

# DIAGNÓSTICO DE MOTORES DIESEL PELA ANÁLISE DO PROCESSO DE COMBUSTÃO UTILIZANDO A TÉCNICA DA ANÁLISE DA ÁRVORE DE FALHAS

**Raimundo Nonato da Costa Coelho**

PENO/COPPE/UFRJ, Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, Bloco C, sala 203

CEP: 21945-970, Ilha do Fundão – Rio de Janeiro – Brasil

nonato@peno.coppe.ufrj.br

**Carlos Rodrigues Pereira Belchior**

PENO/COPPE/UFRJ, Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, Bloco C, sala 203

CEP: 21945-970, Ilha do Fundão – Rio de Janeiro – Brasil

belchior@peno.coppe.ufrj.br

**Mauro José Guerreiro Veloso**

DEM/CT/UFPA, Campus Universitário do Guamá, Rua Augusto Corrêa, 01

CEP 66075-110 – Belém – Pará – Brasil

mjgveloso@uol.com.br

**Resumo.** *Este trabalho tem por objetivo propor um conjunto de regras de diagnóstico de falhas em motores Diesel, organizadas pela técnica da Análise da Árvore de Falhas (Fault Tree Analysis – FTA) e definidas pela análise do seu processo de combustão. A Análise da Árvore de Falhas é utilizada por ser uma metodologia dedutiva de determinação de causas potenciais de falhas e proporcionar a determinação das probabilidades de suas ocorrências, criando condições para a realização de um estudo de confiabilidade sobre o conhecimento especialista estruturado visando a implementação de um sistema de manutenção preditiva.*

**Palavras-chave:** motor, Diesel, combustão, árvore de falhas, diagnóstico.

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de tecnologias de instrumentação para aquisição de dados sobre o processo de combustão resultou na disponibilidade de grande quantidade de informações para a avaliação do estado de operação e o diagnóstico de falhas em motores Diesel. Estes dois procedimentos têm caráter complementar mútuo, sendo que a avaliação do estado de operação faz uma análise das condições de funcionamento do motor e seus componentes, com o objetivo de identificar possíveis anormalidades e cujas conclusões fornecem os subsídios necessários para medidas de manutenção a ser adotadas. Além disto, a crescente exigência do mercado em reduzir custos de manutenção pelo aumento da confiabilidade dos diagnósticos, fez crescer o interesse pelos sistemas automatizados com fins de manutenção preditiva nos motores Diesel.

Em trabalhos anteriores (Fagerland *et al.*, 1978; Warkman, 1983; Vincent & Turnbull, 1986; Elliot & Banisoleiman, 1990; Romero *et al.*, 1992 e Tenekedjiev *et al.*, 1998) foram propostos vários métodos de diagnóstico utilizando a técnica da Análise de Modos e Efeitos de Falhas (*Failure Modes and Effects Analysis* – FMEA). Uma proposta interessante, que utiliza a técnica de abordagem *top – down*, foi apresentada por Shamsolmaali & Banisoleiman (1994).

O presente trabalho tem por objetivo descrever os princípios básicos para a organização de um conjunto de regras de diagnóstico de falhas em motores Diesel pela análise do processo de combustão, utilizando para este fim a técnica da Análise da Árvore de Falhas (*Fault Tree Analysis – FTA*), proposta por Perakis & Inözu (1990). Vários trabalhos (Poucet, 1988; Lewis, 1994; Kumamoto & Henley, 1996), consideram os objetivos de uma árvore de falhas como:

- i. Direcionar a análise para a descoberta de falhas;
- ii. Destacar os aspectos do sistema que são importantes para a falha de interesse;
- iii. Fornecer uma ajuda gráfica que dê visibilidade ao sistema para o caso de mudanças de projeto;
- iv. Fornecer opções para a análise quantitativa e qualitativa de confiabilidade do sistema;
- v. Permitir ao analista se concentrar em uma falha particular do sistema de cada vez;
- vi. Fornecer uma visão sobre o comportamento do sistema.

A estes, podemos acrescentar que uma árvore de falhas, como qualquer outro relatório de engenharia, é uma ferramenta de comunicação, portanto deve ser um documento claro e demonstrável.

A construção da árvore de falhas, cuja estrutura é mostrada na Fig. (3), obedece a duas etapas principais: a definição do sistema a ser analisado e a definição do evento topo. O evento de falha indesejável do sistema aparece como evento topo ligado aos demais eventos por declarações e portões lógicos. A principal vantagem da árvore de falhas frente à outras técnicas, tal como a FMEA, é que o analista se restringe apenas à identificação das causas que levam à um evento topo em particular. Além dos citados na Fig. (1), utilizam-se os seguintes símbolos para melhor estruturar a árvore:

- ◊ Casa – evento básico que ocorre normalmente, não sendo um evento de falha;
- ◊ Diamante – evento de falha não totalmente desenvolvida devido à suas causas ser desconhecidas, assumindo-se apenas como um evento de falha primário.

A Análise da Árvore de Falhas possui entre as suas vantagens mais representativas a possibilidade de determinação das causas potenciais e do cálculo da probabilidade de ocorrência de falhas em sistemas. Com isso, o conhecimento especialista pode ser estruturado, tornando possível a realização de um estudo de confiabilidade sobre os diagnósticos e a sua automatização.

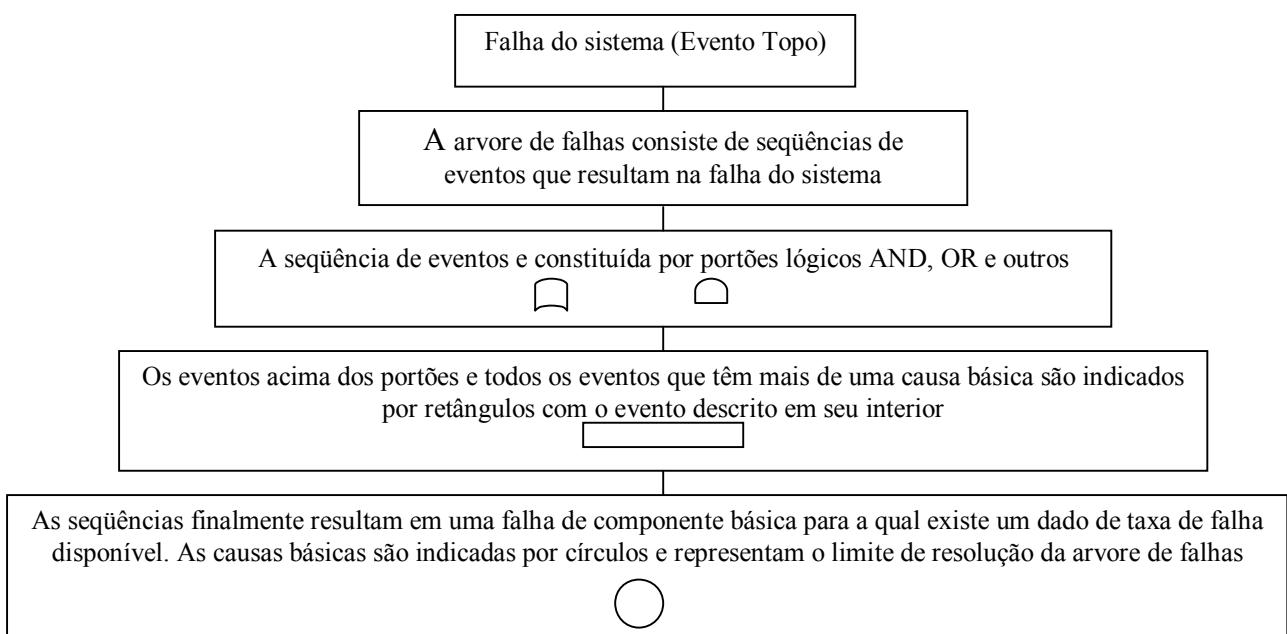


Figura 1. Estrutura fundamental da árvore de falhas.

## 2. A MONITORAÇÃO DA COMBUSTÃO

O comportamento do processo de combustão em motores Diesel pode ser acompanhado por diagramas que representem as mudanças de pressão que ocorrem no interior do cilindro, durante um ciclo de operação do motor, de acordo com o movimento do pistão. Esses diagramas são conhecidos como diagramas indicadores Diesel e podem ser de dois tipos: o diagrama indicador convencional ( $p \times V$ ), que relaciona as pressões no interior do cilindro ao volume deslocado pelo pistão, e o diagrama que relaciona as pressões no interior do cilindro ao ângulo de rotação do eixo de manivelas ( $p \times \theta$ ).

O diagrama  $p \times V$  pouco revela sobre a fase mais importante do processo de combustão do motor Diesel, que é aquela próxima ao Ponto Morto Superior (PMS), onde o pistão se move mais lentamente enquanto ocorre a combustão. Esta seria deficiência restringe o seu uso em diagnósticos de falhas. Por outro lado, as mudanças de pressão em proporção mais real e a clara distinção entre as curvas de compressão, combustão e expansão do ciclo de operação do motor – o início da ignição da mistura ar-combustível no interior do cilindro é determinado pelo ponto onde a curva de compressão separa-se da de combustão – podem ser evidenciadas no diagrama  $p \times \theta$  (Fig. 2), tornando-o uma ferramenta bastante poderosa na análise do processo de combustão, já que, a partir das medidas de suas características representativas (parâmetros operacionais), podem-se obter informações acerca da regulagem e balanceamento e da condição operacional dos sistemas e/ou componentes envolvidos na execução do ciclo de operação (cilindros, pistões, anéis de segmento, bombas e válvulas injetoras, sistema de admissão de ar/gás de descarga, etc.) e, também, se observar as condições de carga do motor.

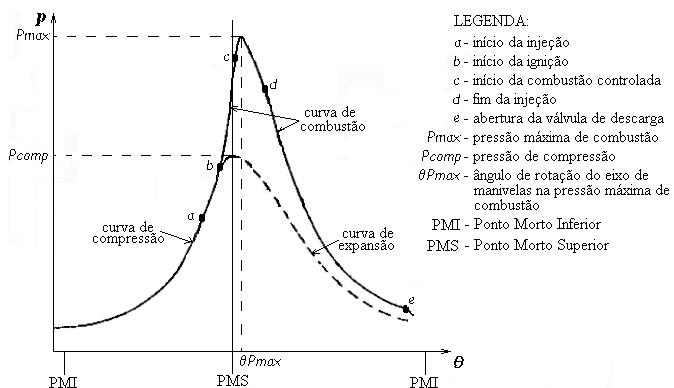


Figura 2. Diagrama  $p \times \theta$ .

Vários autores (Heywood, 1988; Ganesan, 1995; Challen & Baranescu, 1999) consideram a combustão nos motores Diesel em quatro estágios. O primeiro é o período de atraso entre o início da injeção de combustível e o começo da ignição da mistura ar-combustível, chamado de atraso à ignição. O segundo estágio, chamado de combustão descontrolada, é o período em que a combustão da mistura ar-combustível, acumulada no interior do cilindro durante o atraso à ignição, acontece em alta velocidade. O terceiro estágio, chamado de combustão controlada, é o período em que a mistura ar-combustível vai queimando uniformemente assim que o combustível é injetado no cilindro e onde ocorre a pressão máxima de combustão. O último estágio é chamado de combustão atrasada, posto que combustível não-queimado e parcialmente queimado que foi injetado inflama-se à medida que encontram oxigênio fresco para completar a sua combustão.

A monitoração do processo de combustão inclui o sistema de injeção de combustível entre a bomba injetora e a saída do bico injetor monitorado pelo diagrama  $P_{inj} \times \theta$  (Fig. 3), que relaciona as pressões de injeção de combustível ao ângulo de rotação do eixo de manivelas e medidas de parâmetros localizadas em pontos específicos do sistema de admissão de ar/gás de descarga.

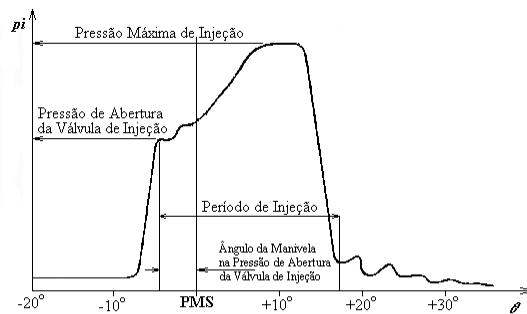


Figura 3. Diagrama  $P_{inj} \times \theta$ .

### 3. PARÂMETROS OPERACIONAIS

São as características representativas do processo de combustão que expressam quantitativamente a condição operacional do motor Diesel e seus componentes. O acompanhamento das alterações nesses parâmetros fornece um quadro mais preciso do processo de combustão, logo, do desempenho do motor.

Os parâmetros operacionais são determinados por medições diretas ou por expressões constituídas de outros parâmetros. A seguir são definidos os parâmetros operacionais que serão utilizados no presente trabalho.

#### 3.1. Parâmetros do Gás no Cilindro

São os parâmetros obtidos pelo diagrama  $p \times \theta$  ou em pontos específicos que são relacionados ao processo de combustão no interior do cilindro do motor.

$P_{max}$  – pressão máxima que ocorre no cilindro durante o processo de combustão.

$P_{comp}$  – pressão máxima que ocorreria no cilindro na ausência de combustão.

$\Delta_{ign}$  – período de atraso à ignição.

$C_{cil}$  – potência indicada no cilindro.

$TEP$  – taxa de elevação de pressão.

$T_{cil}$  – temperatura de combustão.

#### 3.2. Parâmetros de Injeção de Combustível

São os parâmetros referentes ao sistema de injeção de combustível, desde o tanque até a saída do bico injetor, fornecidos pelo diagrama  $P_{inj} \times \theta$ .

$PI_{max}$  – pressão máxima de injeção.

$PI_{aber}$  – pressão de abertura da válvula de injeção.

$\theta PI_{aber}$  – ângulo de rotação do eixo de manivelas na abertura da válvula de injeção.

$\Delta_{inj}$  – período de injeção de combustível.

$I_{deb}$  – índice de débito da bomba injetora.

$T_{pre}$  – temperatura do combustível medida na saída do pré-aquecedor de combustível.

### 3.3. Parâmetros de Admissão de Ar/Gás de Descarga

$T_{adm}$  – temperatura do ar de admissão.

$P_{adm}$  – Pressão do ar de admissão.

$\delta P_{fil}$  – medida da queda de pressão através do filtro de ar de admissão.

$\delta P_{ref}$  – queda de pressão através do resfriador intermediário do ar de admissão.

## 4. CONSTRUÇÃO DA ÁRVORE DE FALHAS

### 4.1. Definição do Sistema

Para definirmos o sistema utilizamos a proposta de Poucet (1988), baseada nas condições de contorno externas, que definem o aspecto global do sistema, isto é, os componentes que efetivamente farão parte da análise, e nas condições de contorno internas, que definem o nível de resolução da árvore de falhas, o que significa a discretização do sistema para fins de localização de falhas. A representação esquemática do sistema é mostrada na Fig. (4).

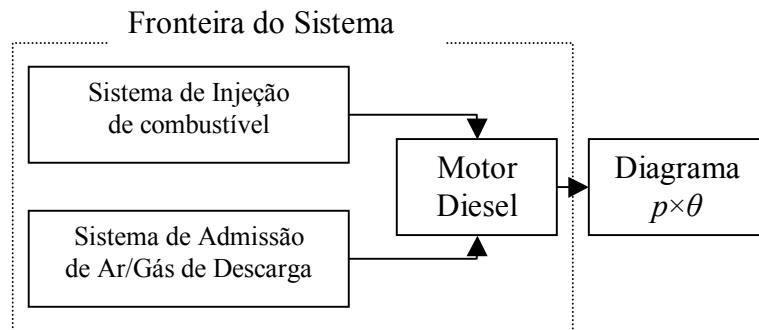


Figura 4. Funcionamento do sistema.

#### 4.1.1. Condições de Contorno Externas

Motor Diesel 4 – tempos, turbo carregado com resfriamento intermediário do ar de admissão e sistema de injeção de combustível. O sistema funciona da seguinte forma: combustível é injetado no ar de admissão dentro do motor para a realização do ciclo de operação, representado pelo diagrama  $p \times \theta$ .

#### 4.1.2. Condições de Contorno Internas

- Combustível;
- pré-aquecedor de combustível;
- eixo de cames da bomba injetora;
- cremalheira de débito de combustível;
- 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;
- mancais do eixo de manivelas;
- anéis de segmento;
- cilindros;
- válvulas de admissão;
- válvulas de descarga;
- duto de passagem da água de refrigeração do motor.

#### 4.2. Evento Topo

Baseado no princípio de funcionamento, considera-se que o sistema opera em estado de falha quando gera um diagrama  $p \times \theta$  com alta  $P_{max}$ .

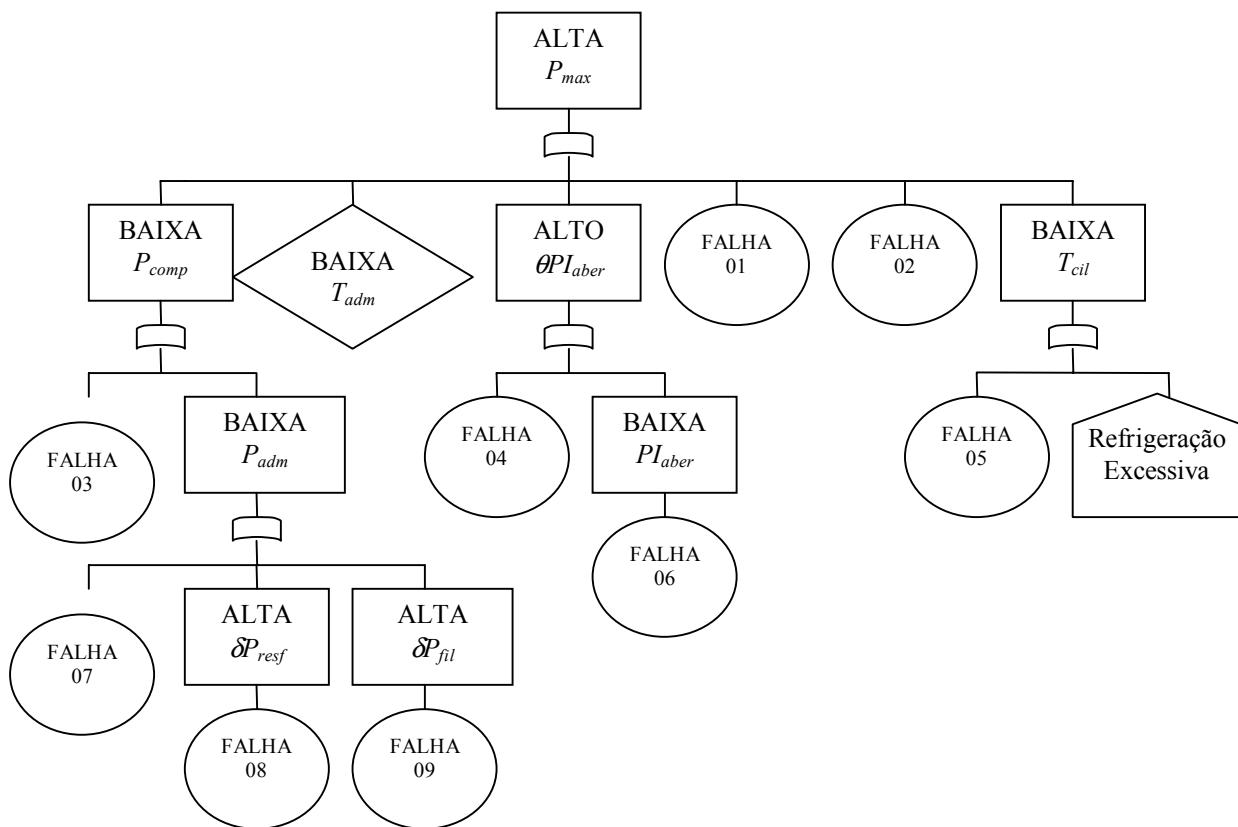


Figura 5. Árvore de falhas.

- Falha 01 – combustível fora das especificações de viscosidade (alta viscosidade);  
 Falha 02 – combustível está sofrendo contaminação causando baixa qualidade de ignição;  
 Falha 03 – desgaste no cilindro e/ou anéis de segmento e/ou válvulas de admissão e/ou descarga;  
 Falha 04 – regulagem de injeção muito avançada;  
 Falha 05 – bico injetor obstruído;  
 Falha 06 – mola da válvula de injeção quebrada;  
 Falha 07 – turbina e/ou compressor defeituosos;  
 Falha 08 – obstrução no duto de passagem de ar pelo resfriador;  
 Falha 09 – filtro de ar obstruído.

## 5. CONCLUSÃO

A monitoração da combustão utilizando a técnica desenvolvida permite apresentar um diagnóstico preditivo do motor Diesel tanto 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.

## 6. REFERÊNCIAS

- Elliot, C & Banisoleiman, K., 1990, "Advanced Health Monitoring Systems for Marine Medium Speed Diesel Engines – A Naval and Merchant View". *ICMS 90 – Maritime Systems Integrity*, paper 1, 3-17, 19 – 21 September 1990.
- Fagerland, H., Rothaug, K., Tokle, P. "Monitoring and Diagnosing Process Deviations in Marine Diesel Engines", *Ship Research Institute of Norway*, pp. 321-340, Mar. 1978.
- Ganesan, V., *Internal Combustion Engines*. 1 ed., New York, McGraw-Hill, 1995.
- Heywood, J.B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 1 ed., Singapore, McGraw-Hill, 1988.
- Kumamoto, H. & Henley, E., 1996, "Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists", 2 ed., The IEEE Inc., New York, USA.
- Lewis, E.E., 1994, "Introduction to Reliability Engineering", 2 ed., John Wiley & Sons.
- Perakis, A., Inözu, B. "Reliability Analysis of Great Lakes Marine Diesels: State of Art and Current Modeling", *Marine Technology* v. 27, n. 4, jul. 1990.
- Poucet, A., "Fault Tree and Event Tree Techniques". In: Amendola, A., Bustamante, A.S. (eds), *Reliability Engineering: Proceedings of the ISPRRA-Course Helds at the Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, Madrid, Spain, September 22-26, 1986 in collaboration with Universidad Politécnica de Madrid*, 1 ed., chapter 1-part II, Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1988.
- Romero, J.I., Guadalupe, J.B., Vega, S.G. "Sistema Automático Controlado por Ordenador para la Obtención y Análisis de los Diagramas de Presión del Motor Principal y de los Motores Auxiliares de un Buque", *Ingeniería Naval*, n.692, pp. 173–180, mar. 1993.
- Shamsolmaali, A., Banisoleiman, K. "Real Time Diagnostic Techniques and Condition Monitoring Application", *Trans. I Mar. E* v. 103, pp. 357-363, may 1994.
- Tenekedjiev, K., Lyubomir, A. Naumov, V. "Main Ship Engines and Auxiliary Power Devices Technical Diagnostics Using Pseudo-Discrete Features". 263–276, Varna, Bulgaria, August 1998.
- Vincent, M.R., Turnbull, A.T. "Onboard Combustion Monitoring", *Trans. I Mar.E*, Paper 7, v. 98, 1986.
- Warkman, D. C. "BP's Performance-Monitoring System for Marine Diesel Engines", *Trans. I Mar. E. (TM)*, paper 40, v. 95, 1983.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# **DIESEL ENGINE DIAGNOSYS BY COMBUSTION PROCESS ANALISYS USING FAULT TREE ANALISYS TECHNICAL**

## **Raimundo Nonato da Costa Coelho**

PENO/COPPE/UFRJ, Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, Bloco C, sala 203  
CEP: 21945-970, Ilha do Fundão – Rio de Janeiro – Brasil  
nonato@peno.coppe.ufrj.br

## **Carlos Rodrigues Pereira Belchior**

PENO/COPPE/UFRJ, Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, Bloco C, sala 203  
CEP: 21945-970, Ilha do Fundão – Rio de Janeiro – Brasil  
belchior@peno.coppe.ufrj.br

## **Mauro José Guerreiro Veloso**

DEM/CT/UFPA, Campus Universitário do Guamá, Rua Augusto Corrêa, 01  
CEP 66075-110 – Belém – Pará – Brasil  
mjgveloso@uol.com.br

***Abstract.*** This paper concern on set of rules to diagnoses against on Diesel engines aided by Fault Tree and combustion engine analysis. The Fault Tree Analysis method identified the potential causes of faults, evaluate its occurrences probabilities, and support reliability calculation on knowledge datum which is applied to predictive maintenance systems. At the end we discuss the application of this methodology and some results obtained.

***Keywords:*** engine, Diesel, combustion, fault tree, diagnosis.