

ADENILSON CRISTIANO BELIZÁRIO

AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DO MOTOR DIESEL COM A
ADIÇÃO DE SISTEMAS DE INJEÇÃO DE GÁS NA CÂMARA DE
COMBUSTÃO

São Paulo
2012

ADENILSON CRISTIANO BELIZÁRIO

AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DO MOTOR DIESEL COM A
ADIÇÃO DE SISTEMAS DE INJEÇÃO DE GÁS NA CÂMARA DE
COMBUSTÃO

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
como requisito para Obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica de Projeto de
Fabricação

Orientador: Prof. Livre-Docente Gilberto
Francisco Martha Souza

São Paulo
2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Belizário, Adenilson Cristiano

Alteração na confiabilidade do motor diesel com a adição de sistemas de injeção de gás na câmara de combustão / A.C.

Belizário. -- São Paulo, 2012.

143 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1. Motores diesel (Confiabilidade; Alteração) 2. Combustão I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II. t.

Dedicatórias

A Deus, o Grande Arquiteto do Universo

À minha amada Viviane, esposa leal e mulher guerreira, que esteve sempre ao meu lado me incentivando e a quem entrego meu amor todos os dias da minha vida.

Ao meu filho Fernando, fruto de um amor verdadeiro, e esperança de um mundo melhor.

Aos meus pais, Nilson e Ana, principais responsáveis pela minha formação e por toda dedicação dada a mim.

Agradecimentos

Ao Professor Gilberto Francisco Martha de Souza, a quem admiro desde os tempos de graduação, por acreditar em meu trabalho, incentivar e se dedicar para que chegássemos a este resultado.

Ao Professor Tarcísio Antônio Hess Coelho pelo auxílio no início do Mestrado, e pela valorosa amizade.

Ao professor José Roberto Simões Ladeira por participar de minha qualificação, pela orientação e material disponibilizado.

Ao professor Júlio César Adamowski pelas orientações e amizade.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, ao Departamento de Engenharia Mecânica e ao Corpo Docente, pela oportunidade de evolução dada a mim.

Aos colegas do laboratório de projeto mecânico e confiabilidade.

Aos funcionários da secretaria de pós-graduação, em especial Marisa Lara e Regiane Amaral.

À Delphi Sistemas, aos Engenheiros Vicente Pimenta e Luís Henrique Verginelli, pela recepção em visita técnica e auxílio neste trabalho.

À Associação de Engenharia Automotiva e à Bosch pela colaboração.

À CENPES-Petrobrás, em especial o engenheiro Guilherme Conceição.

Ao Instituto de Ensayo de Materiales do Uruguay responsáveis por Colônia END 2011, onde fora apresentada parte desta dissertação.

Aos meus irmãos Francine, Edison, Jefferson e minhas sobrinhas Bárbara e Manuella, por estarem ao meu lado em momentos difíceis.

A Osvaldo, Ronaldo, Vanessa e Maria Amélia pelo suporte dado em minhas ausências.

À memória de Antônio Miranda da Rocha Antunes, Tiburcio dos Santos, Pedro Mário Fávero e Francisca Dias Gobbi

A Oxósse, grande caçador e à Yemanjá, grande mãe, donos de minha vida.

A todos os orixás, donos de meu destino.

Resumo

Visando a redução de poluentes emitidos pelos motores de combustão interna com ignição por compressão, que operam conforme o ciclo diesel, foram desenvolvidos nos últimos anos dispositivos para a operação destes motores com novos combustíveis, que além da redução de poluentes barateariam o custo de operação, devido à oportunidade de utilização de alguns combustíveis com boa disponibilidade. No presente estudo analisa-se a operação do motor diesel utilizando gás natural como combustível. Neste caso utiliza-se o óleo diesel apenas como combustível piloto, que será responsável pela ignição do segundo combustível, o gás natural. Em diversas publicações constata-se o ganho ambiental e econômico desta aplicação, porém nada é comentado em relação à alteração de índices de confiabilidade e surgimento de novos modos de falha. Neste trabalho verifica-se através de ferramentas de análise de confiabilidade, tais como a análise do tipo FMEA e Árvore de falhas, quais os principais modos de falha que serão inseridos no motor de combustão interna do tipo diesel quando este passa a operar como bi-combustível, com gás natural. Para tanto, necessita-se subdividir o motor diesel em subsistemas mostrando sua estruturação em árvores funcionais e integrando o kit diesel gás neste sistema. A partir da análise de confiabilidade verifica-se a probabilidade de ocorrência de novos modos de falha, que necessitarão da elaboração de novos planos de manutenção ou mesmo alterações no projeto do subsistema de injeção de gás natural.

Palavras-chave: motor diesel, kit Diesel-Gás, confiabilidade, dual fuel.

Abstract

In order to reduce pollutants emissions from internal combustion engines with compression bend ignition, designed to operate as the Diesel cycle, it has been developed in recent years devices for the addition of new fuels, which in addition to reducing pollutants could lower the cost of operation, due to the possibility of use of some fuels with good availability. In this case it is used only the diesel oil as the pilot flame, which is responsible for the ignition of the second fuel, the natural gas. Many publications discuss the environmental and the economic gain with the use of natural gas as fuel application, however nothing is said about the change of reliability indexes and the appearance of new failure modes in the engine. In this study through system reliability analysis tools such as Faillure Mode Effects and Analisis and Fault tree analysis it is analysed, which are the main failure modes that are inserted into the internal combustion engine when it comes to operate as dual fuel. For that analyses it is necessary to split the engine into subsystems showing its functional trees and integrating diesel gas kit in this system. New failure modes appear with greater severity than the existing in the traditional diesel engine system, leading to new design and maintenance practices. The end user, according to his need, will have one more parameter to choose whether to adopt a Diesel Gas system.

Keywords: diesel engine, Diesel-Gas kit, reliability, dual fuel.

Índice de Ilustrações

Figura 2.1 - Função de Probabilidade Acumulada (Leitch, 1995).	Erro! Indicador não definido.2
Figura 2.2 - Função de Confiabilidade R(t) (Leitch, 1995).	Erro! Indicador não definido.3
Figura 2.3 - Representação da Curva da Banheira (Lafraia, 2001).	14
Figura 2.4 – Distribuição de Weibull para os diversos valores de β (Souza, 2003) ..	17
Figura 2.5 – Exemplo de FTA (Bass Associates Inc., 2010)	21
Figura 2.6 – Eventos Primários, Intermediários e portas lógicas utilizadas	22
Figura 3.1 – Nomenclatura dos motores alternativos para cilindros e pistão (Moran & Shapiro, 2009).	27
Figura 3.1 – Diagrama de pressão e volume para um motor de combustão alternativo.....	28
Figura 3.3 – Diagramas p-v e T-s do ciclo de ar padrão Diesel (Borgnakke et al., 2009)	30
Figura 4.1. Possíveis arranjos de injeção piloto e injeção de gás na câmara de combustão.....	36
Figura 4.2: Árvore funcional motor diesel.....	46
Figura 4.3 - Composição sistema de injeção diesel (Sampaio, 2010)	47
Figura 4.4 – Sensores do sistema de injeção diesel (Sampaio, 2010)	49
Figura 4.5 - Árvore funcional do motor diesel com adição de kit diesel gás	50
Figura 4.6 – Esquema de funcionamento kit diesel gás de terceira geração	51
Figura 4.7 – árvore de Funcional do kit diesel gás.....	52
Figura 4.8: Injetor de Gás Fonte: (Gaspoint).....	53
Figura 4.10. – Pedal com sensor de aceleração (Veiga, 2010)	55
Figura 4.11 Sonda Lambda Fonte: (Sobre Carros, 2012)	56
Figura 4.13 – Atuador Linear.....	57
Figura 4.14 - Cilindro.....	60
Figura 4.15 – Regulador de Pressão	61
Figura 4.16 – Válvula de excesso de fluxo.....	61

Figura 5.1. – programa ReliaSoft Weibull ++ 8	65
Figura 5.2. – Gráfico Confiabilidade X Tempo do Injetor de Gás.....	66
Figura 5.3. – Gráfico Confiabilidade X Ciclos do seletor	68
Figura 5.4. – Gráfico Confiabilidade X Tempo do Sensor de Rotação	69
Figura 5.5. – Gráfico Confiabilidade X Tempo do Sensor Angular.....	71
Figura 5.6. – Gráfico Confiabilidade X Tempo da Sonda Lambda.....	72
Figura 5.7. – Gráfico Confiabilidade X Tempo do Controlador Eletrônico.....	73
Figura 5.8. – Gráfico Confiabilidade X Tempo do Atuador Linear.....	74
Figura 5.9. – Gráfico Confiabilidade X Tempo do Cilindro de Gás.....	76
Figura 5.10. – Gráfico Confiabilidade X Tempo do Regulador de Pressão.....	77
Figura 5.12 – Gráfico Confiabilidade X Tempo da Válvula de Segurança	78
Figura 5.12. – Gráfico Confiabilidade X Tempo do Injetor de Gás.....	80
Figura 5.13 – Desenvolvimento de árvore do Kit Diesel Gás para Combustão Inadequada	81
Figura 5.14. – Estimativa de falhas x Tempo do Kit Diesel Gás para Combustão Inadequada	84
Figura 5.15. – Desenvolvimento de árvore do kit diesel gás para explosão	85
Figura 5.16. – Estimativa de falhas x Tempo do Kit Diesel Gás para Explosão	86
Figura 5.17. – Desenvolvimento de árvore do kit diesel gás para kit gás não aciona	86
Figura 5.18. - Probabilidade de Falhas Acumuladas por tempo do não acionamento do kit diesel gás.....	90
Figura 5.19. – Desenvolvimento de árvore do Kit Diesel Gás para Kit Diesel Gás Não Retorna a Função somente Diesel.....	91
Figura 5.20 - Probabilidade de Falhas Acumuladas por tempo do retorno do kit diesel gás a função somente diesel.	92

Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Comparativo entre FTA e FMEA. (Bass Associates Inc., 2010)....	22
Tabela 4.1 – Características do óleo diesel brasileiro S-50, (ANP 42, 2009). .	40
Tabela 4.2: Composição do gás natural brasileiro (ANP 16, 2008)	41
Tabela 5.1 – Valores de β e η para Injetor de Gás e R(t) e F(t) para 120.000 km/4.000 horas	65
Tabela 5.2 – Valores de β e η para seletor e R(t) e F(t) para 120.000 km/ 4.000 horas	67
Tabela 5.3. – Valores de β e η para Sensor de Rotação e R(t) e F(t) para 120.000 km/ 4.000 horas	68
Tabela 5.4 – Valores de β e η para Sensor Angular e R(t) e F(t) para 120.000 km/ 4000h	70
Tabela 5.5. – Valores de β e η para Sonda Lambda e R(t) e F(t) para 120.000 km/ 4.000 horas	71
Tabela 5.6 – Valores de β e η para Cilindro de Gás e R(t) e F(t) para 200.000 km/4000 horas	75
Tabela 5.7. – Valores de β e η para Regulador de Pressão e R(t) e F(t) para 120.000 km/ 4.000 horas	76
Tabela 5.8. – Valores de β e η para Válvula de Segurança e R(t) e F(t) para 120.000 km/ 4.000 horas/ 400 ciclos.....	78
Tabela 5.9 – Valores de β e η para Eletroválvula e R(t) e F(t) para 4.000 horas	79
Tabela 5.10 – Números e Letras para combustão inadequada utilizados na FTA	82
Tabela 5.11. – Falha de Combustão Inadequada 4.000 horas	84
Tabela 5.12 - Números e letras para explosão utilizados na FTA.....	85
Tabela 5.13. – Probabilidade de Falha Acumulada de Explosão do Cilindro para 120.000/ 4.000 horas	87
Tabela 5.14 - Números e Letras para kit gás não aciona utilizados na FTA....	89
Tabela 5.15. – Falha “kit gás não aciona” para 4.000 horas/ 120.000 km	89
Tabela 5.16 - Números e Letras para kit diesel gás não retorna utilizados na FTA	91
Tabela 5.17. – Estimativa para 4.000 horas/ 120.000 km.....	92
Tabela 5.18: Critério de Severidades de Falha do kit diesel gás	93

Tabela 5.19: Critério de Ocorrência de Falha do kit diesel gás.....	94
Tabela 5.20: Critério de Detecção de Falha do kit diesel gás	94

Lista de Siglas e Símbolos

α	tempo médio de vida para distribuição exponencial
β	parâmetro de forma (Weibull)
η	parâmetro de escala (Weibull)
η_t	rendimento térmico
$\lambda(t)$	taxa de falha
μm	micrometro
FMEA	Análise de modos e efeitos de falhas (Failure mode and effects analysis)
FTA	Análise por árvore de falhas (Failure tree analysis)
BS	British Standard
Q	calor
cm^3	centimetro cúbico
cm^2	centimetro quadrado
cSt	Centistokes
R (t)	confiabilidade
$R_s(t)$	confiabilidade de sistema
CO_2	Dióxido de Carbono
SO_2	Dióxido de Enxofre
η_t	eficiência térmica
u	energia interna específica
h	entalpia específica
s	entropia específica
US	Estados Unidos (United States)
F(t)	função de probabilidade acumulada de falha
$F_s(t)$	função de probabilidade acumulada de falha do sistema
f(t)	função densidade de probabilidade de falha
g	grama
$^{\circ}\text{C}$	graus celsius
HDBK	Handbook
HC	hidrocarboneto
HPA	hidrocarbonetos aromáticos polinucleares
∞	infinito
MP	material particulado

Mpa	mega pascal
mg	miligrama
$m_x^{(i)}$	momento inercial de ordem i de uma distribuição de probabilidade
CO	Monóxido de Carbono
MCI's	motores de combustão interna
N ₂	nitrogênio (gás)
SO _x	óxidos de enxofre
NO _x	óxidos de nitrogênio
PPM	parte por milhão
PCI	poder calorífico inferior
PMI	ponto morto inferior
PMS	ponto morto superior
P	pressão
Pme	Pressão média efetiva
P { }	probabilidade
kcal	quilocaloria
kgf	quilograma força
km	quilômetro
r _c	razão de corte de combustível
r _v	razão de compressão
k	razão entre calores específicos para o ar atmosférico
UK	Reino Unido (United Kingdom)
RPM	rotações por minuto
T	temperatura
t	tempo
MTTF	tempo médio até a falha
W	trabalho
Δt	variação temporal
VAR	Variância
V	volume
v	volume específico