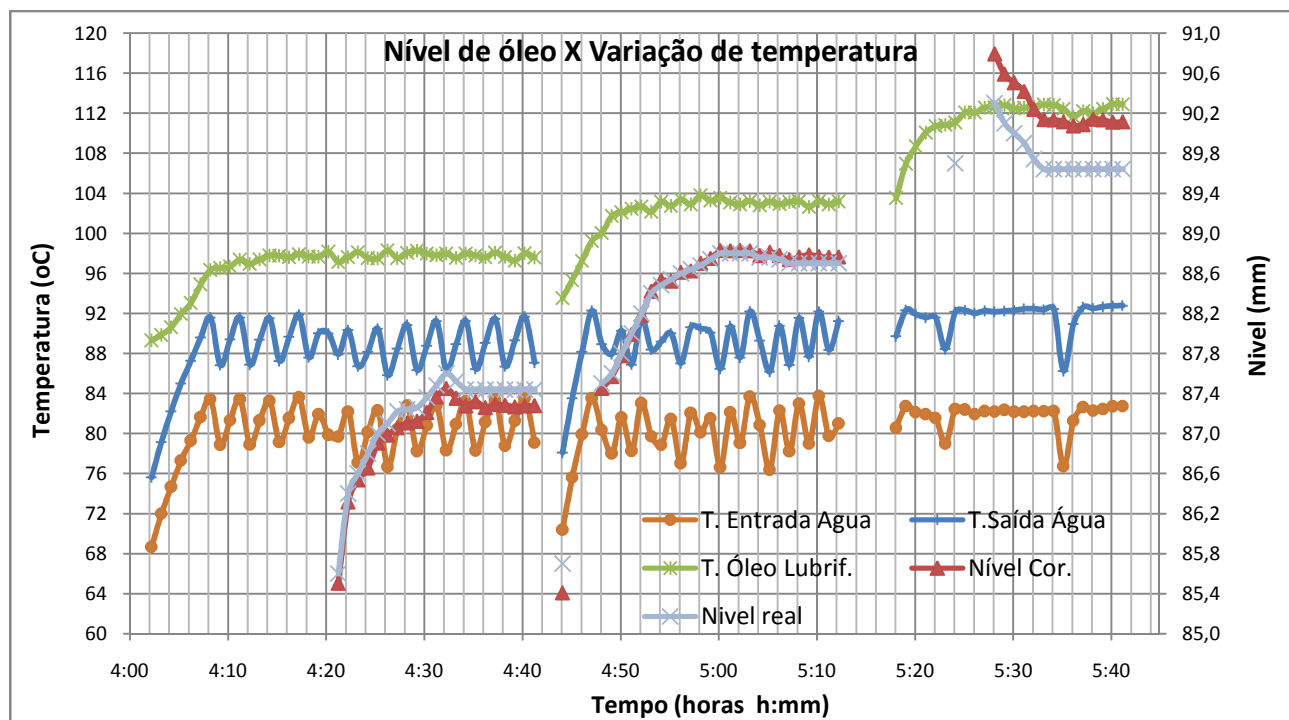


Figura 49: Variação do nível de óleo no cárter em função da temperatura do óleo a 2000rpm. Em vermelho os valores com o uso do fator de correção.

Vê-se que com o motor em funcionamento, a temperatura de óleo influencia diretamente no nível do óleo, o que indica a necessidade de controle da mesma.

Realizamos ainda uma medição com o transdutor de pressão, mas nesse caso, estabilizamos o motor a uma temperatura acima da estabilização e diminuimos a carga do motor. Após estabilizar a temperatura baixa, colocamos carga no motor até a estabilização e depois, repetimos estes passos para verificar a repetibilidade. O resultado está na Figura 50.

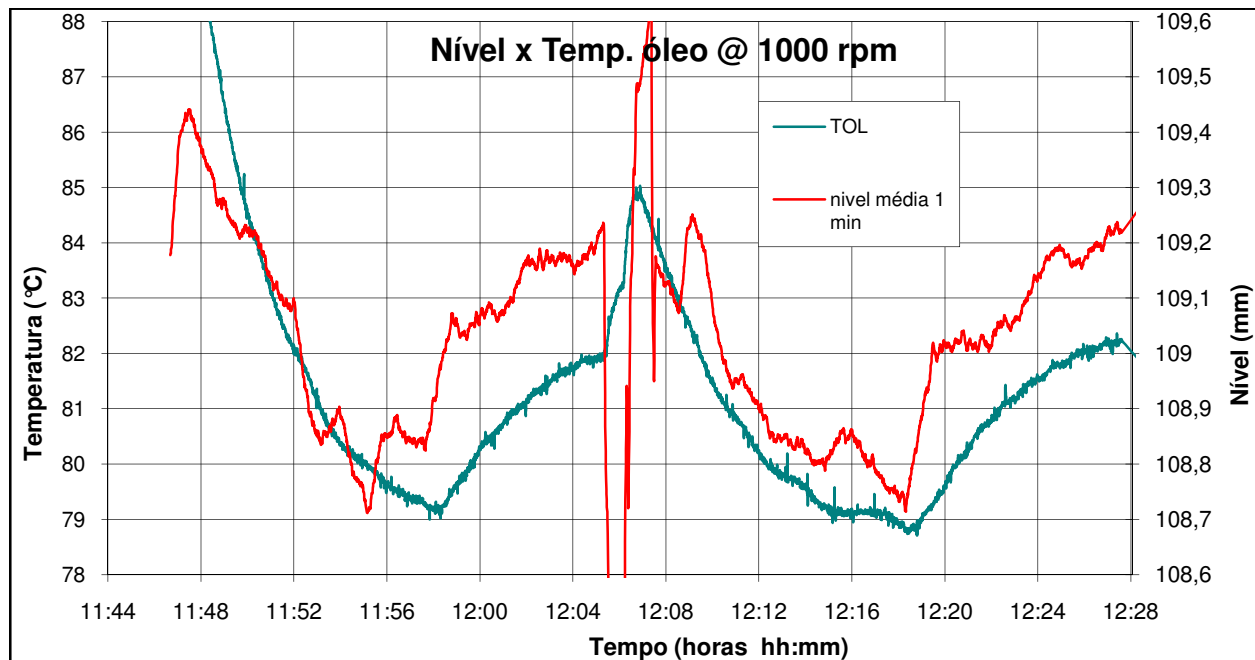


Figura 50: Variação do nível do óleo em função da sua temperatura com o uso de um transdutor de pressão para medição. Os valores são a média móvel de 1 minuto de medição.

Vê-se que obtivemos uma boa repetibilidade e, o gráfico reforça a necessidade de um controle da temperatura do óleo para evitar erros na medição.

O uso de um fator de correção em ambos os tipos de medição não é recomendado, pois é fácil condicionar o motor a uma determinada temperatura do óleo, e assim não faz sentido a utilização desse recurso.

Para testes com o motor parado, a temperatura do óleo é o parâmetro utilizado para controle do momento de parada do motor. Assim, não são esperados erros nesse parâmetro uma vez que ele é o ponto de controle. Desta forma, não foram realizados experimentos com o motor parado para este parâmetro, entretanto, podemos prever uma diferença significativa do nível para variações de temperatura. Fica como sugestão para trabalhos futuros.

### 3.2.3 - Temperatura do motor

Para estudar a influência da temperatura do motor (líquido de refrigeração) na medição do nível de óleo, monitoramos o nível enquanto variamos a temperatura do motor. Segue os resultados obtidos:

Para teste com o motor parado, repetimos 4 vezes um procedimento de parada do motor e alteramos a temperatura inicial em uma das medições. Para compor o gráfico, consideramos o tempo “zero” no instante que o motor pára. Na Figura 51, temos os 4 minutos anteriores a parada do motor e o comportamento do nível após a parada do motor.

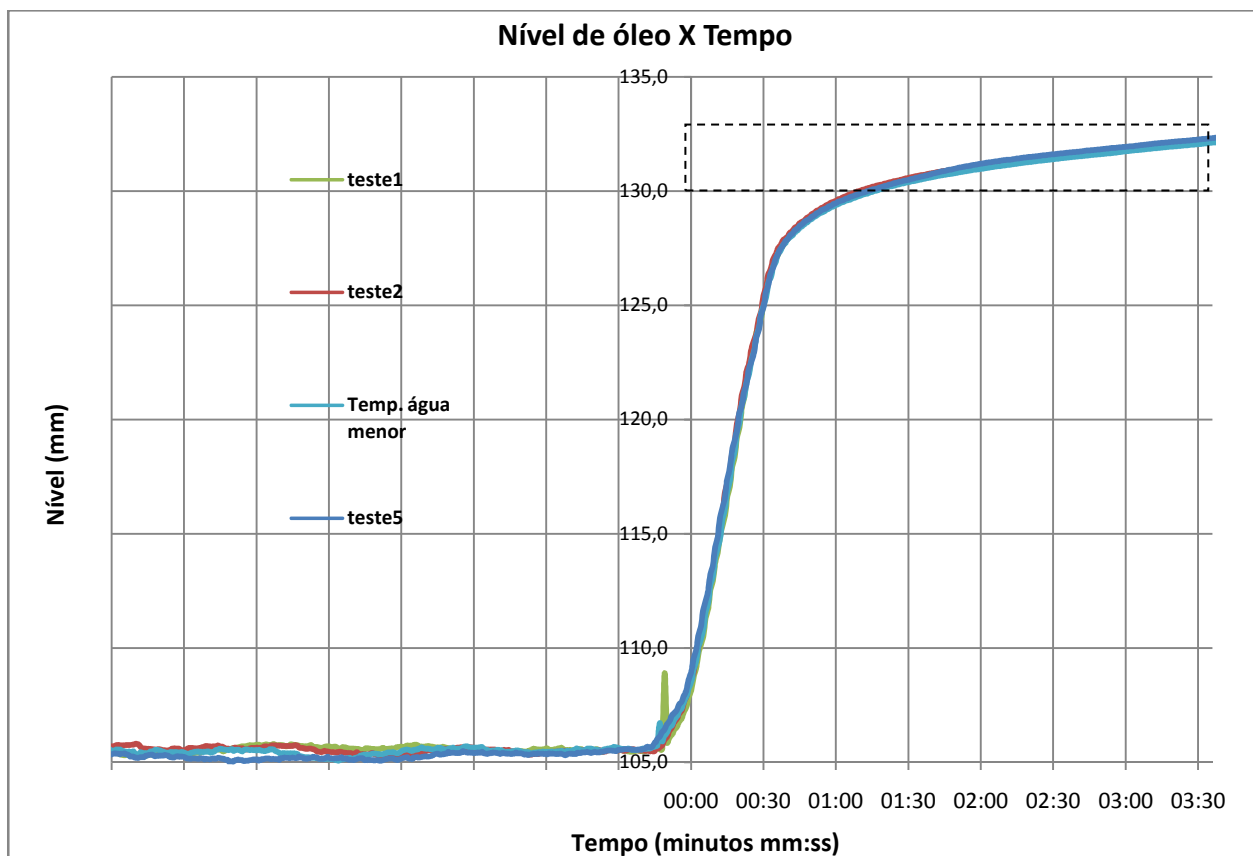


Figura 51: Variação do nível de óleo após a parada do motor. A linha tracejada mostra a parte que foi ampliada no gráfico da Figura 52

Ao ampliarmos a região do nível após a parada, podemos verificar o comportamento do nível após a parada do motor, onde verificamos o descolamento da curva azul, que equivale a uma temperatura inferior no momento de parada do motor, conforme mostra a Figura 52.

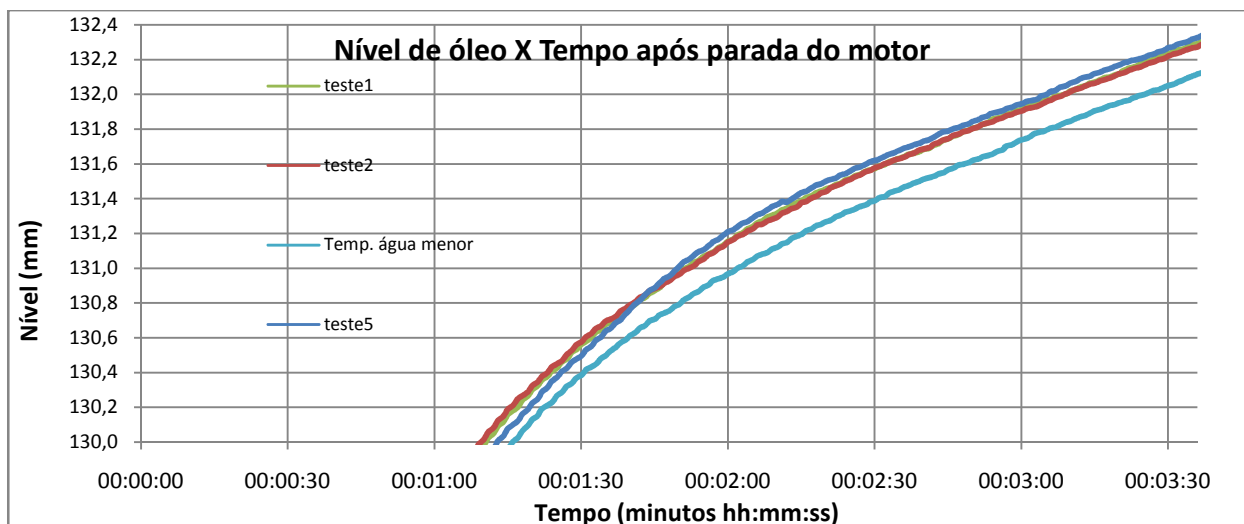


Figura 52: Ampliação da área do gráfico do comportamento do nível após a parada do motor na repetição de 4 testes. A linha azul mostra o teste com a temperatura da água em um valor inferior

E finalmente, na Figura 53, mensuramos a diferença de temperatura da água entre estas 4 medições no momento da parada do motor, no instante considerado o tempo “zero” e após ele.

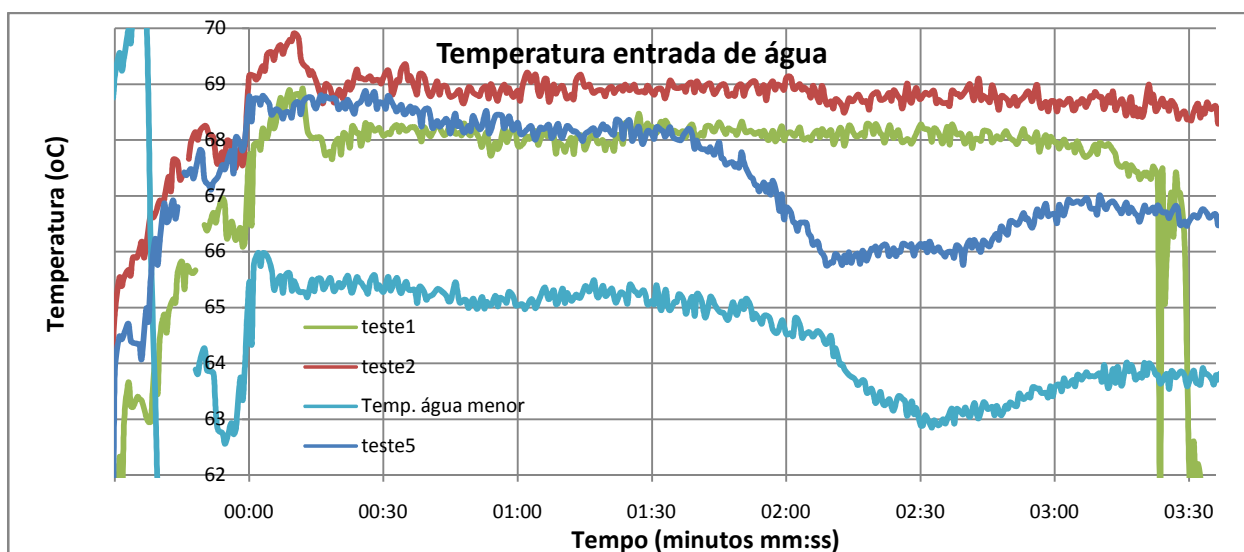


Figura 53: Temperatura da água do motor no momento de parada do motor e nos minutos posteriores.

Vê-se que a diferença de apenas 3 graus na temperatura da água do motor, representou uma diferença de nível de 0,2mm, que mostra a importância desse controle.

Para o teste com o motor em funcionamento, forçamos o resfriamento da água do motor, com a passagem de água resfriada no motor e depois aquecemos novamente para verificar a

repetibilidade do valor inicial. No caso do teste com transdutor de pressão, repetimos duas vezes o experimento para confirmar a estabilização das temperaturas e nível.

Primeiramente, na Figura 54, os dados obtidos com o sistema de nível inclinado com os dados anotados manualmente.

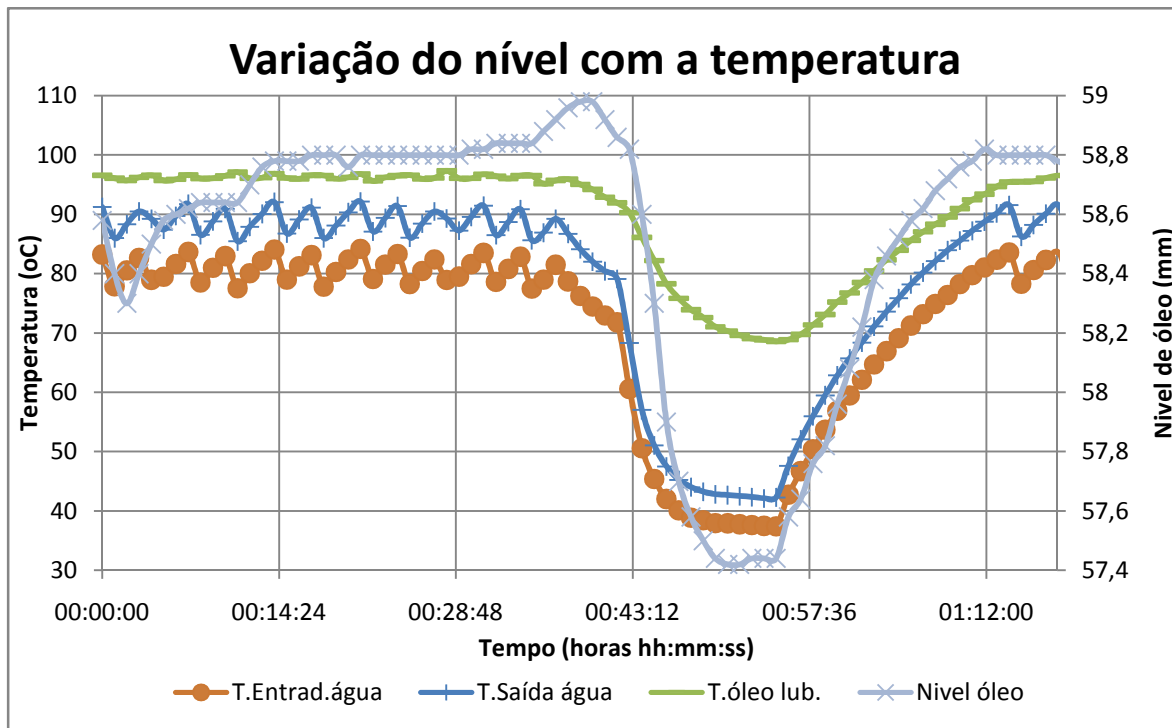


Figura 54: Gráfico da variação do nível do óleo em função da temperatura da água do motor com o uso de o sistema de vasos comunicantes e tubo inclinado

Vê-se que nesse experimento a temperatura da água influencia diretamente o nível de óleo. Porém, podemos observar que a temperatura do óleo varia também. Desta forma, para conhecer a real influência da temperatura da água no nível de óleo, teríamos que montar um sistema de aquecimento do óleo para avaliar apenas o parâmetro temperatura de água, e manter o óleo constante. Devido aos recursos disponíveis, não foi possível efetuar essa medição. Entretanto, não acreditamos que traga prejuízos ao nosso estudo uma vez que a temperatura da água é facilmente controlada.

Apenas para termos idéia de valor, encontramos as taxas de variação de nível mostradas na Tabela 7:

Tabela 7: Taxas de variação de nível em função da variação das temperaturas da água e do óleo, encontradas durante o experimento de variação da temperatura da água do motor, com o uso do sistema de nível inclinado.

Temperatura da água	Temperatura do óleo	Nível de óleo	Taxa de variação pela água	Taxa de variação pelo óleo
88	96	58,8	0,03mm/°C	0,05mm/°C
42	69	57,4		

Como nesse motor a taxa de variação do nível é em torno de 80g/mm, ou 8g/0,1mm, falamos de erros de leitura em torno de 3g/°C da temperatura de água ou 4g/°C da temperatura do óleo.

E na Figura 55, temos este mesmo experimento com o uso de um sensor de pressão diferencial mas em um outro motor, pois o motor anterior estava indisponível para teste. Utilizamos novamente o motor 4 cilindros 4,2 litros descrito no parâmetro 1.

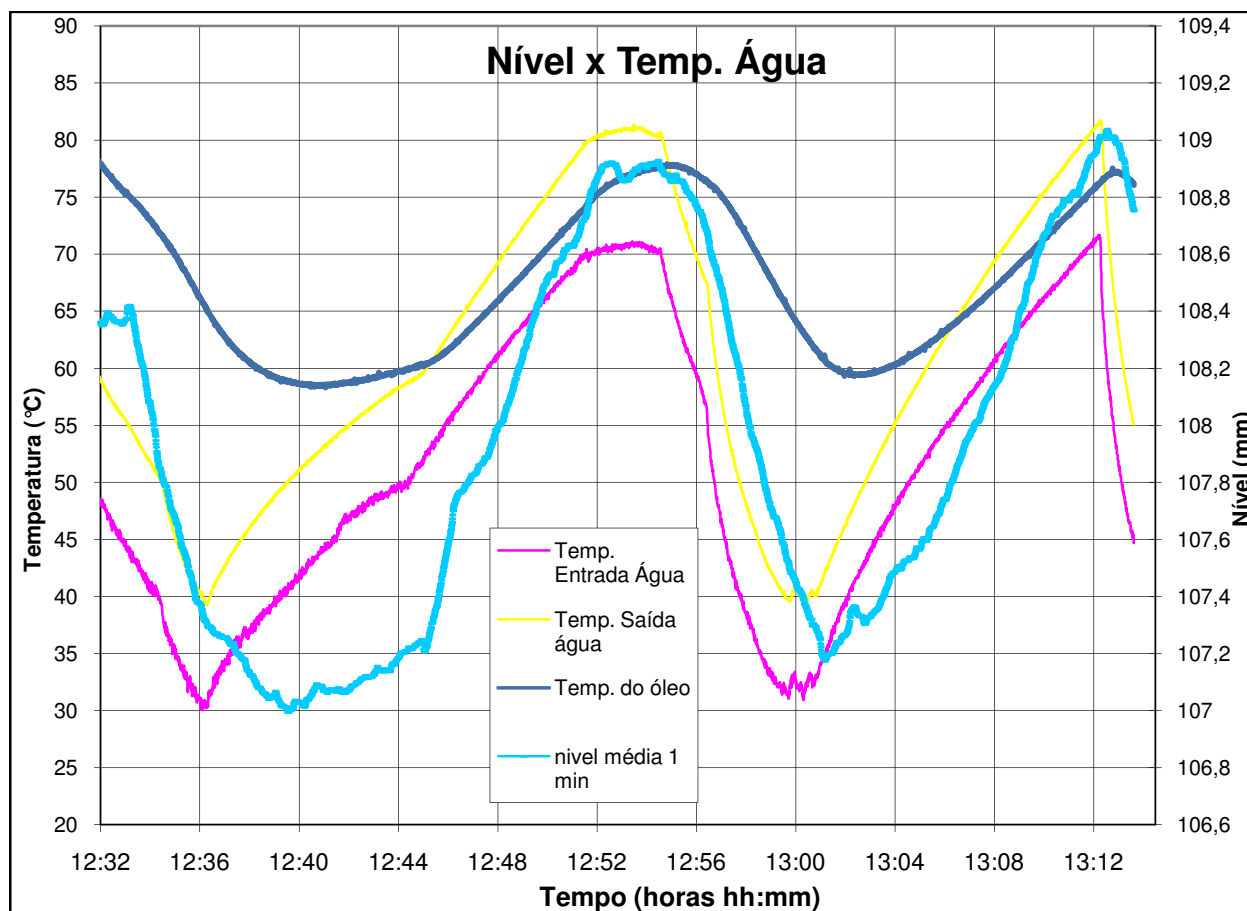


Figura 55: Variação do nível de óleo em função da alteração da temperatura da água do motor com o uso do transdutor de pressão diferencial.

Ao analisar os dados nos mesmos moldes da avaliação com nível inclinado, obtemos os valores mostrados na Tabela 8:

Tabela 8: Taxas de variação do nível em função da variação das temperaturas da água e do óleo, encontradas no experimento de variação da temperatura da água do motor, com o uso do transdutor de pressão diferencial.

<b>Temperatura da água</b>	<b>Temperatura do óleo</b>	<b>Nível de óleo</b>	<b>Taxa de variação pela água</b>	<b>Taxa de variação pelo óleo</b>
80	77	109,0	0,05mm/°C	0,11mm/°C
40	59	107,1		

Vê-se que novamente que temos uma forte influência da temperatura da água no nível. Entretanto, assim como no teste por nível inclinado, outro experimento necessita ser feito com a variação apenas da temperatura da água.

### **3.2.4 - Tempo que o motor está parado.**

Para conhecer a influência do fator “tempo” na medição, repetimos o teste com motor parado algumas vezes e monitoramos o nível de óleo no cárter conforme o gráfico da Figura 56. O gráfico mostra o teste com sistema de vasos comunicantes com medição por tubo inclinado, onde o tempo “zero” significa o momento da parada. Para se obter essas curvas, o motor foi condicionado sempre na mesma rotação e temperatura do óleo. Além disso, a posição dos componentes internos também foi repetida, ao colocarmos sempre o virabrequim no PMS após o desligamento do motor.

As curvas que iniciam em um valor elevado foram obtidas com a manutenção do nível do tubo próximo ao valor final estimado com motor parado, com o uso de um registro na parte inferior do sistema de vasos comunicantes, que era mantido fechado durante o condicionamento do motor. Segundos após a parada, o registro era aberto e, então, acompanhado o nível. Existem, portanto, curvas que iniciam num nível elevado, diminuem, em seguida sobem, e outras, que iniciam em valores baixos e sobem, que indica como é realmente o comportamento.

Com este teste, avaliamos se o comportamento do nível inclinado estava vulnerável a inércia do sistema de vasos comunicantes ou se realmente a demora no aumento do nível era

fruto da velocidade que o óleo desce ao cárter. Além disso, conseguimos avaliar a velocidade de resposta deste sistema a fim de verificar se existiam diferenças de medida caso o nível inclinado estivesse inicialmente em valores diferentes devido ao momento de abertura do registro.

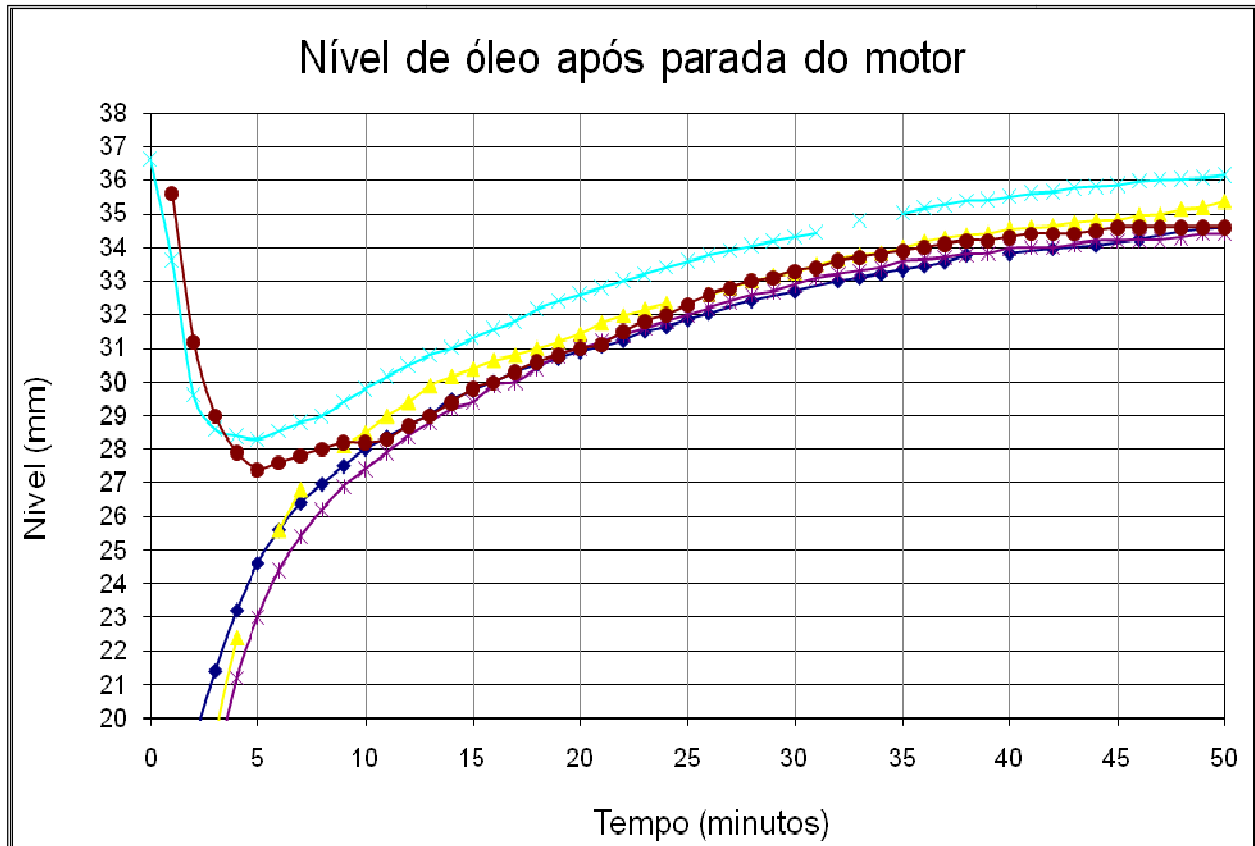


Figura 56: Avaliação do comportamento do nível de óleo no tempo, após a parada do motor, com o uso de um tubo inclinado para medição do nível.

Vê-se que não é possível obter uma precisão melhor que 1 mm (aproximadamente 90ml) por esse método, o que numa primeira análise o inviabiliza. Observamos que o tempo de resposta do sistema realmente é longo, sendo necessário em torno de 10 minutos para indicar o nível correto, caso exista uma variação brusca no nível em um dos lados.

Para os testes com transdutor de pressão os resultados foram muito melhores. O comportamento é o mostrado anteriormente na Figura 51 da página 77. Da mesma forma ampliamos a parte do gráfico para mostrar a diferença entre uma medição e outra conforme Figura 57.



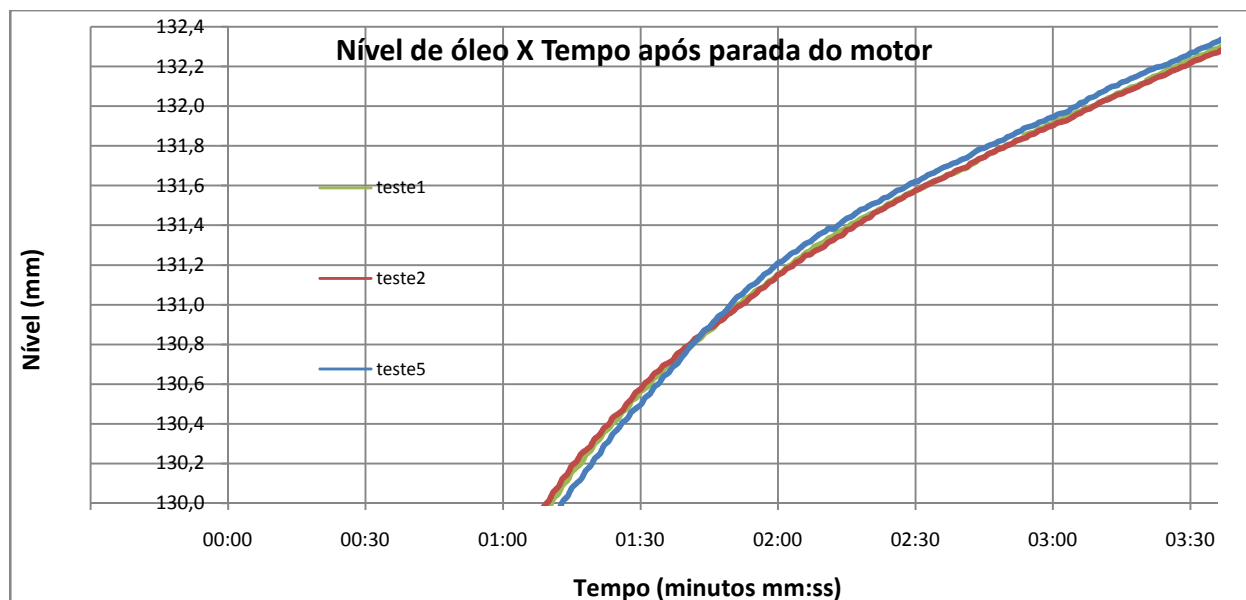


Figura 57: Repetição de três testes nas mesmas condições para avaliar o comportamento do nível de óleo após a parada do motor, com o uso de um transdutor de pressão para medição.

Nesse caso, podemos observar que é possível obter uma repetibilidade melhor que 0,1mm, o que mostra um método muito promissor, apesar da desvantagem de precisar parar o motor para efetuar o procedimento de medição.

### 3.2.5 - Posição de parada dos componentes internos do motor.

Não foi possível realizar esse experimento devido a disponibilidade do banco de teste. É recomendável que um estudo mais aprofundado desse assunto seja feito em estudos futuros. Por enquanto recomenda-se a continuação desse procedimento, porém, com o cuidado de girar o motor no sentido de giro normal para evitar que se retire óleo das galerias, o que poderia ocasionar um aumento de nível no cárter, uma vez que a bomba de óleo do motor é do tipo deslocamento positivo, que invariavelmente enviará óleo no sentido contrário caso se inverta a rotação.

### 3.2.6 - Temperatura ambiente.

A fim de avaliar a influência da temperatura ambiente externa da sala de teste, foi realizada uma medição indireta. Induzi uma variação da temperatura da sala como se tivéssemos

temperatura ambiente externa diferentes, por meio da variação da renovação do ar interno da sala de teste. Assim, a temperatura não foi alterada, mas apenas a dissipação do calor, que, para avaliar a influência no nível de óleo, já é o suficiente.

Para medições com o motor parado, o tempo tem influência na temperatura da sala; então, fizemos um estudo do comportamento do nível com temperaturas diferentes no momento de parada do motor. O resultado está no gráfico da Figura 58.

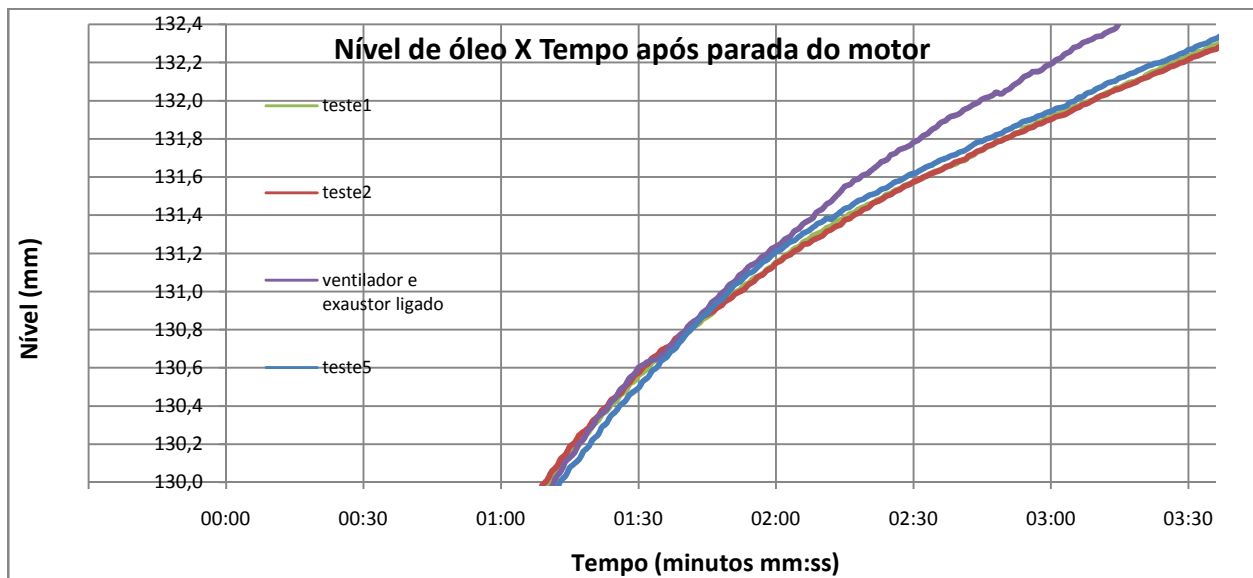


Figura 58: Influência na variação da temperatura do ar ambiente no comportamento do nível de óleo após a parada do motor com o uso de um transdutor de pressão diferencial.

Vê-se, na Figura 58, que a temperatura ambiente teria forte influência na medição de nível, com diferenças após 2 minutos da parada do motor. Isto de certa forma inviabiliza esse tipo de teste, pois dificilmente se conseguirá valores de temperatura da sala de teste similares em dias frios e quentes. Mesmo que o teste tenha sido simulado, com o exaustor de sala ligado, ou seja, com troca do ar da sala de teste, há possibilidade de realmente existir pequena diferença entre dias quentes e frios. No entanto, podemos desenvolver um fator de correção, mas essa é uma sugestão para trabalhos futuros caso exista o interesse de se desenvolver o método com motor parado.

Nota-se também a alteração na velocidade de resfriamento do óleo do motor, como pode se observar na Figura 59. Isto de certa forma explica a diferença encontrada no nível de óleo no gráfico da Figura 58.

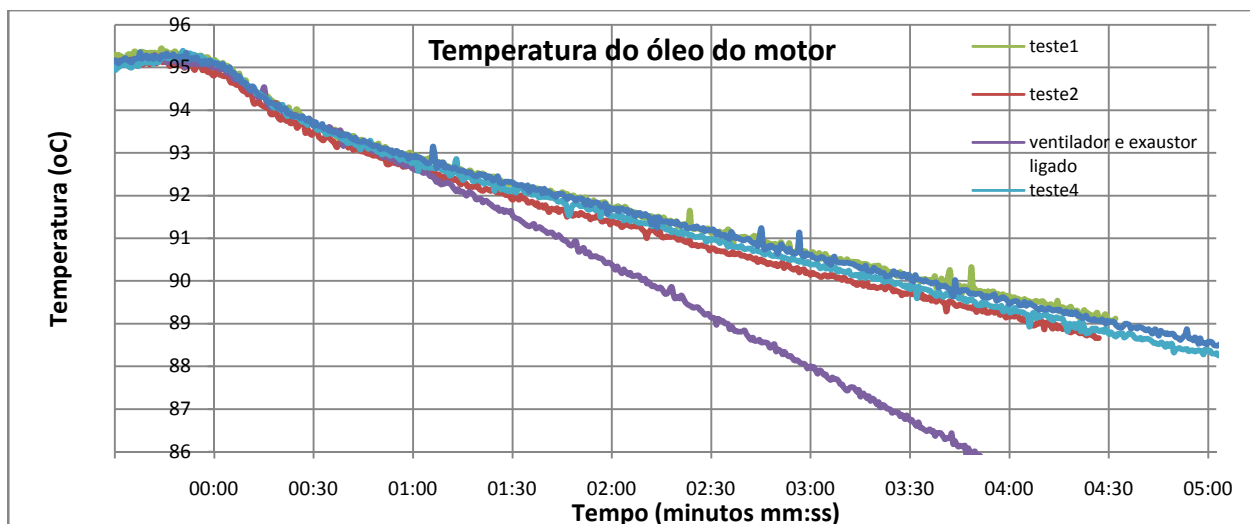


Figura 59: Gráfico que mostra a influência da temperatura ambiente na velocidade de resfriamento do óleo lubrificante

Para medições com o motor em funcionamento, fizemos o monitoramento enquanto induzia a variação da temperatura ambiente pelo desligamento dos exaustores e ventiladores da bancada de teste. Após 2 horas, os ventiladores foram ligados novamente para avaliar se a temperatura e nível voltavam ao valor inicial, que, de fato, foi observado. Os resultados com medição por nível inclinado estão no gráfico da Figura 60.

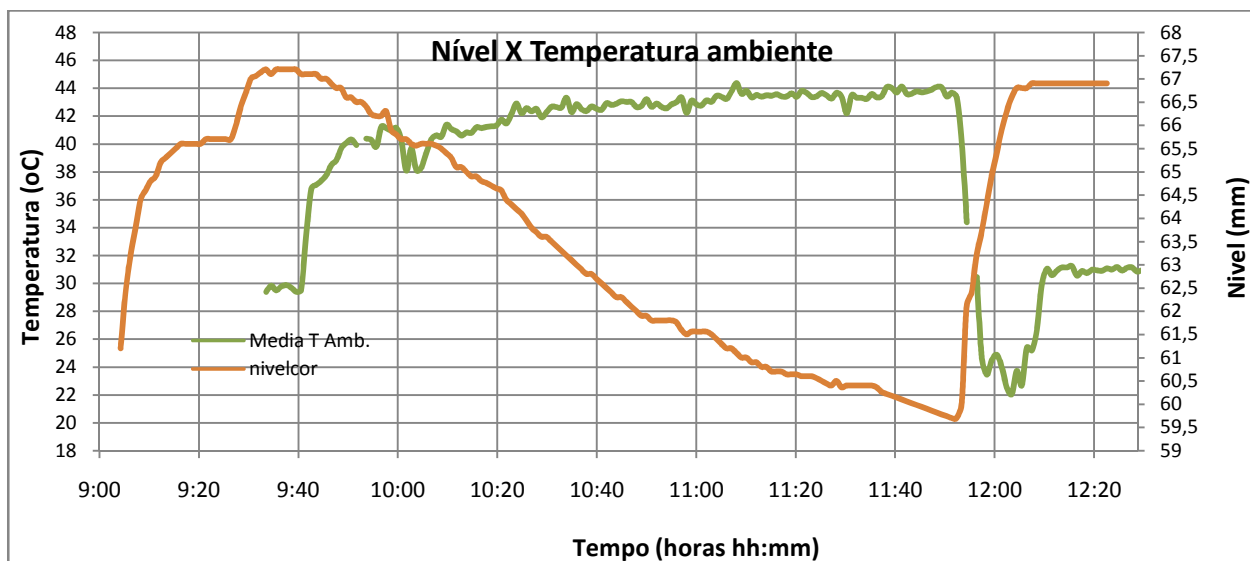


Figura 60: Variação do nível de óleo em relação a temperatura ambiente em teste com o motor em funcionamento

A diminuição da temperatura de 29 para 22°C foi devido a abertura de uma porta para aumentar o fluxo de ar e diminuir a temperatura da sala. Mas ao final do teste observamos que a temperatura voltou ao valor inicial, quando fechamos a porta.

Vê-se que a temperatura interna da sala influencia de forma direta o nível de óleo no cárter; porém, é importante notar que influenciou também na temperatura do óleo lubrificante, conforme Figura 61. Assim seria necessário verificar qual foi a parcela de influência da temperatura do ar e a parte da temperatura do óleo.

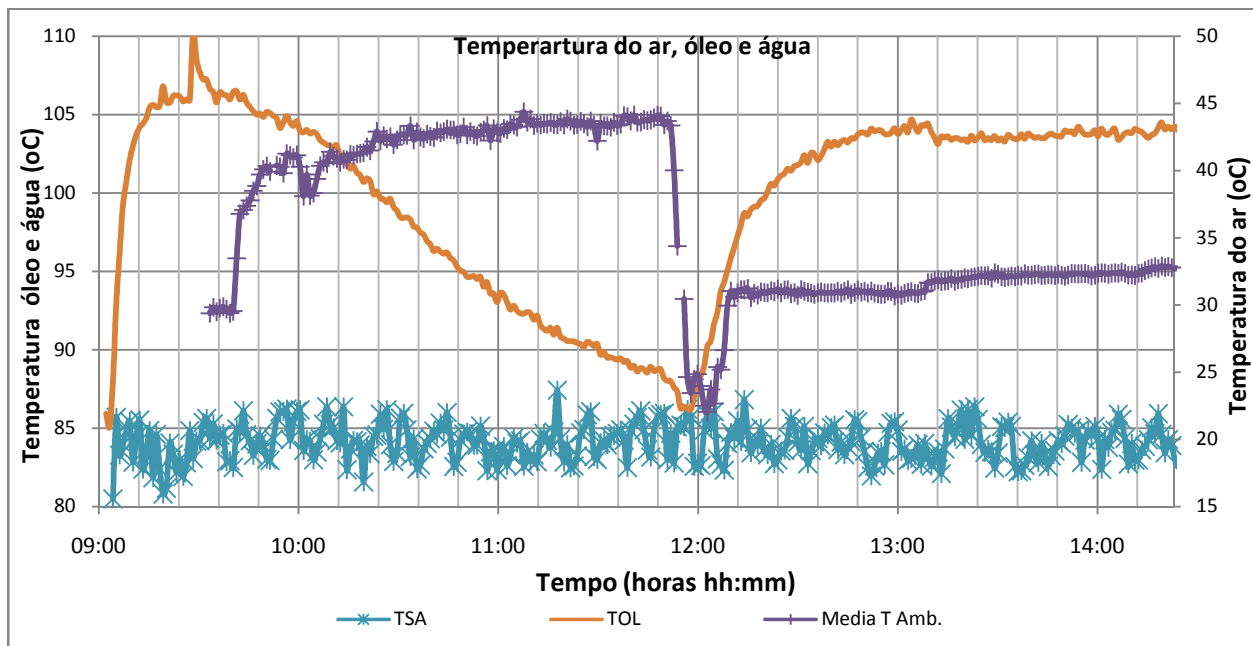


Figura 61: Gráfico que mostra a variação da temperatura do óleo lubrificante devido a variação da temperatura interna da sala, durante o teste com vasos comunicantes mostrado na Figura 60.

Aqui, não é possível a aplicação do fator de correção por temperatura ambiente, pois a diferença entre as temperaturas dos dois lados dos vasos comunicantes significam a temperatura do óleo do cárter de um lado e a temperatura do óleo dentro do nível inclinado do outro que por sua vez não pode ser considerado a temperatura ambiente, conforme a formula que foi deduzida anteriormente. A variação da temperatura da sala foi muito brusca, e não representa assim a temperatura no interior do nível inclinado.

Nesse mesmo procedimento de teste, agora com o uso do transdutor de pressão, obtivemos o resultado mostrado na Figura 62:

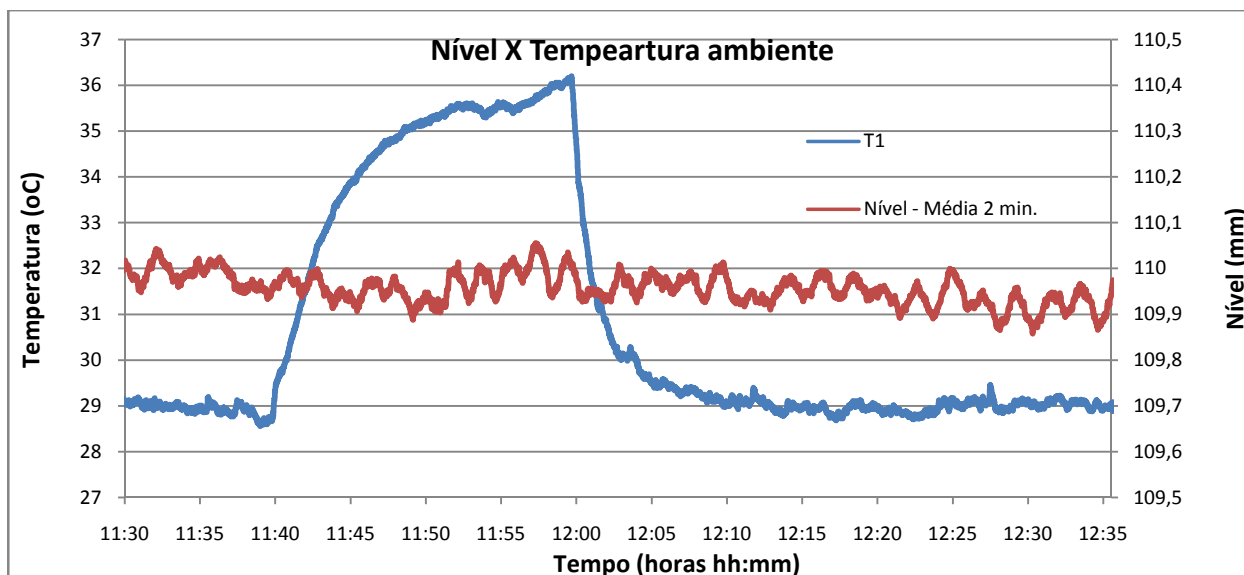


Figura 62: Medição da variação do nível de óleo lubrificante em função da temperatura do ar ambiente

Como podemos observar, não existe variação de nível devido a variação da temperatura ambiente quando se usa um transdutor de pressão. Concluimos, desta forma, que, a variação encontrada no gráfico anterior é devido a montagem do sistema, que por utilizar vasos comunicantes está sujeito a variações de nível previstas na análise teórica.

### 3.2.7 - Dissipação de calor do motor para o ambiente.

Esse parâmetro só tem sentido para testes com o motor parado, pois podemos deixar as portas abertas ou fechadas, ventiladores e exaustores ligados ou desligados. Entretanto, como o procedimento de pesagem exige que as portas fiquem fechadas e ventiladores desligados, não é necessário estudo nesse sentido, pois a dissipação de calor sofrerá variação apenas pelas diferenças de temperaturas internas da sala, que já foram estudadas no item anterior e mostradas na Figura 58 e Figura 59.

Da mesma forma, para testes com o motor em funcionamento, é exigido a manutenção das portas fechadas e ventiladores e exaustores sempre ligados. Assim, uma alteração na dissipação ocorrerá apenas em função de variações na temperatura interna da sala, que também já foi estudado no item anterior, não sendo necessários novos estudos.

### 3.2.8 - Manutenção da mesma pressão em ambos os lados do sistema.

Foi instalado um sistema de equalização de pressões do motor e instrumento de medição a fim de evitar erros de medida uma vez que no sistema de tubo inclinado, usa-se o princípio de vasos comunicantes. No transdutor de pressão, mede-se a altura manométrica, que também indicaria um nível errado, se não fosse um sensor de pressão diferencial.

Algumas fotos do sistema de equalização de pressões encontram-se na Figura 63, Figura 64 e Figura 65 nos diferentes testes realizados.

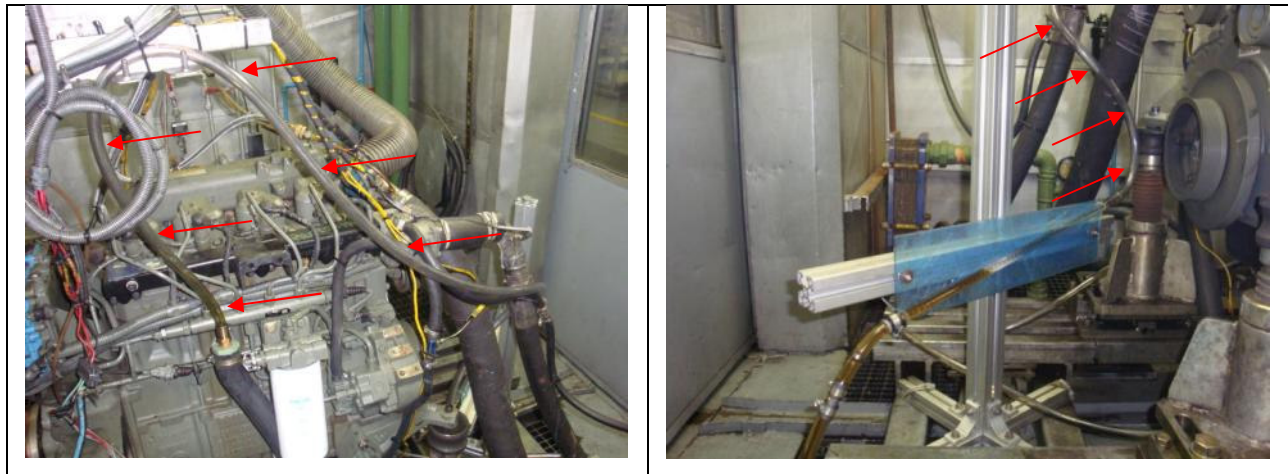


Figura 63: Equalização de pressões do motor, a esquerda a tomada de pressão no bocal de enchimento do motor e a direita ligação no tubo inclinado

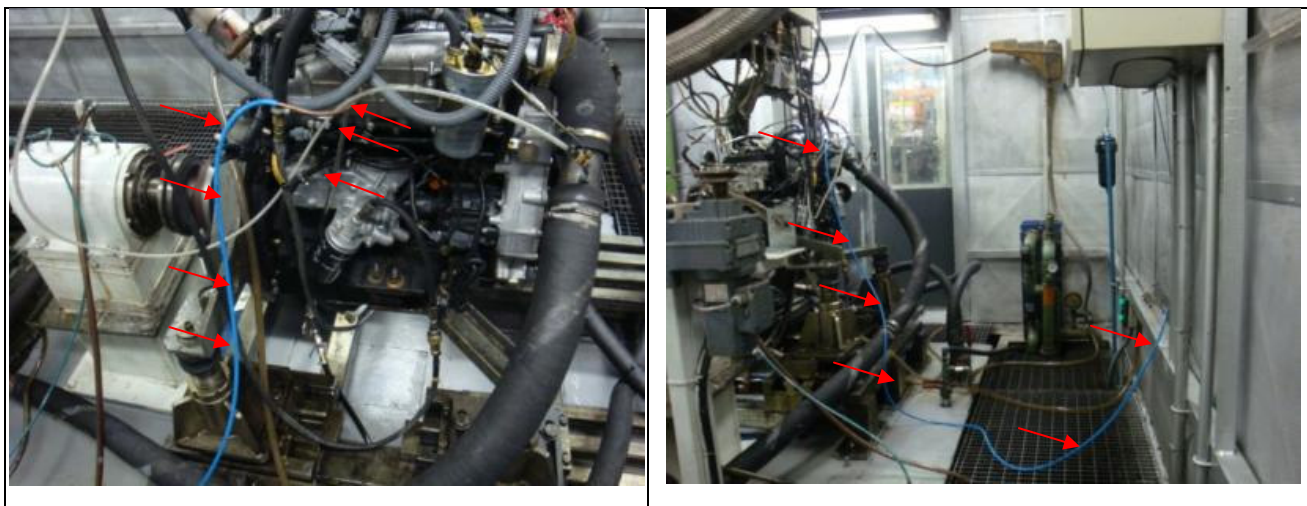


Figura 64: Fotos do sistema de equalização de pressões. A esquerda detalhe da tomada de pressão no tubo da vareta de nível de óleo do motor e a direita mangueira leva essa pressão até o instrumento



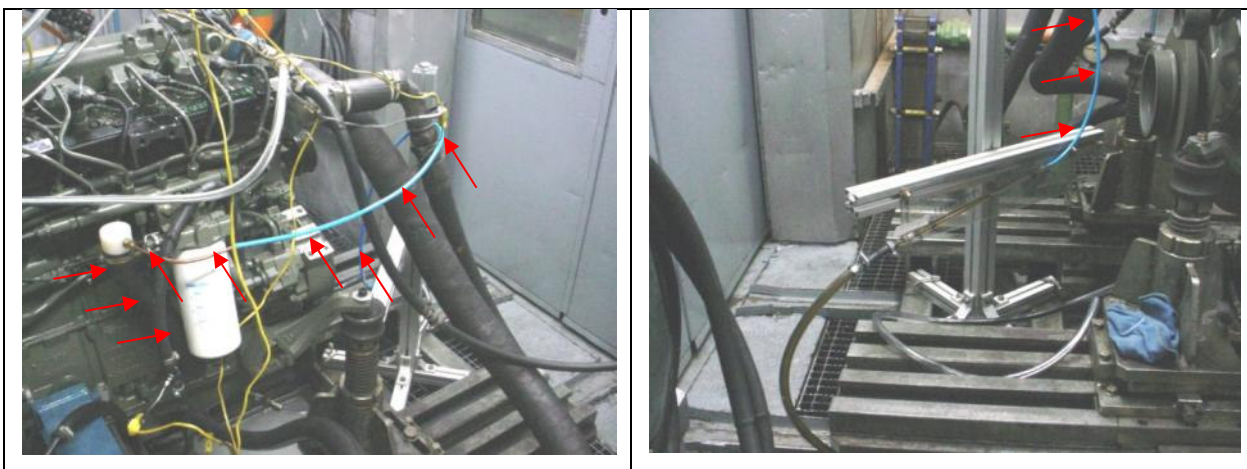


Figura 65: Equalização de pressões. Tomada de pressão no bocal de enchimento do motor e ligação no tubo inclinado

Para condição com o motor em funcionamento, foi realizado um teste onde se variou a pressão interna do motor em duas rotações diferentes para verificar se a ligação dos dois sistemas é eficiente e se existe erros ligados a esse parâmetro. Para aumentar a pressão, foi simulado um vazamento na bomba de vácuo do motor, e assim é inserida uma vazão constante de ar para dentro do motor de forma a aumentar significativamente a vazão normal. Depois repetimos o teste em outra rotação do motor.

No primeiro teste com motor a 2500 rpm, a plena carga durou cerca de 35 minutos e foi feito da seguinte maneira:

- 1) Esperamos estabilizar o motor, e acompanhamos a temperatura do óleo (em azul claro no gráfico), o nível (em azul escuro) e a pressão interna do motor (blow by).
- 2) Aumentamos a pressão interna do motor de 30 para 90mmca por 7 minutos
- 3) Voltamos a pressão normal de 30mmca por mais 7 minutos.
- 4) Alteramos, então, a rotação do motor para 2000rpm e repetimos o experimento, dessa vez estabilizamos o motor com uma vazão elevada de blow by, e simulamos uma pressão interna de 80mmca. Estabilizamos a temperatura de óleo e nível por 20 minutos.
- 5) Voltamos a pressão normal do motor de 30mmca por 20 minutos
- 6) Aumentamos novamente a pressão para 80mmca por mais 7 minutos.

Os resultados estão no gráfico da Figura 66.

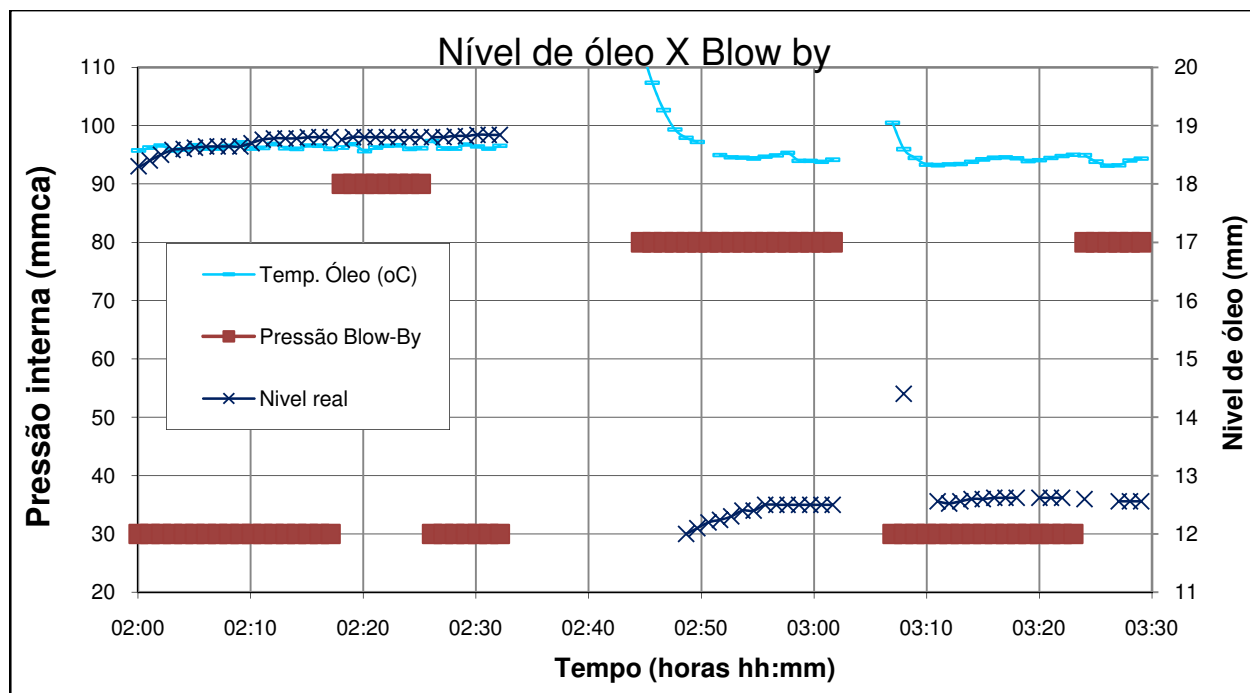


Figura 66: Gráfico da variação do nível em função da variação da vazão dos gases de Blow by, indicado com pressão interna do cárter.

Vê-se que o sistema de equiparação das pressões está suficientemente robusto para variações de fluxo de gases de blow-by, e não apresentou nenhuma variação do nível em virtude da variação da pressão interna do motor.

Não foram feitos testes com o transdutor de pressão, mas é recomendado esse estudo em trabalhos futuros para garantir que não sofremos interferências para este parâmetro. Até mesmo porque existe a possibilidade de diminuir a oscilação de medidas, por exemplo, com a variação do comprimento do tubo ou com um amortecedor de pulsações.

### 3.2.9 - Precisão do instrumento de medição.

Para medição com tubo inclinado, foram utilizados tubos de vidro graduados com distância entre divisões em torno de 1,0 mm. Com essa graduação, uma inclinação de 11,5 graus fornece uma variação de 0,2mm por divisão, enquanto que uma inclinação de 5,7 graus fornece uma variação de 0,1mm por divisão. A precisão da medição com esse método poderia estar na forma de leitura do menisco. Então, escolhemos leitura na linha de contato do óleo com o tubo, pois a resolução da medida, dessa forma, fica bem definida.



Foram realizados experimentos para verificar a formação do menisco com os ângulos propostos de  $5^\circ$  e  $10^\circ$ . Os resultados são os encontrados na Figura 67 e Figura 68:

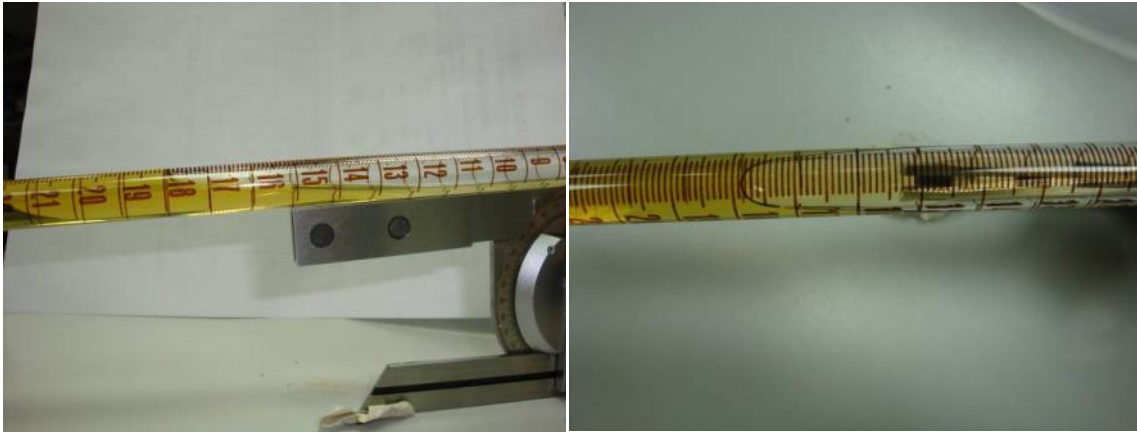


Figura 67: Formação do menisco com óleo lubrificante e ângulo de inclinação de  $5^\circ$ .

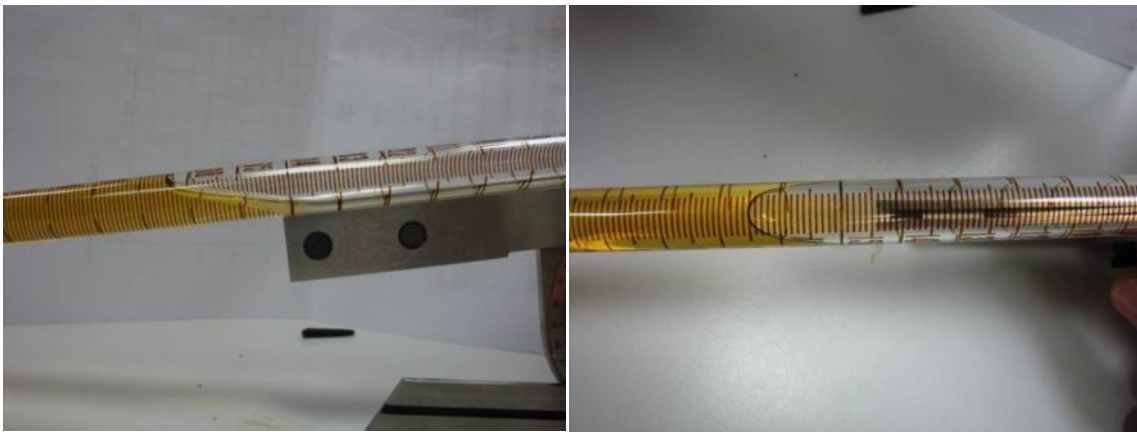


Figura 68: Formação do menisco com óleo lubrificante e ângulo de inclinação de  $10^\circ$ .

Nota-se que, com o tubo inclinado, ao colocarmos a graduação para o lado de cima, o menisco forma uma linha muito clara, o que impossibilita uma leitura errada por paralaxe tanto a  $5$  como em  $10$  graus de inclinação.

Realizamos praticamente todos os testes com uma inclinação de  $10$  graus que, numa leitura de até meia divisão, nos fornece  $0,1\text{mm}$  de precisão, o que é suficiente para os testes de nível de óleo conforme comentado anteriormente. Para esses testes, foram fixadas escalas graduadas em uma chapa de acrílico sem regulagem de ângulo, a fim de garantir que não haveria variação do ângulo durante os testes conforme fotos da Figura 40.

Para o teste com leitura do nível por altura manométrica foi utilizado um transdutor de pressão diferencial com resolução de 0,1mmca (1Pa) e range de 200mmca. Como faremos um tratamento estatístico dos dados para trabalhar com uma média dos valores lidos, não deveremos ter problemas com a precisão do instrumento. Uma foto do transdutor encontra-se na Figura 69.



Figura 69: Transdutor de pressão diferencial utilizado para medição de nível de óleo montado na sala de teste.

### 3.2.10 - Rotação do motor

Medimos o nível em várias rotações do motor com os três métodos disponíveis: mangueira vertical, tubo inclinado e transdutor de pressão.

Primeiramente, foi feito um teste preliminar com tubo inclinado e verificamos que em rotações acima de 4200 RPM o nível oscila muito, o que interfere na medição. De qualquer

forma, fizemos 2 testes e obtivemos o gráfico da Figura 70. É importante notar que o gráfico indica o nível pela distância até a face do cárter, ou seja, com o aumento de rotação, o nível diminui.

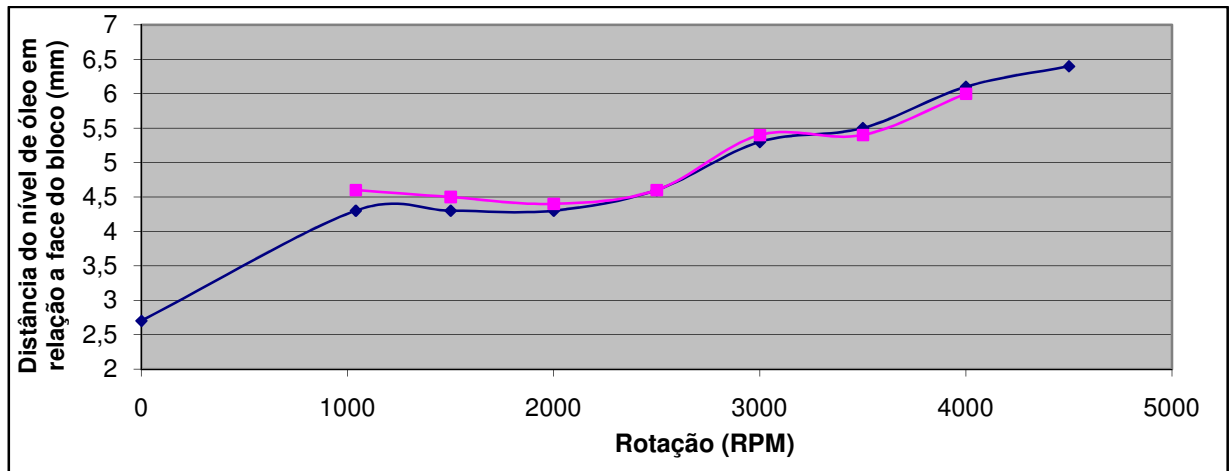


Figura 70: Variação do nível de óleo no cárter em função da rotação do motor com o uso de um tubo graduado na vertical ao lado do motor.

Em um teste com nível inclinado, foi necessário parar o motor entre uma rotação e outra devido a limitações do sistema de automação do banco utilizado. Os comportamentos do nível nas diversas rotações estão no gráfico da Figura 71.

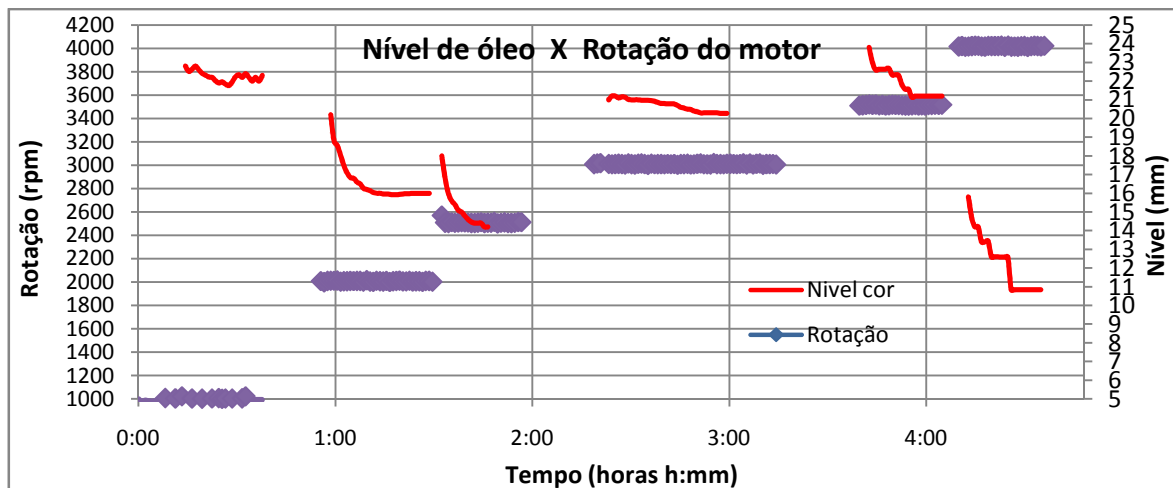


Figura 71: Variação do nível em diversas rotações do motor, com o uso de um tubo inclinado para medição

E finalmente no teste com transdutor de pressão diferencial o comportamento foi conforme os gráficos da Figura 74. Realizamos o teste com o aumento gradativo da rotação, e estabilização do motor por 1 minuto em cada rotação.

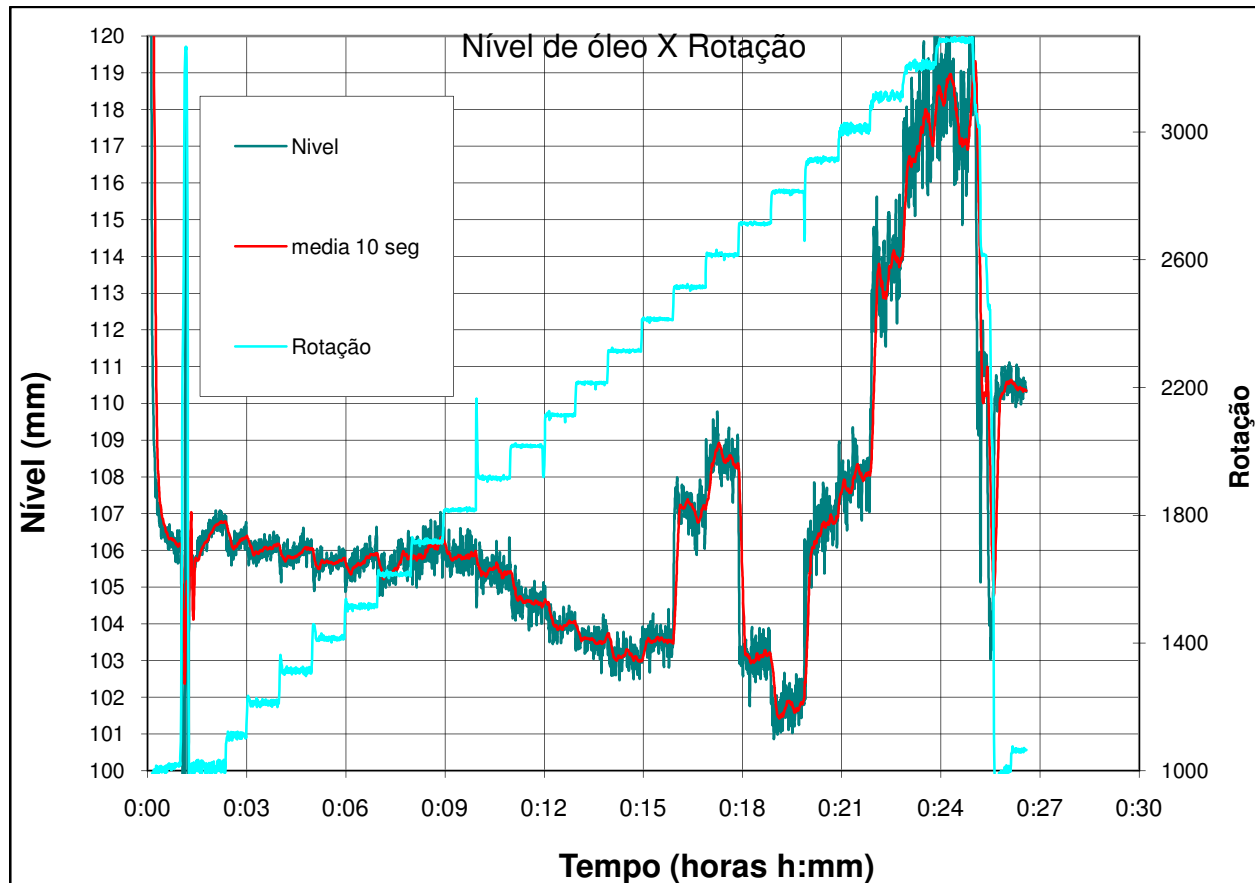


Figura 72: Medição do nível em função da rotação do motor. Com tempo de estabilização de um minuto em cada rotação

Vê-se que a rotação tem forte influência no nível, o que mostra, novamente, a importância de seu controle, mas não possuem uma relação clara, diretamente ou inversamente proporcional. O teste com transdutor de pressão apresentou resultados muito mais confiáveis em relação ao tubo inclinado, devido à versatilidade do banco de teste disponível para teste e facilidade de aquisição de dados com um transdutor. Para comprovar este resultado, com o mesmo motor, diminuimos vagarosamente a rotação, mas deixamos, desta vez, 10 minutos em cada rotação. O resultado está no gráfico da Figura 75.

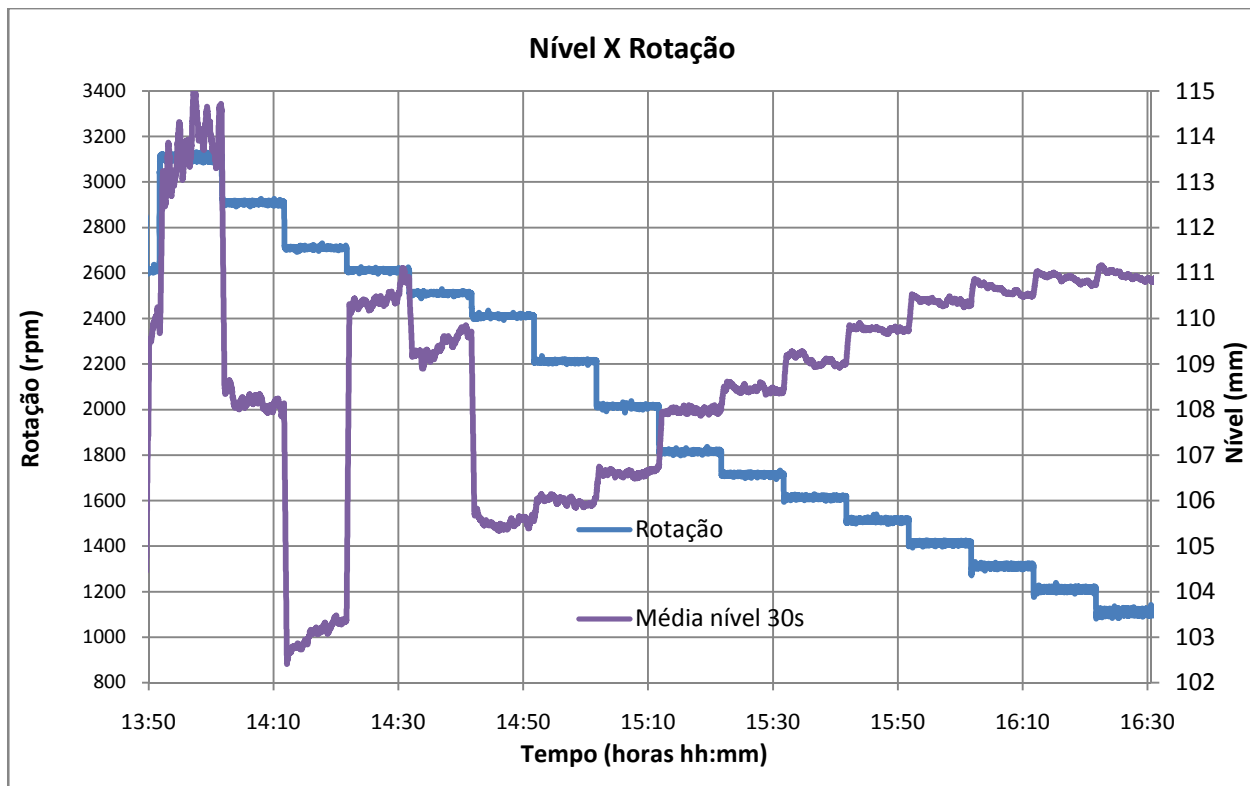


Figura 73: Medição do nível em função da rotação do motor. Com tempo de estabilização de dez minutos em cada rotação

No teste com transdutor de pressão, podemos observar que, nesse motor, a influência da rotação no nível até 2300rpm é inversamente proporcional. Após essa rotação, inicia uma tendência contrária que não encontramos explicações para tal. Assim, preferimos, então, fazer as medições sempre abaixo desse valor. Nessa faixa de rotação, 1000 a 2300rpm, temos uma variação em torno de 4,0mm/1300 rpm ou 0,3mm/ 100RPM. Já para faixa de rotação entre 1000 e 1800 rpm, a relação é cerca de 1mm/800 rpm ou 0,125mm/1000 rpm.

A oscilação de rotação dos dinamômetros é grande, e chega até 40rpm de variação, entretanto, ela oscila sempre em torno de um mesmo valor, e não prejudica, assim, o valor medido, uma vez que faremos um tratamento estatístico dos valores lidos.

Devido aos poucos dados coletados no teste com nível inclinado, não foram possíveis maiores análises. Nota-se apenas um comportamento semelhante ao encontrado com transdutor de pressão, e não mostra uma relação clara da rotação com o nível: ora é diretamente proporcional, ora é inversamente.

### 3.2.11 - Agitação do óleo não define um nível exato

A utilização de vasos comunicantes com medição por nível inclinado possui uma inércia suficiente para que a oscilação do óleo dentro do motor não interfira no valor medido. Atribuímos isto a elevada frequência da oscilação, como foi possível observar posteriormente com o transdutor de pressão na Figura 76.

Com os resultados experimentais dos testes estudados no parâmetro anterior, analisamos a oscilação do nível em cada rotação obtida com o transdutor. Ampliamos o gráfico para permitir uma melhor visualização, conforme mostra a Figura 74.

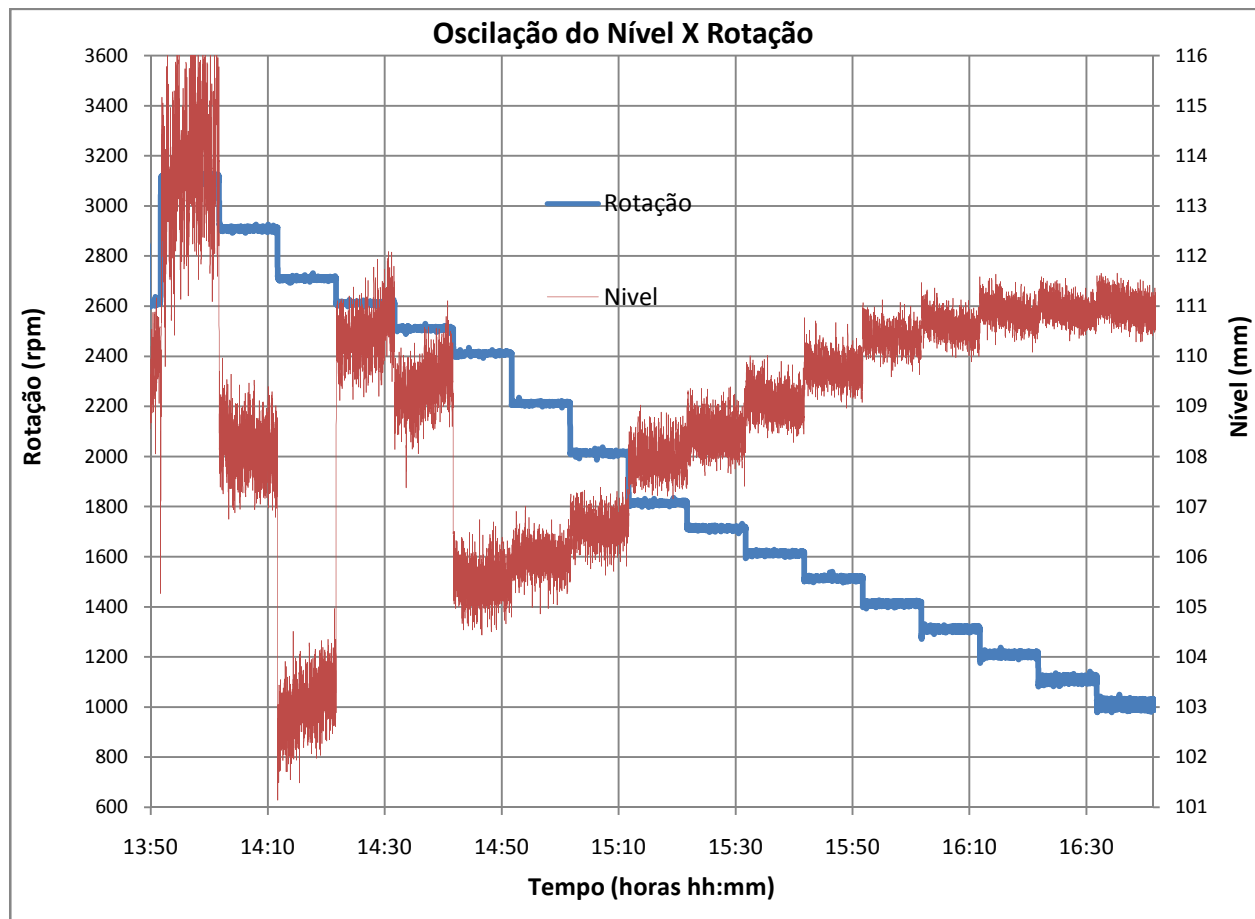


Figura 74: Oscilação do nível em cada rotação do motor com o uso de um transdutor de pressão para aquisição dos dados.

Ao medirmos a amplitude da oscilação do nível em cada rotação do gráfico da Figura 74, construímos o gráfico da Figura 75:

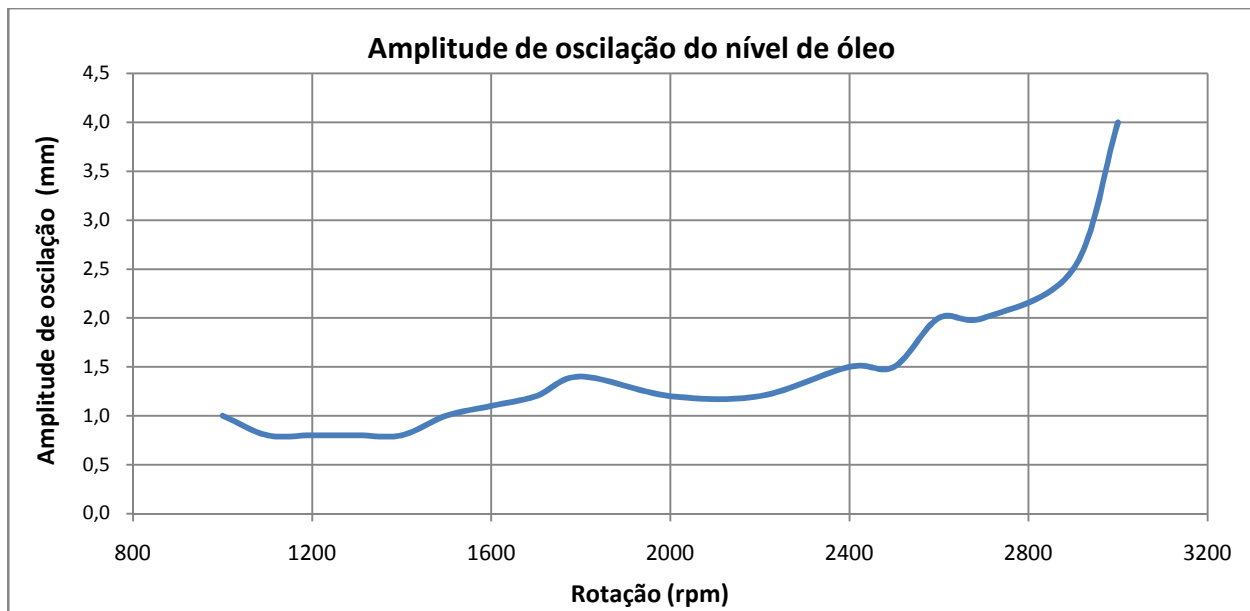


Figura 75: Resumo da variação da amplitude de oscilação do nível de óleo em cada rotação, baseado na Figura 74.

Vê-se que as menores amplitudes de oscilações do nível ocorrem em baixas rotações. Assim, fizemos mais um estudo para analisar como definir um valor de nível com estes dados coletados. Em um teste a 1000rpm, coletamos os dados por 1 hora para análise do nível. O resultado pode ser observado na Figura 76.

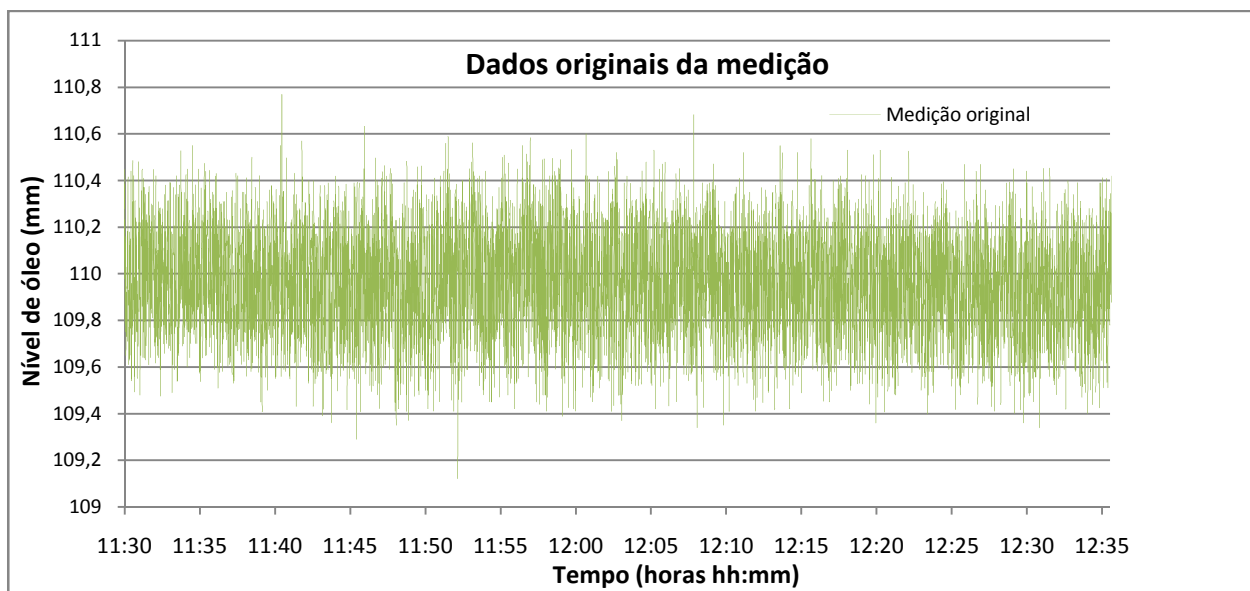


Figura 76: Dados coletados com transdutor de pressão com frequência de aquisição de 2 Hz a rotação de 1000rpm e plena carga do motor.

Como podemos observar, existe uma forte oscilação nos dados coletados. Aplicamos então, uma média móvel de 1 e 5 minutos de medição, ou seja, plotamos um ponto, respectivamente, com a média das últimas 120 e 600 medições (2 medições por segundo). Ao fazer isto diversas vezes no tempo, obtemos os valores mostrados na Figura 77.

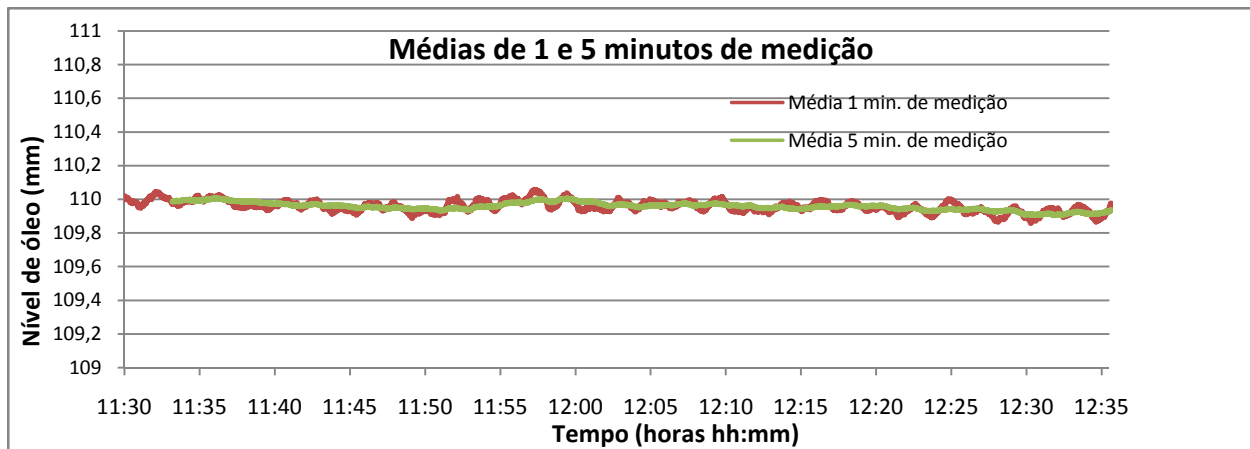


Figura 77: Nível de óleo do motor após o uso de médias móveis de 1 e 5 minutos de medição, com os dados coletados mostrados na Figura 76 como entrada.

Vê-se que com o uso de uma média móvel de 1 minuto de medição já obtemos valores numa variação menor que 0,1mm, sendo essa uma resolução suficiente, proposta no início deste trabalho. Com a média de 5 minutos, obtemos uma resolução ainda melhor.

Entretanto, recomenda-se fazer este estudo para cada tipo de motor quando se deseja utilizar a medição de consumo por nível. Primeiramente, com a análise do melhor ponto de medição e depois, uma simulação de médias para certificar se a resolução está adequada.

Outra forma que encontramos para diminuir a oscilação do sinal de nível, foi com o uso de capacitores eletrolíticos no transdutor de pressão. Este recurso é comumente usado para filtragem de sinais elétricos, e realmente pudemos notar uma redução significativa dos picos e vales dos valores lidos com o uso de capacitores de até 470uF. Entretanto, um estudo mais aprofundado deve ser feito para utilização deste recurso a fim de verificar se ele não imputa erros no valor final do nível, pois como trabalhamos com a média de valores lidos, o corte de picos e vales profundos do sinal elétrico do transdutor, pode alterar o resultado da média.



### **3.2.12 - Variação da viscosidade devido ao envelhecimento do óleo.**

Conforme comentado na análise teórica, não trataremos desse parâmetro neste trabalho em função do tempo e recursos disponíveis. Esta é uma sugestão para continuação deste trabalho.

### **3.2.13 - Ângulo de inclinação do instrumento.**

Aqui, basta avaliar se, ao final do teste, o tubo inclinado se encontra na mesma posição inicial, e não necessita, assim, uma avaliação experimental. Como utilizamos um suporte sem regulagem de ângulo, não é possível regulagem (ou desregulagem) durante o teste, o que impossibilita erros desse tipo. Conforme comentado anteriormente, não necessitamos de um ângulo específico para medição, basta não haver variação que não teremos erros decorrentes desse parâmetro.

### **3.2.14 - Erros de paralaxe e histerese.**

Conforme comentado anteriormente, se tivermos uma oscilação do nível maior que a histerese do equipamento, esse parâmetro não é um problema, o que é o nosso caso como mostrado na Figura 76.

Para o possível erro de paralaxe não foi necessário o estudo, pois nesta fase do trabalho já havíamos concluído que a melhor solução é o transdutor de pressão, que não está sujeito a esse tipo de erro. Se houver interesse de utilização de nível inclinado, um estudo de paralaxe deve ser efetuado para controle desse parâmetro.

### **3.2.15 - Peças soltas dentro do cárter.**

Conforme comentado na análise teórica basta a verificação após o teste do motor se há peças no cárter e após todos os testes foi feita essa verificação. Não necessita avaliação experimental.

### **3.2.16 - Posicionamento do motor.**

Conforme comentado, basta uma verificação ao final do teste, o que foi feito e verificou-se o mesmo posicionamento do motor em todos os testes. Não necessita avaliação experimental.

### **3.2.17 - Resumo do estudo dos parâmetros.**

Resumimos estes experimentos em uma tabela para facilitar a visualização dos resultados e ajudar na análise da melhor escolha de equipamento e método. Aqui, classificamos o risco de erro para medição que cada parâmetro pode gerar em relação ao método de medição. O resultado está na Tabela 9.

Podemos observar na tabela que os testes com motor em funcionamento, de um modo geral, levam vantagem sobre testes com motor parado, com relação a quantidade de parâmetros e também pelo número de parâmetros de alto risco de erro.

Observando a soma de parâmetros de risco alto e baixo na parte final da tabela, podemos concluir também que medição com transdutor de pressão também possui risco menor de inserir erros, com relação a medição com nível inclinado.

Tabela 9: Resumo dos parâmetros estudados, em consideração ao risco de introdução de erro de medição para cada sistema proposto

Parâmetro	Nível inclinado		Transdutor de pressão	
	Motor parado	Motor em funcionamento	Motor parado	Motor em funcionamento
1-Forma do cárter	N/A	N/A	N/A	N/A
2-Temp. água	Alta	Baixa	Alta	Baixa
3-Temp. óleo	Alta	Baixa	Alta	Baixa
4-Tempo parado	Alta	N/A	Baixa	N/A
5-Posição componentes	Baixa	N/A	Baixa	N/A
6-Temp. ambiente	Alta	Alta	Alta	Baixa
7-Dissipação calor	Alta	Alta	Alta	Baixa
8-Equalização pressão	N/A	Baixa	N/A	Baixa
9-Precisão instrumento	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
10-Rotação motor	N/A	Baixa	N/A	Baixa
11-Agitação óleo	N/A	Baixa	N/A	Alta
12-Envelhecimento óleo	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
13-Ângulo inclinação	Baixa	Baixa	N/A	N/A
14-Paralaxe e histerese	Baixa	Baixa	N/A	N/A
15-Peças soltas	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
16-Posicionamento motor	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
Total Risco Alto	5	2	4	1
Total Risco baixo	7	11	6	10
Total Não aplicável	4	3	6	5

Assim finalizamos o estudo de cada parâmetro.

## 4. Resultados obtidos

Nos resultados experimentais deste trabalho, conseguimos comprovar vários fenômenos dentre os quais destaco:

- 1) O mapeamento de “nível X volume do cárter” obtido com o motor em funcionamento com o uso de um transdutor de pressão seguem fielmente os dados estáticos, enquanto que o uso de vasos comunicantes com nível inclinado gera uma diferença que necessita de maiores estudos para encontrar os motivos de tal resultado.
- 2) O tempo para garantir a correta leitura do nível precisa ser de no mínimo 10 minutos para estabilização do motor; entretanto, em alguns casos, como em testes de durabilidade policíclicos, tempos de até 2 minutos foram suficientes para estabilização do valor de nível em condições de baixa rotação.
- 3) Os maiores erros na medição de volume de óleo são causados pela diferença de temperatura do óleo e da água. No caso de vasos comunicantes, a temperatura ambiente também.
- 4) O uso de transdutor de pressão deixa o sistema imune a variações de temperatura ambiente.
- 5) A temperatura do óleo influencia no nível do cárter; porém, em algumas condições não foi notado sua influência. Isto indica que o método utilizado para simular o efeito do aumento de temperatura do óleo, pelo aumento do torque no eixo na mesma rotação, não representa o fenômeno real, pois em alguns casos, durante a estabilização da temperatura do óleo, notamos a estabilização do valor de nível mesmo com a temperatura ainda em variação.
- 6) Obtivemos bons resultados com o uso de capacitores eletrolíticos para filtragem do sinal; entretanto, um tratamento matemático foi necessário para definir o nível medido,

com uma a média de pelo menos 5 minuto de medidas para uma frequência de medição de 2Hz.

Podemos considerar que dos quatro métodos avaliados, apenas o de vasos comunicantes com medição por nível inclinado e motor parado é inviável nessa primeira análise, em função das altas dispersões na medição que encontramos. Entretanto, acreditamos que novos estudos possam ser realizados para tentar identificar os motivos das elevadas dispersões e aumentar o controle dos parâmetros que influenciam nessa forma de medição a fim de viabilizar o método.

Ainda no uso de vasos comunicantes, foi possível ver que existe uma vulnerabilidade grande com relação a temperatura ambiente, que é bastante difícil de controlar. Assim, são necessários mais estudos para obter um fator de correção a fim de viabilizar o método.

O teste com transdutor de pressão e motor parado se mostrou muito promissor, apesar da alta sensibilidade a temperatura da água e ao tempo, se houver mudanças na temperatura ambiente. Entretanto, são parâmetros de controle simples. Para a água, basta um cuidado na parada do motor e, com a temperatura ambiente, o uso de tempos pequenos de medição pode evitar eventuais erros, além da manutenção do micro clima dentro da sala de teste.

Diante disto, e do exposto no resumo do item 3.2.17 pela Tabela 9, chegamos a conclusão que o método mais recomendado com base neste estudo é o teste com motor em funcionamento e medição com transdutor de pressão, devido ao menor risco de erros na medição.

Para a medição de consumo de óleo com o uso de um transdutor de pressão diferencial é necessário primeiramente:

- 1) Percorrer uma ampla faixa de rotações do motor com o monitoramento do nível do cárter e avaliar a melhor rotação para efetuar as leituras e, dentro do possível, se adequar ao ciclo de teste que se deseja medir o consumo, a fim de evitar que haja necessidade de executar um ciclo de teste específico para a medição.
- 2) Fazer um teste de estabilização de nível para verificar o tempo necessário de condicionamento antes da leitura.

Recomenda-se, portanto, o seguinte procedimento.

- 1) Deixar o motor nas condições de medição e anotar: rotação, torque, temperatura do óleo lubrificante, temperatura da água de refrigeração e nível no cárter.

- 2) Executar o ciclo de teste desejado pelo tempo mínimo de 10 horas.
- 3) Voltar o motor a condição inicial e verificar o nível do cárter novamente.
- 4) Com um recipiente com a massa de óleo conhecida, adicionar óleo suficiente no motor para voltar ao nível inicial, e deixar o tempo mínimo de 10 minutos para estabilização do nível no cárter.
- 5) Quando atingir o nível inicial, verificar a massa restante no recipiente.
- 6) A variação de massa representa o consumo de óleo nesse período de teste.

A fim de validar este método, utilizamos em paralelo com o sistema de drenar e pesar em um teste policíclico de durabilidade de 1000 horas em andamento. Foi realizadas leituras a cada 4 horas de teste durante 20 horas, de 520 a 540 horas, e obtivemos o gráfico da Figura 78. Assim, a cada 4 horas realizamos conjuntos leituras do nível por 5 minutos, com frequência de aquisição de 2 Hz. Na escala horizontal temos o tempo, mas, no gráfico, está identificado com o número das medições. Formou-se, assim, “degraus” onde a diferença de nível de óleo entre cada degrau corresponde ao consumo de 4 horas de teste. O minuto inicial de cada conjunto de leituras foi excluído a fim de evitar a poluição do gráfico. O valor a ser considerado é a média estabilizada no final de cada degrau.

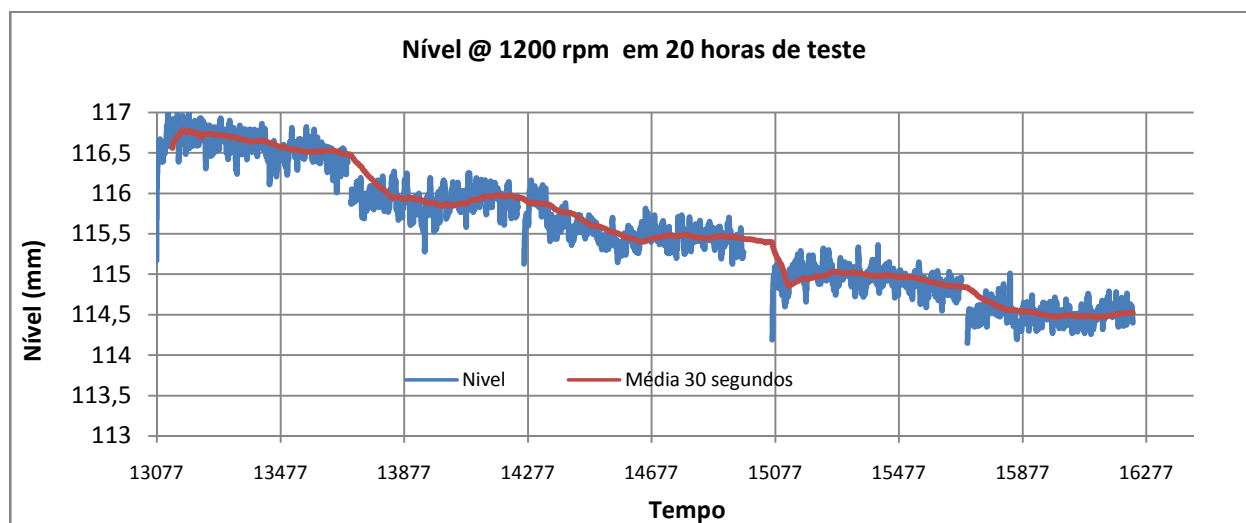


Figura 78: Nível de óleo medido com transdutor de pressão diferencial por um período de 20 horas de teste.

Vê-se que o resultado de consumo desse período pelo método de nível foi de exatos 2,0mm do cárter, que equivale a 170g em 20 horas de teste ou 8,50 gramas por hora.

Para o motor em questão, o consumo de óleo foi monitorado pelo método de drenar e pesar e encontrado uma média geral, do teste de 164 gramas de óleo a cada 20 horas ou 8,21 g/h conforme podemos observar na Figura 79.

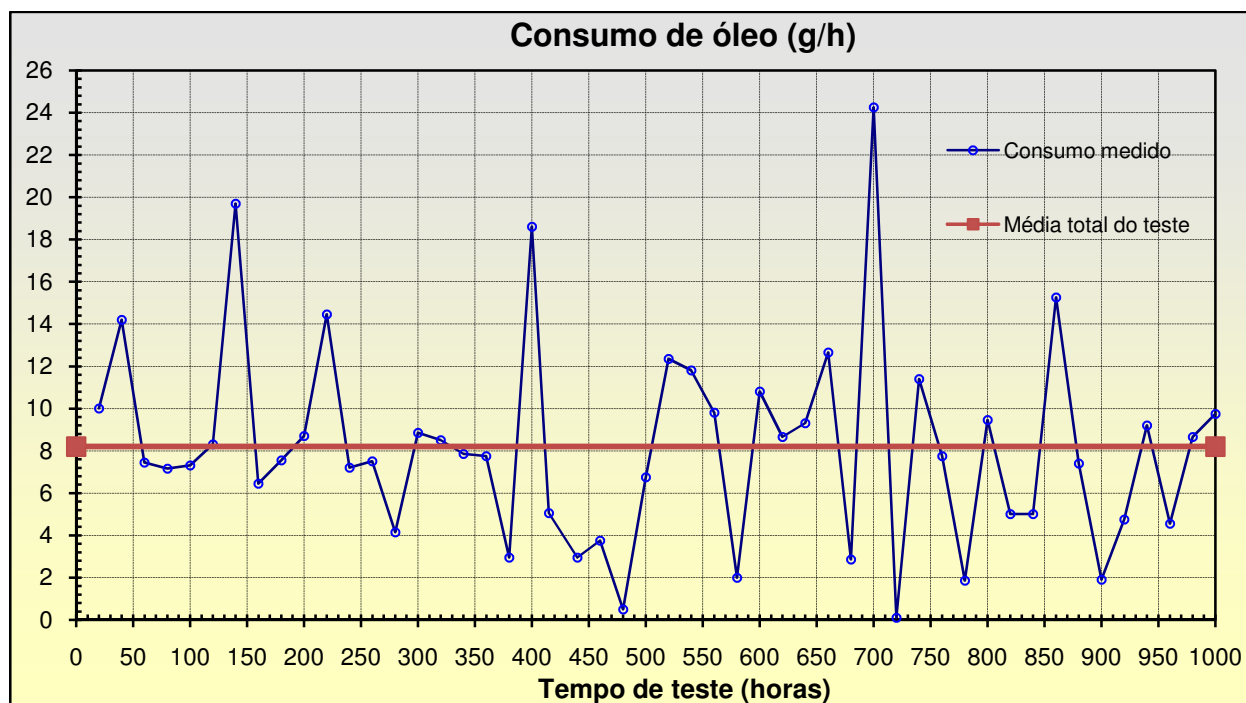


Figura 79: Consumo de óleo lubrificante medido pelo método de drenar e pesar verificado no motor usado para validar o método proposto neste trabalho.

Vê-se uma ótima compatibilidade com os valores obtidos pelo método de leitura de nível com transdutor em relação ao método de drenar e pesar. Podemos considerar o resultado como preliminar, uma vez que foi o primeiro teste com os conhecimentos adquiridos neste estudo. Obviamente, com o uso desta técnica, melhorias irão naturalmente se agregar ao método, e otimizar os resultados. Assim consideramos necessária a realização de mais testes para melhorar o método, que, nestes testes iniciais, já se mostraram muito promissores.

É importante lembrar que o tratamento do sinal do transdutor de pressão pode ser melhorado com filtros digitais para evitar o trabalho de médias que, neste caso, foi realizado manualmente. Além disso, o uso de amortecedores na entrada do transdutor de pressão, pode também ser estudado para evitar a excessiva variação da pressão.

## 5. Conclusões e sugestões para próximos trabalhos

Conclui-se neste trabalho que com um investimento menor que US\$1000 é possível diminuir consideravelmente o tempo para medição de consumo de óleo lubrificante, consequentemente, se reduz também os custos para este tipo de medição. Também nos testes de durabilidade de motores com acompanhamento do consumo de lubrificantes é possível diminuir o tempo de teste e, consequentemente, o tempo de ocupação dos bancos de 6 a 13% devido as interrupções do teste para tais medições, que não seriam mais necessárias.

O uso de transdutor de pressão para medição de nível se mostrou eficaz e potencialmente preciso, e manteve a simplicidade da medição. Os parâmetros que podem causar erros na medição possuem o controle bastante simples e resumem-se em: rotação, tempo de estabilização e temperatura da água e do óleo, sendo para esse último, uma investigação mais profunda para entender sua real influência deve ser realizada.

O uso de vasos comunicantes para medição é vulnerável a variações de temperatura ambiente, que por sua vez possui uma dificuldade muito grande de ser controlada em função das dimensões e vazão de ar necessária dentro de uma sala de teste de motores. Neste caso, poder-se-ia optar pelo condicionamento de temperatura do sistema de vasos comunicantes com uma resistência elétrica, por exemplo, porém acreditamos que pela complexidade que isto envolve, o uso de transdutor de pressão é mais simples e eficaz.

Recomenda-se, para trabalhos futuros, a investigação dos possíveis erros que podem se originar nos parâmetros não estudados neste trabalho, como envelhecimento do óleo e posicionamento do motor. A influência da temperatura do óleo no nível do cárter também merece maior investigação para entender porque testes policíclicos algumas vezes não apresentam a influência mostrada quando simulamos a mudança de temperatura do óleo pela variação do torque do motor.



Para diminuir a oscilação do nível medido com um transdutor de pressão, novos sistemas de amortecimento do nível mecânicos ou eletrônicos podem ser desenvolvidos para evitar a necessidade de tratamento numérico dos resultados.

Para viabilizar o uso de medições com vasos comunicantes, um controle de temperatura do sistema também pode ser estudado caso exista interesse de uso desse método.

Consideramos estes testes como preliminares, de forma que mais testes devem ser realizados para comprovar e melhorar sua precisão. O ideal é comparar com métodos mais precisos ou mesmo com o método tradicional de drenar e pesar em períodos maiores, como foi feito neste trabalho.

E, finalmente, um trabalho de automação deste sistema pode ser desenvolvido para alimentação automática de óleo no motor no decorrer do teste, e assim, obter o consumo instantâneo a cada momento do teste do motor, como observado em alguns trabalhos de conceito similares, vistos na revisão bibliográfica.

## Referências Bibliográficas

---

<sup>1</sup> Inoue, T.; Masuda, Y. e Yamamoto, M.; “Reduction of Diesel particulate matter by oil consumption improvement utilizing radioisotope tracer techniques”; SAE Technical Papers Series n<sup>o</sup> 971630, 1997.

<sup>2</sup> Daimler-Benz Aktiengesellschaft, Stuttgart-Unterturkheim, Germany, Manfred Klink, Korb, Kreis Waiblingen; Apparatus for measuring engine oil consumption; US3,473,372; Oct. 21, 1969.

<sup>3</sup> Gerve, Andreas; Kriegsstr, Karlsruhe, Germany; Measuring apparatus for measuring the alteration of a liquid quantity, especially the quantity of oil in an internal combustion engine; US4,777,821; Oct. 18, 1988

<sup>4</sup> Dana Corporation, Toledo, Ohio, US; Timothy A. Hegemier; Edward E. Lafever; John G. Spoonamore; Oil consumption measurement system for internal combustion engine; US5273134; Dec. 28, 1993

<sup>5</sup> Dam, W. van; Kleiser, W. M.; (Oronite European Technical Center, Rotterdam, The Netherlands) “Lubricant Related Factors Controlling Oil Consumption in Diesel Engines”; Tribotest Journal, 3-1, September 1996.

<sup>6</sup> Payri, F. et al; (CMT Motores Térmicos, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Spain ) “Measurement Of The Oil Consumption Of An Automotive Turbocharger”, Experimental Techniques Magazine, September/October, 2005, pp 24-27

---

<sup>7</sup> Manni, M.; Carriero M.; Roselli, A; (Agip Petroli, Centro Ricerche Euron) ; “A study of oil consumption on a Diesel engine with independently lubricated turbocharger”; SAE Technical Papers Series n<sup>o</sup> 2002-01-2730, (2002).

<sup>8</sup> Weng, Weibo; Richardson, D. E., (Cummins Engine Co.); “Cummins Smart Oil Consumption Measuring System”; SAE Technical Papers Series n<sup>o</sup> 2000-01-0927, 2000.

<sup>9</sup> AVL Automotive GmbH , “AVL Oil consumption Meter 406”; August, 2006.

<sup>10</sup> Toyota Motor Company Co LTD, JP; Michihashi Masatoshi; Measuring Apparatus for Engine oil consumption.; Measuring device for engine oil consumption; JP59079815 e JP59063522 em <[http://ep.espacenet.com/numberSearch?locale=en\\_V3](http://ep.espacenet.com/numberSearch?locale=en_V3)> acesso em 22 ago, 2008

<sup>11</sup> SPX Corporation, Charlotte, NC, US ; A. Foley et al; Optical path structure for open path emissions sensing with particulate matter and lubricating oil consumption absorption methodology; US 6.900.893 B2 May. 31, 2005

<sup>12</sup> Benson, Verlin R., Oil Consumption measurements of a production Engine Using the Sulfur-Trace Method. USA: Pacific Union College, University of Northern Iowa, Julho 1999, 149 p. Tese (Doutorado)

<sup>13</sup> Cummins Engine Company, Inc., Columbus, Ind.; Edward Dimitroff, San Antonio, Tex; Measurement of engine oil consumption; US 4.321.056, Mar., 23, 1982

<sup>14</sup> Kawamoto, J., Yamamoto, M., Ito, Y.; “Continuous Measurement of Engine Oil Consumption Rate by the Use of 35s Tracer”, SAE Technical Papers 740543; 1974

---

<sup>15</sup> Carduner, Keith R. et al (Ford motor Company, Dearborn, Michigan; Unisearch Associates Inc. Concord, Ontario, US); “Application of tunable diode laser spectroscopy to the real-time analysis of engine oil economy”; Environment Science Technology, 1992

<sup>16</sup> Ford Motor Company; Keith R. Carduner; Alex D. Colvin; Dick Y. W. ; System for measuring engine exhaust constituents; US5129257; Jul. 14, 1992.

<sup>17</sup> Knop, R. C., “Evaluation of radiometric method for determining engine oil consumption” SAE Technical Papers 690155; Jan, 1969

<sup>18</sup> Zellbeck, H. et al (Dresden University of Technology, Dresden, Germany) “A Method of Measuring Oil Consumption by Labeling with Radioactive Bromine”; Tribotest Journal 6-3, pág. 251 - 265; Mar, 2000.

<sup>19</sup> Inowe, Takashi; Matsuda, Yoshi-hiko; Yamamoto, Masago (Toyota Motor Corp. e Toyota Central R&D Labs., Inc.) “Reduction of Diesel Particulate Matter by Oil Consumption Improvement Utilizing Radioisotope Tracer Techniques”; SAE TECHNICAL PAPER SERIES número 971630, 1997

<sup>20</sup> Site de Dana <http://www.dana.com.br/tecnologia/servicos/> acessado em 06/06/2009 onde explica brevemente o funcionamento do sistema de consumo de óleo lubrificante pelo sistema patenteado por eles como Tritium Tracer.

<sup>21</sup> General Motors Corporation, Detroit, Michigan, US ; Peter S. Lee; Richard F. Majkowski; Richard M. Schreck; Method for determining fuel and engine oil consumption using tunable diode laser spectroscopy; US4.990.780 e US 5445964; Feb. 5, 1991

<sup>22</sup> Arai, Minoru (Isuzu Advanced Engineering Center, Tsuchidana, Fujisawa, Japan); Indirect Measurement of Lubricant Consumption by Atomic Absorption Spectrometry and Inductively Coupled Plasma Spectrometry; Analytical Sciences, Vol 9, pp 671 a 673 Oct, 1993

---

<sup>23</sup> Gerhard, Claudio; Almeida, Milton C.L.; Palermo, João L.G. (MWM International Motores ); “Oil Consumption Improvement in a D.I. Diesel Engine”; SAE TECHNICAL PAPER SERIES número 921490; Nov, 1992

<sup>24</sup> AVL Automotive GmbH , “AVL Oil consumption Meter 406”; August, 2006.

<sup>25</sup> Bolton, W; Instrumentação e Controle (Editora: Hemus); 2002; pp 110 a 116

<sup>26</sup> Shaw, Duncan James, Introdução a química dos colóides e de superfícies, São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 1975

<sup>27</sup> IOPE Instrumentos de precisão LTDA. Catálogo de manômetros de tubo inclinado. Disponível em: [http://www.iope.com.br/index\\_port.htm](http://www.iope.com.br/index_port.htm) Acesso em: 12 de abr. 2008.