



DIAGNÓSTICOS DE MOTORES DIESEL PELA MONITORAÇÃO DA COMBUSTÃO

Raimundo Nonato da Costa Coêlho

COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Oceânica
Cx. P. 68508 – 21945-970 – Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Carlos Rodrigues Pereira Belchior

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamentos de Eng. Naval/Eng. Mecânica
Cx. P. 68508 – 21945-970 – Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Resumo. Neste trabalho apresentamos um sistema para diagnósticos de falhas em motores Diesel baseado na monitoração do seu processo de combustão. A monitoração é feita pela comparação entre os Diagramas de Pressão no Cilindro obtidos em uma condição instantânea e em condições padrões do motor.

Os diagnósticos se baseiam em regras organizadas pela técnica da Análise da Árvore de Falhas (Fault Tree Analysis – FTA), que permite a visualização do inter-relacionamento dos parâmetros operacionais do motor Diesel a uma ou mais falhas e, com isso, são determinadas, com maior precisão, as causas potenciais dessas falhas. O estabelecimento dos parâmetros operacionais como "baixo", "normal" e "alto" é feito utilizando-se os desvios permissíveis das medidas dos mesmos. O resultado da análise serve como base de conhecimento de um protótipo de sistema especialista aplicado à manutenção preditiva de motores Diesel.

Palavras-chave: Diagnósticos, Combustão, Monitoração, Motores, Diesel.

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho propomos um sistema de diagnósticos técnicos de falhas em motores Diesel utilizando os Diagramas de Pressão no Cilindro para monitorar o processo de combustão. Tais diagramas relacionam as pressões que ocorrem no interior do cilindro do motor, durante o seu processo de combustão, com o ângulo de rotação eixo de manivelas do motor, como mostra a Fig. 1.

A técnica da monitoração do processo de combustão nos motores Diesel baseia-se na comparação entre o Diagrama de Pressão no Cilindro obtido com o motor em operação real (condição instantânea) e o obtido em condições padronizadas. Tais diagramas padrões são definidos com base em testes de desempenho intencionalmente feitos sob condições ideais de operação, preferencialmente quando o motor é novo ou após ter passado por um processo de condicionamento. Estes padrões passam, então, a designar uma condição de referência. Para

a obtenção destes diagramas, as informações de pressão no interior do cilindro e as de rotação do eixo de manivelas são coletadas por meio de sensores específicos, apropriadamente instalados no motor.

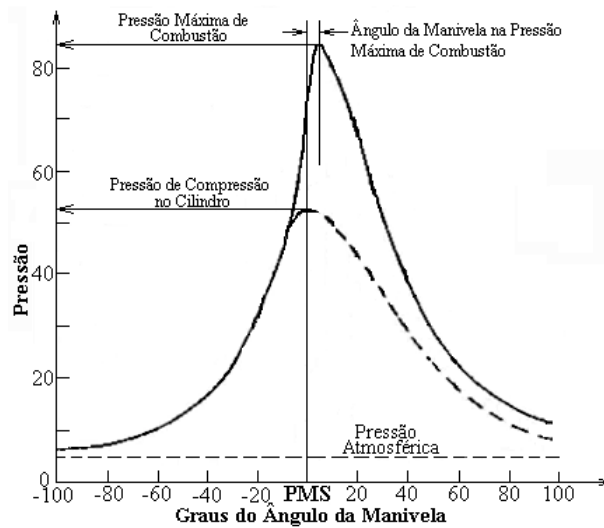


Figura 1 – Diagrama de pressão no cilindro.

Fagerland *et al.* (1978), Warkman (1983) e Vincent & Turnbull (1986) propuseram sistemas de diagnósticos de motores Diesel, utilizando o Diagrama de Pressão no Cilindro para monitorar a combustão, utilizando a técnica da Análise de Modos e Efeitos de Falhas (*Failure Modes and Effects Analysis – FMEA*) para organizar as regras de diagnóstico. Neste trabalho, adotamos a técnica da Análise da Árvore de Falhas (*Fault Tree Analysis – FTA*), proposta por Perakis & Inözu (1990). Dentre as suas vantagens mais representativas estão a possibilidade de se determinar as causas potenciais das falhas e a probabilidade de sua ocorrência.

A avaliação do estado de operação e o diagnóstico de falhas constituem procedimentos de caráter geral, aplicáveis ao motor ou a um de seus componentes. Contudo, em um sistema de monitoração, ambos adquirem um caráter complementar mútuo. A avaliação do estado de operação faz uma análise das condições de funcionamento do motor e de seus componentes, cujo objetivo é o de identificar possíveis anormalidades. As conclusões sobre o estado de operação, formuladas através desta análise, fornecem, então, os subsídios necessários para o diagnóstico de falhas e a conseqüente sugestão de medidas operacionais e/ou de manutenção a serem adotadas.

2. DEFINIÇÃO DO SISTEMA A SER MONITORADO

Poucet (1988) propôs a definição do sistema pelas suas condições de contorno. As condições de contorno externas determinam os componentes do sistema analisado, as condições de contorno internas é o seu nível de resolução, ou seja, o nível de detalhes em que o sistema foi dividido para a localização das falhas.

2.1. Condições de contorno externas

Motor Diesel monocilíndrico com ciclo 4-Tempos, com processo de injeção de combustível constituindo-se de uma bomba injetora de êmbolo alternativo acionado por um

eixo de cames, rede de alta pressão e uma válvula de injeção, cuja estrutura consiste, basicamente, de uma válvula de agulha, uma mola de compressão e um bico injetor. Além disso, este motor é turboalimentado, possuindo um resfriador de ar intermediário situado entre compressor e o coletor do ar de admissão.

2.2. Condições de contorno internas

Combustível; Pré-aquecedor de combustível; Mancais do eixo de manivelas; Anéis de segmento; Cilindro; Válvula de admissão; Válvula de descarga; Duto de passagem da água de refrigeração do motor; Eixo de cames da bomba injetora; Cremalheira de regulagem da quantidade de combustível injetado na bomba injetora; Pistão da bomba injetora; Cilindro da bomba injetora; Mola da válvula de injeção; Orifício do bico injetor; Filtro de ar; Compressor; Turbina; Duto de passagem da água de refrigeração no resfriador de ar; Duto de passagem do ar de admissão no resfriador de ar

3. A MONITORAÇÃO DA COMBUSTÃO

Identificadas a partir do Diagrama de Pressão no Cilindro (Fig. 1), as características representativas do processo de combustão possibilitam a avaliação do estado de operação do motor Diesel e o diagnóstico de possíveis anormalidades. Tais características são apresentadas, normalmente, sob a forma de parâmetros operacionais. Alguns dos parâmetros operacionais adotados nas metodologias de análise são obtidos por medições diretas, enquanto outros são calculados a partir das características observadas.

Modernamente, a monitoração da combustão é realizada com o auxílio de sistemas automatizados de aquisição, processamento e apresentação dos dados, representados esquematicamente na Figura 2. Os sinais captados pelos sensores são enviados para uma unidade de registro (Datalogger) que, por sua vez, os transfere para uma unidade responsável pelo processamento e a apresentação das informações. Nos sistemas atuais, estas tarefas são realizadas por microcomputadores equipados com programas específicos para a aquisição e análise dos dados da combustão dos motores. Dependendo dos requisitos existentes, a configuração destes sistemas pode ser fixa ou portátil.

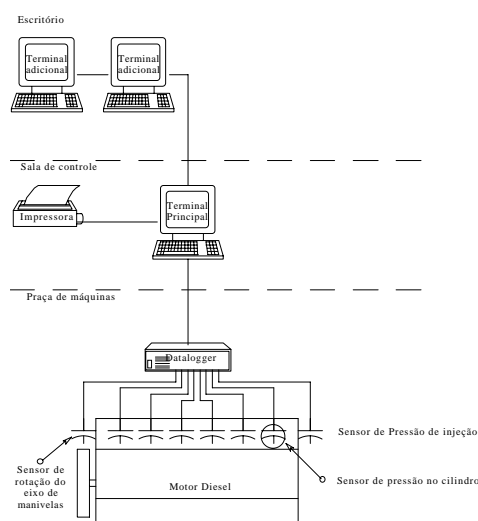


Figura 2 – Sistema de monitoração da combustão em motores Diesel

3.1. Parâmetros operacionais

São as características representativas do processo de combustão expressando quantitativamente a condição operacional do motor e de seus componentes. O objetivo da monitoração da combustão é acompanhar as alterações nesses parâmetros e, com isso, obter um quadro mais preciso do processo de combustão.

Os parâmetros operacionais são determinados por medições diretas ou por expressões constituídas de outros parâmetros. A seguir são apresentados os parâmetros operacionais definidos neste trabalho, divididos em três aspectos.

Parâmetros do gás no cilindro. São os parâmetros relacionados ao processo de combustão no interior do cilindro obtidos no diagrama de pressão no cilindro mostrado na Fig.1 ou em pontos específicos do sistema.

- P_{max} – é a pressão máxima de combustão
- P_{comp} – é a pressão de compressão no cilindro
- C_{cil} – é a carga no cilindro, em kW, expressa por

$$C_{cil} = \frac{PM_{cil} \times L \times A \times n}{60000}. \quad (1)$$

onde,

PM_{cil} é a pressão média indicada no cilindro, em N/m^2

L é o curso do pistão, em m.

A é a área do pistão, em m^2 , expressa por

$$A = \frac{\pi \times B^2}{4} \quad (2)$$

onde B é o Diâmetro do Pistão em m.

n é o número de ciclos de potência por minuto, sendo que $n = \frac{N}{2}$ para motores ciclo 4-Tempos; $n = N$ para motores ciclo 2-Tempos e N é a rotação do eixo de manivelas em rpm.

- DP/DT – é a taxa de elevação de pressão no tempo definida por

$$\frac{DP}{DT} = \frac{P_{max} - P_{comp}}{\theta P_{max}} \quad (3)$$

onde θP_{max} é o ângulo do eixo de manivelas em que ocorre a pressão máxima de combustão.

- T_{comb} – é a Temperatura no interior do cilindro alcançada pelo processo de combustão, medida por termopares de superfície localizados na tampa do cilindro.

Parâmetros de injeção de combustível. São os parâmetros referentes ao sistema de injeção de combustível, desde o tanque até a saída do bico injetor. Para a monitoração do sistema de injeção entre a bomba injetora e a saída do bico injetor é utilizado o Diagrama de Pressão de Injeção, mostrado na Fig. 3, que relaciona as pressões de injeção de combustível ao ângulo de rotação do eixo de manivelas.

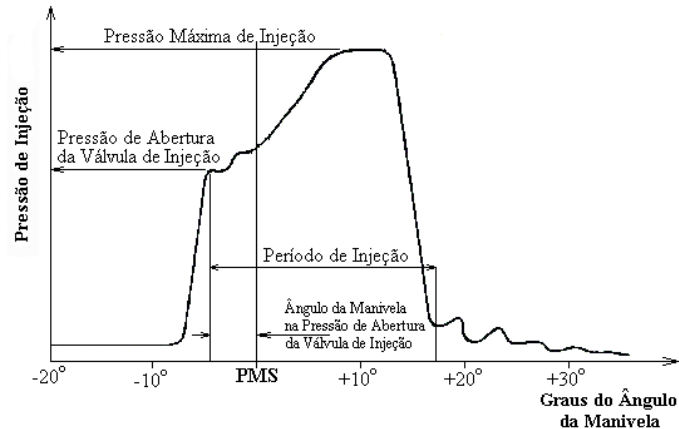


Figura 3 – Diagrama de pressão de injeção

- P_{lmax} – é a pressão máxima de injeção
- P_{laber} – é a pressão de abertura da válvula de injeção
- TPI_{aber} – é o ângulo de rotação do eixo de manivela na abertura da válvula de injeção
- D_{inj} – é o período de injeção de combustível
- IBI – é o índice da bomba injetora (posição da cremalheira) que fornece a medida direta da quantidade de combustível injetado no cilindro durante o processo de injeção
- $T_{pré-aq}$ – é a temperatura do combustível medida na saída do pré-aquecedor

Parâmetros da admissão de ar/gás de descarga. São os parâmetros referentes ao sistema de admissão de ar/gás de descarga medidos em pontos específicos do sistema.

- T_{adm} – é a temperatura do ar de admissão
- P_{adm} – é a pressão do ar de admissão
- dP_{fil} – é a medida da queda de pressão através do filtro de ar de admissão
- dP_{resf} – é a medida da queda de pressão através do resfriador de ar de admissão

3.2. Estabelecimento dos parâmetros operacionais

O parâmetro operacional é estabelecido como *baixo* (ou *curto*), *normal* e *alto* (ou *longo*) pela comparação entre a condição instantânea e uma condição padronizada (modelo matemático) do motor, baseada em um motor novo ou recondicionado.

As medidas dos parâmetros operacionais da condição padronizada possuem limites inferior e superior determinados pelos seus desvios permissíveis. Os valores contidos entre esses limites (incluindo-os) indicam uma condição normal do parâmetro, enquanto que abaixo do limite inferior indicam um baixo (ou curto) valor do parâmetro e acima do limite superior, alto (ou longo). A Tabela 1 apresenta os valores dos desvios permissíveis das medidas dos parâmetros, propostos por Warkman (1983) e Vincent & Turnbull (1986).

Tabela 1. Desvios permissíveis para a definição dos limites operacionais dos parâmetros.

P_{max} (N/m ²)	P_{comp} (N/m ²)	C_{cil}	$\frac{DP}{DT}$	T_{comb}	P_{lmax} (N/m ²)	P_{laber} (N/m ²)	TPI_{aber} (°)	D_{inj} (°)	IBI	T_{adm}	P_{adm}	dP_{fil}	dP_{resf}
$\pm 2.10^5$	$\pm 2.10^5$	$\pm 4\%$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	$\pm 30.10^5$	$\pm 10.10^5$	$\pm 0,05$	± 0.6	± 1	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$

4. DIAGNÓSTICOS DO SISTEMA

O método de diagnóstico de falhas proposto neste trabalho se utiliza de um conjunto de regras que inter-relacionam o comportamento de um determinado parâmetro operacional a uma ou mais falhas. A análise do comportamento dos parâmetros fornece um conhecimento realista das condições operacionais do sistema, o que permite a decisão sobre a necessidade de um reparo. O resultado da análise são os dados de entrada para o conjunto de regras de diagnósticos no sistema especialista, o qual elabora relatórios técnicos sobre a condição operacional do motor Diesel – e de seus componentes – contendo diagnósticos e sugestões de ações corretivas e/ou preventivas a serem tomadas.

4.1. Análise da árvore de falhas

A análise da árvore de falhas é a transformação de um sistema físico em um diagrama lógico estruturado (a árvore de falhas), onde são dispostas as várias combinações de falhas dos elementos do sistema que possam resultar no evento indesejável. O caminho entre o evento de topo e um evento primário define uma regra de diagnóstico.

A montagem da árvore de falhas começa pela definição do evento indesejável, ou evento de topo. Depois disso são identificados todos os eventos de falhas – imediatos, necessários e suficientes – que causam o evento de topo. A análise prossegue, nível a nível, até que todos os eventos de falha estejam desenvolvidos no nível de resolução definido nas condições de contorno internas. Como a análise é dedutiva, ela se faz pela repetição da pergunta *quais as razões para...?*. A diagramação da árvore de falhas é feita com o uso de *símbolos e portões lógicos* que indicam o relacionamento entre os eventos considerados.

A Figura. 5 mostra uma das árvores de falha determinadas neste trabalho, embasadas nas propostas de Ganesan (1995), Heywood (1988), Kane (1984), Ricardo & Hempson (1968), Broeze (1963) e Adams (1949), e cujo evento de topo é a baixa pressão máxima de combustão.

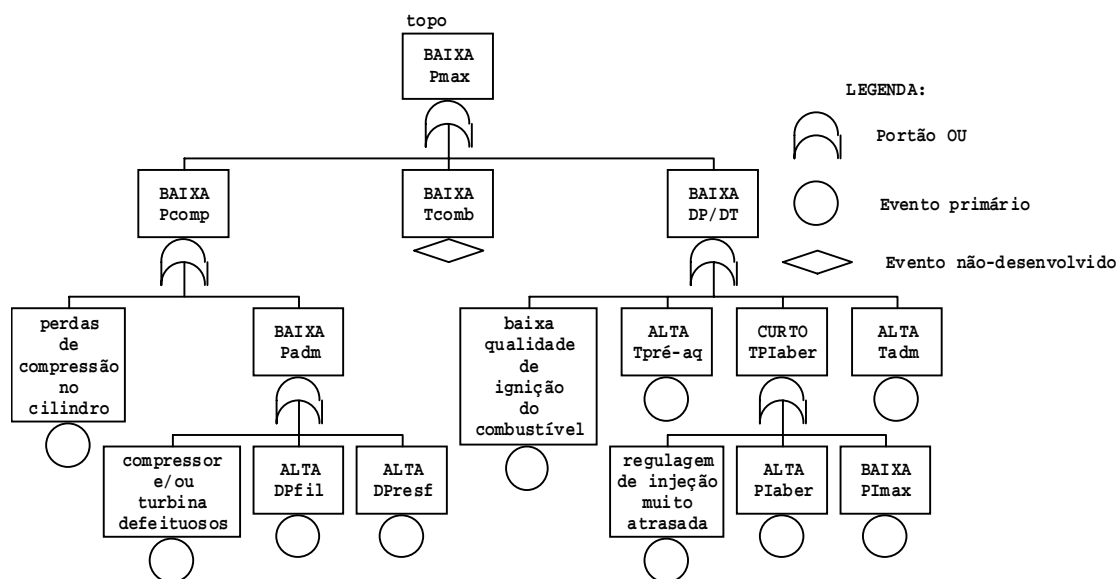


Figura 4 – Árvore de falhas. Evento de topo: baixa P_{max} .

4.2. Protótipo de sistema especialista

O protótipo de sistema especialista foi construído no ambiente de desenvolvimento *Leonardo Expert Systems Development Tool* criado pela Bezant Ltd., cuja estrutura é mostrada na Fig. 6.

Módulo de entrada e saída. É a interface entre o usuário e o sistema especialista. É o local onde são fornecidos os parâmetros de entrada do sistema e recebidos os relatórios técnicos de diagnósticos de falhas.

Mecanismo de inferência. É um esquema de controle para a aplicação do conhecimento contido na base de conhecimentos. É responsável pelo raciocínio, conclusões e diagnósticos do problema. Está localizado no próprio ambiente de desenvolvimento.

Banco de dados. Contém todos os fatos conhecidos ou deduzidos de um problema particular.

Base de conhecimentos. Contém todas as regras de diagnósticos determinadas nas árvores de falhas. As representações das regras de diagnóstico foram feitas na forma condicional *if.....then.....*

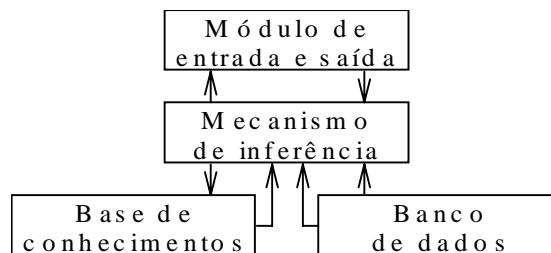


Figura 5 – Estrutura do Sistema especialista.

5. APLICAÇÃO DO PROTÓTIPO DE SISTEMA ESPECIALISTA

A aplicação foi feita com os dados do relatório de avaliação do estado de funcionamento do motor MEP–MAM W8V do Laboratório de Máquinas do CIAGA, feito por Alho&Belchior (1998). O sistema utilizado para a avaliação do motor foi o PD–100 da Autronica AS, sendo que a aquisição de dados limitou-se apenas à obtenção do diagrama de pressão no cilindro e à medida da pressão do ar de admissão.

5.1. Condições de referência

Devido à incapacidade de se submeter carga à instalação, a coleta de dados foi realizada com o motor produzindo apenas a potência necessária para vencer as suas resistências internas e as oferecidas para a movimentação do gerador. As condições de ensaio são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2. Condições de ensaio.

	Ensaio	Máxima
Carga	0 kW	320 kW
Rotação	640–660 rpm	1200 rpm

O relatório ainda aponta a falta de um histórico de manutenção e do número de horas de funcionamento do motor, perdidos pelo longo tempo de falta de operação, o que dificulta o estabelecimento de uma condição de referencia operacional para este motor. Por isso, foi estabelecido como diagrama de pressão no cilindro padrão o obtido no cilindro nº 2, uma vez que apresentou um comportamento considerado próximo de uma condição normal de operação. A Tabela 3 apresenta a condição de referência dos parâmetros operacionais.

Tabela 3. Parâmetros operacionais de referência.

Parâmetros Operacionais	Medidas	Limite superior		Limite inferior	
		Valor	Desvio	Valor	Desvio
P_{max}	$50,20 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$	$52,20 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$	-3,98%	$48,20 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$	+3,98%
P_{comp}	$37,80 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$	$39,80 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$	-5,29%	$35,80 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$	+5,29%
P_{adm}	$0,07 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$	$0,08 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$	-14,29%	$0,06 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$	+14,29%
$\frac{DP}{DT}$	$1,65 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2/\text{o}$	$1,82 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2/\text{o}$	-10,30%	$1,49 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2/\text{o}$	+10,30%

5.2. Diagnósticos

A Figura 9 apresenta o diagrama de pressão no cilindro número 3 do motor MEP–MAN do CIAGA confrontada com o diagrama padrão. Na Tabela 4 estão contidos os parâmetros de entrada para o sistema obtidos deste diagrama e na Tabela 5 estão os parâmetros operacionais estabelecidos.

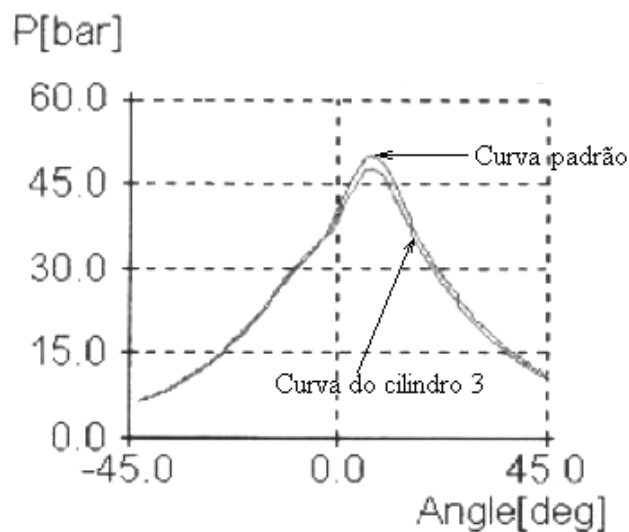


Figura 9 – Comparação entre o diagrama real do cilindro 3 e o diagrama padrão

Tabela 4. Parâmetros de entrada

Parâmetros de entrada	Medidas
P_{max}	$46,50 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$
P_{comp}	$35,60 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$
θP_{max}	$8,00^\circ$
P_{adm}	$0,06 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$

Tabela 5. Parâmetros operacionais

Parâmetros operacionais	Medidas	Desvio	Condição operacional
P_{max}	$46,50.10^5 \text{ N/m}^2$	+7,37%	Baixa
P_{comp}	$35,60.10^5 \text{ N/m}^2$	+5,82%	Baixa
P_{adm}	$0,06.10^5 \text{ N/m}^2$	+14,29%	Normal
$\frac{DP}{DT}$	$1,36.10^5 \text{ N/m}^2/\text{o}$	+17,58%	Baixa

Pelos dados contidos na Tabela 5, o sistema indica o seguinte diagnóstico:

- As paredes internas do cilindro e/ou os anéis do pistão e/ou as válvulas de admissão e/ou de descarga estão desgastados;
- O combustível está sofrendo uma contaminação, causando perdas nas suas propriedades de ignição.

O ensaio foi feito com o motor utilizando óleo diesel padrão e regulado para as condições normais de operação indicadas pelo fabricante, o que levou ao diagnóstico mesmo com a ausência das medidas de T_{comb} , $T_{pré-aq}$, TPI_{aber} e T_{adm} .

6. CONCLUSÃO

A monitoração da combustão utilizando a técnica desenvolvida permite apresentar um diagnóstico preditivo do motor Diesel não só pela análise individual da combustão em cada cilindro, como pela comparação dos resultados obtidos em todos eles. A monitoração do sistema de injeção e do sistema de admissão de ar/gás de descarga visa complementar a análise, permitindo a construção da árvore de falhas e a partir dela, definir diagnósticos mais precisos.

REFERÊNCIAS

- Adams, O.L., 1949, Elements of diesel engineering, 2 ed., The Norman W. Henley publishing co, USA.
- Alho, A.L.P. & Belchior, C.R.P., 1998, Relatório de avaliação do estado de funcionamento do motor MEP-MAN do laboratório de máquinas do CIAGA, UFRJ/Departamento de Engenharia Naval. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Broeze, J.J., 1963, Combustion in piston engines, spark-ignition and compression ignition, 1 ed., De Technisch Uitgeverij H. Stam N.V, Berlin, Deutschland.
- Ganesan, V., 1995, Internal Combustion Engines. 1 ed., McGraw-Hill, USA.
- Kane, A. B., 1984, Marine Internal Combustion Engines. 1 ed., English Translation, Mir Publishers, England.
- Perakis, A., & Inözü, B., 1990, Reliability Analysis of Great Lakes Marine Diesels: State of Art and Current Modeling, *Marine Tchnology* v. 27, n. 4.
- Poucet, A., 1988, Fault Tree and Event Tree Techniques. In: Amendola, A., Bustamante, A.S. (eds), Reliability Engineering: Proceedings of the ISPRA-Course Helds at the Escuela Tecnica Superior de Ingenieros Navales, Madrid, Spain, September 22-26, 1986 in collaboration with Universidad Politecnica de Madrid, 1 ed., chapter 1-part II, Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- Ricardo, H.R. & Hempson, J.G.G., 1968, The High-Speed Internal-Combustion Engine. 5ed., London, Blackie and Son Limited, London, England.

- Vincent, M.R. & Turnbull, A.T., 1986, Onboard Combustion Monitoring, Trans. I Mar.E, vol. 98, Paper 7.
- Warkman, D. C., 1983, BP's Performance-Monitoring System for Marine Diesel Engines, Trans. I Mar. E. (TM), paper 40, vol. 95.

DIESEL ENGINES DIAGNOSIS BY COMBUSTION MONITORING

Abstract. *This paper presents a computer-aided fault analysis of Diesel engines by combustion monitoring. The basis for the monitoring system is the comparison of the standard model curve of cylinder pressure versus the crank angle engine with curve obtained at engine operation condition.*

The diagnosis is based on a fault tree analysis that relates deviations found between operation and model curves with the possible faults of the engine and its cause effect. Operating parameters readings are compared to allowable values and the deviations presented as "low", "normal" and "high". The whole analysis is the knowledge base for a expert system used for predictive maintenance of Diesel engines.

Key words: Diagnosis, Combustion, Monitoring, Engines, Diesel