

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA**

**ESTUDO COMPARATIVO DE MOTORES MARÍTIMOS ATRAVÉS DA
ANÁLISE DE LUBRIFICANTES USADOS E ENGENHARIA DE
CONFIABILIDADE**

OBERDAN CARRASCO NOGUEIRA

Dissertação apresentada à Comissão de Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Mauro de Vasconcellos Real, Dr.

À minha família, em especial à minha
esposa Renata e meu afilhado Alex Jr.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Mauro de Vasconcellos Real, pela fundamental e incansável orientação, apoio e pela confiança depositada em meu trabalho.

Aos colegas Fábio Teixeira, Eduardo Azevedo e Otávio Corrêa que, de alguma forma, colaboraram com sugestões, críticas e incentivos.

Ao Prof. José Antônio Fontoura, pelo apoio e confiança.

A funcionária Nilza, pelo suporte e apoio dado durante a realização do curso.

RESUMO

O estudo apresenta a comparação de desempenho operacional de motores de combustão principais de embarcações de suporte a plataformas de petróleo, utilizando dados de desgaste de componentes dos motores obtidos através das análises dos lubrificantes em operação nos motores, e modelagem estatística do comportamento de falhas em função do tempo de operação dos mesmos. Primeiramente efetuou-se o estudo dos resultados das análises dos lubrificantes em uso nos motores, classificando-os de acordo com o comportamento, origem e nível de desgaste dos mesmos, e assim obtendo as distribuições de probabilidade dos tempos de falhas da vida para os modelos de motores (ciclos dois-tempos ou quatro-tempos). Após esta etapa, realizou-se a modelagem dos motores, utilizando Distribuição de Weibull, em função de seus principais componentes (Parte Alta e Parte Baixa), utilizando a técnica de Diagrama de Blocos, determinando o comportamento dos tempos de falhas de cada subsistema, e posteriormente, dos equipamentos, obtendo-se os correspondentes parâmetros das distribuições. De posse dessas informações, foram determinados os intervalos de tempo correspondentes a um nível requerido de confiabilidade e tempo médio entre falhas, obtendo conseqüentemente intervalos adequados para intervenções de manutenção preventiva sistemática e preditiva nos equipamentos.

Palavras-chave: Confiabilidade, Weibull, Motor Diesel, Desgaste, Manutenção, Lubrificação

ABSTRACT

This work presents the comparison of the operational performance of the main diesel marine engines of vessels which support offshore oil platforms, using data from the engine components' wear. These data were obtained through a predictive analysis of the lubricants in use in these engines and through statistical methodology on the failure behavior related to their lifetime. First, the study of the lubricants analysis results was done, classifying them according to their behavior, origin and wear level and obtaining the distribution parameters of failure-time for each equipment model (two-stroke or four-stroke diesel engine). After this step, the modeling engine was done using the Weibull distribution, in relation to its main components (Higher Part and Lower Part), using the Blocks Diagram Technique, determining the behavior of failure-time of each subsystem, and subsequently, of the equipment, obtaining the corresponding distribution parameters. With this information, time intervals corresponding to a required reliability level and mean time among failures were determined, obtaining a great range for interventions in preventive and predictive maintenance on equipment.

Keywords: Reliability, Weibull, Diesel engine, Wear, Maintenance, Lubrication

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	13
LISTA DE SÍMBOLOS	14
1. INTRODUÇÃO	16
1.1 ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE E MANTENABILIDADE	16
1.2 EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE PETRÓLEO <i>OFFSHORE</i>	21
1.3 OBJETIVOS	23
2. METODOLOGIA	26
2.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	26
2.2 POPULAÇÃO E AMOSTRA	26
2.3 ANÁLISE DOS DADOS	27
2.4 OS EQUIPAMENTOS	28
2.5 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	29
2.5.1 Princípios de Funcionamento	30
2.5.1.1 Motores Diesel Dois-tempos Marítimos	30
2.5.1.2 Motores Diesel Quatro-tempos Marítimos	32
2.6 ANÁLISE DE LUBRIFICANTES E ESPECTROMETRIA	33
2.7 COMPONENTES E PARÂMETROS DE MONITORAMENTO	35
2.7.1 Pistões	36

2.7.2 Cilindro ou Camisa	36
2.7.3 Anéis de Segmento	37
2.7.4 Biela	37
2.7.5 Classificação de Componentes – Parte Alta e Parte Baixa.....	38
2.8 CONCEITOS DE CONFIABILIDADE E MANTENABILIDADE.....	38
2.9 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ESTIMAÇÃO	42
2.9.1 Intervalos de Confiança dos Parâmetros de Estimação	43
2.10 COMPETIÇÃO DE MODOS DE FALHAS	44
2.10.1 Método de Diagrama de Blocos – Confiabilidade de Sistemas	45
2.10.2 Testes de Comparação	45
2.11 CONCEITOS DE MANUTENÇÃO	47
2.11.1 Tarefas Programadas sob Condição	48
2.11.2 Tarefas Programadas de Restauração ou Descarte	49
2.11.3 Tarefas Padrão	49
2.11.4 Tipos de Falhas Associadas às Estratégias de Manutenção	50
2.11.4.1 Falhas relacionadas à idade.....	50
2.11.4.2 Falhas aleatórias	52
2.11.4.3 Falhas prematuras	53
3. RESULTADOS	54
3.1 TRATAMENTO DE DADOS	55
3.1.1 Parte Alta do Motor Dois-tempos	58
3.1.2 Parte Baixa do Motor Dois-tempos	64
3.1.3 Parte Alta do Motor Quatro-tempos	67
3.1.4 Parte Baixa do Motor Quatro Tempos	70
3.2 MODELAGEM DOS SISTEMAS	73
3.2.1 Motor Dois-tempos	75
3.2.2 Motor Quatro-tempos	81
4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	87
4.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODOS DE FALHA	87

4.1.1 Partes Altas dos Motores	87
4.1.2 Partes Baixas dos Motores	92
4.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MOTORES	97
4.2.1 Definição das Estratégias de Manutenção.	105
4.2.1.1 Motores Dois-tempos	105
4.2.1.2 Motores Quatro-tempos	107
5. CONCLUSÕES	110
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
7. ANEXOS.....	117
ANEXO A – FICHAS TÉCNICAS DOS LUBRIFICANTES.....	117
ANEXO B - PLANILHA DE DADOS MICROSOFT EXCEL	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Motor Diesel Marítimo em instalação de embarcação transoceânica	18
Figura 1.2 - Plataforma P-52 em operação na Bacia de Campos	23
Figura 2.1 - Embarcação Supridora em aproximação à Plataforma de Petróleo.....	29
Figura 2.2 - Funcionamento de motor diesel dois-tempos	31
Figura 2.3 - Funcionamento de motor diesel quatro-tempos	32
Figura 2.4 - Exemplo de Laudo de Análise de lubrificante usado	34
Figura 2.5 - Equipamento utilizado para realizar Espectrometria por Plasma	35
Figura 2.6 - Principais componentes de motores sujeitos a desgaste evidenciado pela análise do lubrificante.....	36
Figura 2.7 - Distribuição de Weibull e suas variações de forma	39
Figura 2.8 - Taxas de Falhas da distribuição de Weibull	40
Figura 2.9 - Curva da Banheira	42
Figura 2.10 - Diagrama de Blocos dos Motores Diesel – Parte Alta e Parte Baixa em série	45
Figura 2.11 - Determinação de frequência de tarefas de manutenção baseadas em condição - Diagrama P-F	48
Figura 2.12 - Influência da estratégia de manutenção na Curva da Banheira	50
Figura 2.13 - Diferença entre MTBF e Vida útil	51
Figura 2.14 - Efeito de intervenções em equipamentos com taxa de falhas crescente.....	51

Figura 2.15 - Efeito de intervenções em equipamentos com taxa de falhas constante.....	52
Figura 2.16 - Possível efeito de intervenções em equipamentos com taxa de falhas decrescente.....	53
Figura 3.1 - Ajuste dos dados – Distribuição de Probabilidade Acumulada de Weibull dos dados do Motor Dois-tempos.....	54
Figura 3.2 - Ajuste dos dados – Distribuição de Probabilidade Acumulada de Weibull dos dados do Motor Quatro-tempos.....	55
Figura 3.3 - Ajuste dos conceitos probabilísticos utilizados para a determinação dos parâmetros de estimação e intervalo de confiança	60
Figura 3.4 - Determinação dos parâmetros de estimação	60
Figura 3.5 - Função $f(T)$ do Modo de Falha	61
Figura 3.6 - Função $R(T)$ do Modo de Falha	62
Figura 3.7 - Função $P(T)$ do Modo de Falha	62
Figura 3.8 - Função Taxa de Falhas $\lambda(T)$ do Modo de Falha	63
Figura 3.9 - Tempo de Vida para $R(T)=95\%$	63
Figura 3.10 - Tempo Médio entre Falhas	64
Figura 3.11 - Função $f(T)$ do Modo de Falha	65
Figura 3.12 - Função $R(T)$ do Modo de Falha	66
Figura 3.13 - Função $P(T)$ do Modo de Falha	66
Figura 3.14 - Função Taxa de Falhas $\lambda(T)$ do Modo de Falha	67
Figura 3.15 - Função $f(T)$ do Modo de Falha	68
Figura 3.16 - Função $R(T)$ do Modo de Falha	69
Figura 3.17 - Função $P(T)$ do Modo de Falha	69
Figura 3.18 - Função Taxa de Falhas $\lambda(T)$ do Modo de Falha	70
Figura 3.19 - Função $f(T)$ do Modo de Falha	71
Figura 3.20 - Função $R(T)$ do Modo de Falha	72
Figura 3.21 - Função $P(T)$ do Modo de Falha	72
Figura 3.22 - Função Taxa de Falhas $\lambda(T)$ do Modo de Falha	73
Figura 3.23 - Visão Geral do software Reliasoft BlockSim com o Diagrama de Blocos do motor dois-tempos	74

Figura 3.24 - Modelagem do Motor através da técnica de Diagrama de Blocos ...	75
Figura 3.25 - Configuração do Bloco Parte Baixa do Motor Dois-tempos	76
Figura 3.26 - Configuração do Bloco Parte Alta do Motor Dois-tempos	76
Figura 3.27 - Equação da Confiabilidade do sistema	77
Figura 3.28 - Função $f(T)$ do sistema	77
Figura 3.29 - Função $R(T)$ do sistema	78
Figura 3.30 - Função $P(T)$ do sistema	78
Figura 3.31 - Função $\lambda(T)$ do sistema	79
Figura 3.32 - Cálculo de tempo de uso do sistema para confiabilidade de 95% ...	79
Figura 3.33 - Cálculo do MTBF do sistema	80
Figura 3.34 - Modelagem do Motor através da técnica de Diagrama de Blocos ...	81
Figura 3.35 - Configuração do Bloco Parte Baixa do Motor Quatro-tempos	82
Figura 3.36 - Configuração do Bloco Parte Alta do Motor Quatro-tempos	82
Figura 3.37 - Equação da Confiabilidade do sistema	83
Figura 3.38 - Função $f(T)$ do sistema	83
Figura 3.39 - Função $R(T)$ do sistema	84
Figura 3.40 - Função $P(T)$ do sistema	84
Figura 3.41 - Função $\lambda(T)$ do sistema	85
Figura 3.42 - Cálculo de tempo de uso do sistema para confiabilidade de 95% ...	85
Figura 3.43 - Cálculo do MTBF do sistema	86
Figura 4.1 - Gráfico comparativo das funções $f(T)$	88
Figura 4.2 - Teste de Comparação de Brown e Rutemiller	89
Figura 4.3 - Gráfico comparativo das funções $R(T)$	90
Figura 4.4 - Gráfico comparativo das funções $P(T)$	90
Figura 4.5 - Gráfico comparativo das funções $\lambda(T)$	91
Figura 4.6 - Gráfico comparativo das funções $f(T)$	93
Figura 4.7 - Teste de Comparação de Brown e Rutemiller	94
Figura 4.8 - Gráfico comparativo das funções $R(T)$	95
Figura 4.9 - Gráfico comparativo das funções $P(T)$	95
Figura 4.10 - Gráfico comparativo das funções $\lambda(T)$	96
Figura 4.11 - Gráfico comparativo das funções $f(T)$ dos motores	98

Figura 4.12 - Gráfico comparativo das Confiabilidades $R(T)$ dos motores	99
Figura 4.13 - Gráfico comparativo das Probabilidades de Falhas $P(T)$ dos motores	99
Figura 4.14 - Gráfico comparativo das Taxas de Falhas $\lambda(T)$ dos motores	101
Figura 4.15 - Teste de verificação de diferença de vida útil entre os componentes dos motores quatro-tempos.....	102
Figura 4.16 - Comparação das Taxas de Falhas dos componentes dos motores quatro-tempos	103
Figura 4.17 - Teste de verificação de diferença de vida útil entre os componentes dos motores dois-tempos	103
Figura 4.18 - Comparação das Taxas de Falhas dos componentes dos motores dois-tempos	104
Figura 4.19 - Comparação das Confiabilidades dos componentes dos motores dois-tempos	105
Figura 4.20 - Comparação entre MTBF e “Vida útil” para motores dois-tempos ...	106
Figura 4.21 - Diagrama P-F para motores dois-tempos	106
Figura 4.22 - Comparação entre MTBF e “Vida útil” para motores quatro-tempos	107
Figura 4.23 - Diagrama P-F para motores dois-tempos	108

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2.1 - Principais Especificações Técnicas dos Motores de Combustão Principal</i>	33
<i>Tabela 2.2 - Distribuições e tipos de falhas em função do parâmetro de forma .</i>	41
<i>Tabela 3.1 - Parte do Banco de Dados após tratamento no Microsoft Excel</i>	56
<i>Tabela 3.2 - Parte dos Dados inseridos no software Weibull ++ - Parte Alta do Motor dois-tempos</i>	59
<i>Tabela 4.1 - Resultados obtidos para os modos de falha Parte Alta dos motores</i>	87
<i>Tabela 4.2 - Resultados obtidos para os modos de falha Parte Baixa dos motores</i>	92
<i>Tabela 4.3 - Resultados obtidos para os dois tipos de motores</i>	97

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>HP</i>	Unidade de Potência - Horse-power
<i>rpm</i>	Unidade de frequência - Rotações por minuto
<i>mm</i>	Unidade de comprimento – milímetro
<i>ppm</i>	Unidade de concentração – partes por milhão
$f(T)$	Função densidade de Probabilidade
β	Parâmetro de Forma – Distribuição de Weibull
γ	Parâmetro de Localização – Distribuição de Weibull
η	Parâmetro de Escala – Distribuição de Weibull
T, t	Tempo – horas de operação
$R(T)$	Função Confiabilidade
$P(T)$	Função Probabilidade de Falhas
$\lambda(T)$	Função Taxa de Falhas
<i>MTBF</i>	Tempo Médio entre Falhas (horas de operação)
$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$	Parâmetros de Estimação
x	Variável aleatória
$f(x; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$	Função densidade de probabilidade com variável aleatória x e parâmetros de estimação $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$
x_1, x_2, \dots, x_R	Tempos de falhas dos equipamentos
L	Função de Verossimilhança
Λ	Logaritmo Neperiano da função de Verossimilhança
$\hat{\theta}$	Estimador de Máxima verossimilhança de θ
θ_s, θ_i	Limite superior e inferior do intervalo de confiança

δ	<i>Intervalo de Confiança Unilateral</i>
k_1	<i>Constante de integração</i>
$R_{motor}(T)$	<i>Função confiabilidade dos motores</i>
$R_{pa}(T)$	<i>Função Confiabilidade da Parte Alta dos Motores</i>
$R_{pb}(T)$	<i>Função Confiabilidade da Parte Baixa dos Motores</i>
t_1, t_2	Tempos de Falhas
$P[t_2 \geq t_1]$	Probabilidade dos tempos de falhas t_2 serem maiores do que de os tempos de falhas t_1 .
$f_1(t)$	Função densidade de probabilidade da primeira distribuição
$R_2(t)$	Função de confiabilidade da segunda distribuição
F	Dado de Falha
S	Dado em Suspensão
$F(T)$	Função Densidade Acumulada de Probabilidade de Weibull
$P(T \leq T_0)$	Probabilidade da Variável Aleatória T ser menor ou igual a T_0

1. INTRODUÇÃO

1.1 ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE E MANTENABILIDADE

Atualmente, sobretudo na última década, muitas entidades, no Brasil e no exterior, vêm utilizando conceitos de engenharia de confiabilidade aplicados a manutenção, sobretudo as grandes instituições privadas dos segmentos de mineração, petroquímico, petrolífero e siderúrgico, dentre estas se podem destacar Braskem, Vale, Petrobrás, Shell, etc., e públicas, como Marinha do Brasil, Guarda Costeira Norte-Americana, entre outras. O uso destas ferramentas tem como principal objetivo o aumento da confiabilidade de equipamentos, disponibilidade dos processos produtivos e redução de custos globais. Estes estudos normalmente utilizam como fonte de informações dados históricos de manutenção preventiva, ou ainda resultados de técnicas de monitoramento preditivo, visto que normalmente, os departamentos de manutenção de grandes instituições apresentam um controle apurado de informações de seus ativos, o que possibilita a análise. Empresas que não apresentam histórico de falhas e manutenções de seus equipamentos dificilmente poderiam fazer uso da Engenharia de Confiabilidade, por falta de dados confiáveis para análise.

ARTANA e ISHIDA (2008) propuseram um modelo matemático para determinação de intervalos ótimos para manutenção em equipamentos em final de vida útil, considerando na análise conceitos de Engenharia de Confiabilidade e manutenibilidade, englobando aspectos relacionados à disponibilidade, perdas financeiras devido à parada dos equipamentos e custos de manutenção. É possível observar que naquela época os conceitos de confiabilidade aplicados a manutenção já possuíam sua importância.

Introduzindo os conceitos de manutenção baseada em condição associados a análises estatísticas, JARDINE, LIN e BANJEVIC (2005) abordaram a importância da análise de dados e aplicação de ferramentas de manutenção preditiva na definição das estratégias de intervenções nos equipamentos e tomada de decisão baseada em fatos e dados, e sua importância no comportamento dos equipamentos e na previsibilidade

de falhas.

NOGUEIRA (2006) apresentou a importância da lubrificação na redução de perdas de produção, além de apresentar os conceitos e aplicações práticas da metodologia denominada Lubrificação Centrada em Confiabilidade (RCL), desenvolvida com o intuito de aplicar os conceitos de Engenharia de Confiabilidade na lubrificação de equipamentos, associada a técnicas de monitoramento preditivo.

JARDINE, BANJEVIC e LUGTIGHEID (2007) apresentam modelos matemáticos para a determinação dos intervalos ótimos para realização de intervenções para manutenção ou inspeção em sistemas reparáveis, visando à redução de perdas financeiras e aumento de disponibilidade dos equipamentos e processos.

Um ano mais tarde, PASCUAL, JARDINE e LOUIT (2008) propuseram um procedimento prático para a seleção dos modelos de tempos até a falha com base em dados de manutenção, visando à correta coleta e análise de tempos de falhas de componentes e sistemas, com o objetivo de evitar a ocorrência de análises estatísticas de falhas e conclusões errôneas devido à obtenção equivocada dos dados, considerando também os aspectos relacionados às distribuições de probabilidade de falhas e de reparo dos sistemas.

Em se tratando do segmento marítimo, no qual estão contempladas empresas de transporte de cargas, Forças Armadas, e exploração e produção de petróleo, sobretudo no Brasil, com a descoberta do petróleo em águas profundas (pré-sal) e sua auto-suficiência em termos produtivos, se torna cada vez mais evidente a necessidade de elevadas disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos envolvidos nos processos. Desde o processo de extração nas plataformas de petróleo, até as refinarias e distribuidoras que o processam e realizam sua distribuição para os mercados consumidores, os equipamentos precisam operar com máxima confiabilidade e disponibilidade. Fazendo parte deste processo, existem ainda os equipamentos de suporte às plataformas de petróleo, sem os quais as operações de extração não seriam possíveis de ser efetuadas.

No caso das empresas de transporte de cargas e pessoas, a elevada disponibilidade e confiabilidade das embarcações são imprescindíveis para o cumprimento de prazos de entregas de produtos. Elevadas multas são aplicadas nos casos de atrasos de entregas, além dos altos custos de estadia nos portos para a realização de manutenções emergenciais. Em se tratando de transporte de pessoas, a falha em equipamentos em alto-mar poderá provocar conseqüências desastrosas, tanto para os passageiros, quanto para a empresa. A Figura 1.1 apresenta um motor diesel marítimo em fase de instalação em embarcação de transporte de cargas.



Figura 1.1 – Motor Diesel Marítimo em instalação de embarcação transoceânica

Fonte: <http://www.joseclaudio.eng.br>

A elevada confiabilidade dos equipamentos também é imprescindível para embarcações utilizadas pelas Forças Armadas (Marinha, Guarda Costeira, etc.), já que estas são responsáveis pela defesa de seus territórios e em muitas situações atuam como suporte a operações de auxílio humanitário e, nestes casos, falhas imprevistas poderão acarretar em grandes prejuízos financeiros, humanas e sociais.

Como se pode observar, o elevado nível de importância e criticidade dos equipamentos marítimos despertaram a necessidade da aplicação de conceitos de Engenharia de Confiabilidade e Manutenibilidade em seus equipamentos e processos, com o intuito de aumentar a confiabilidade e disponibilidade dos mesmos, e conseqüentemente reduzir seus custos diretos (manutenção, componentes, mão-de-obra, etc.) e indiretos (pagamentos de multas, indenizações, segurança, perdas de produção, etc.). Ao longo dos últimos anos, é possível observar a grande utilização de tecnologia de ponta no que diz respeito à manutenção preventiva e preditiva, assim como a utilização de técnicas de monitoramento dos equipamentos através da análise do lubrificante, manutenção centrada em confiabilidade, inspeções por videoscopia, análise de vibrações, inspeções sensitivas, entre outras, sendo estas técnicas aplicadas separadamente ou em conjunto, dependendo da situação.

Como exemplo da associação de técnicas preditivas no segmento marítimo, a técnica de monitoramento de condições por Análise de Lubrificantes é comumente associada à técnica de Videoscopia, com o objetivo de identificar a origem dos níveis anormais de desgaste evidenciados pela análise do lubrificante em uso nos motores diesel do sistema de propulsão principal. Através da inspeção do interior do motor por meio de uma câmera acoplada na extremidade de uma sonda, é possível evidenciar as causas dos níveis anormais de desgaste, o que auxiliará na tomada de decisão com relação à parada do equipamento para manutenção ou continuidade da operação, conforme apresentado por NOGUEIRA e CERBAM (2008).

Visando dar continuidade na exemplificação de estudos aplicados ao segmento marítimo, MOKASHI, WANG e VERMAR (2002) aplicaram os conceitos de Manutenção Centrada em Confiabilidade em operações marítimas, devido à criticidade dos equipamentos para o segmento, analisando os principais modos de falhas qualitativa e quantitativamente, aplicando ferramentas estatísticas para tal, e finalmente determinando as estratégias de manutenção visando o aumento da disponibilidade e confiabilidade dos sistemas analisados.

Seguindo a mesma linha de pesquisa, MILKIE e PERAKIS (2004) fizeram uso de dados de falhas de uma embarcação da Guarda Costeira norte-americana para a definição de estratégias de manutenção do sistema de propulsão principal da referida embarcação, aplicando os conceitos de Manutenção Centrada em Confiabilidade, com o objetivo final de aumentar a previsibilidade de falhas e a confiabilidade do sistema, devido ao elevado impacto que sua falha acarretava para a operação do órgão norte-americano. Para o atingimento deste objetivo, foi aplicada a distribuição de probabilidade de Weibull para a modelagem do comportamento das falhas em função da vida útil do sistema propulsor, e finalmente obter a otimização do período entre manutenções preventivas do equipamento.

Abordando ainda a aplicação dos conceitos de confiabilidade de motores diesel marítimos, BOCCHETTI e tal (2007) efetuaram a análise de confiabilidade de camisas de cilindros de motores diesel marítimos, estudando a influência dos principais modos de falha na confiabilidade de determinados motores, obtendo a probabilidade condicional de falha dos componentes e a vida útil residual dos mesmos, através da distribuição de Weibull.

A elaboração de estudos com a utilização de Engenharia de Confiabilidade no setor marítimo não está limitada somente a pesquisadores de fora do país. A Marinha do Brasil tem aplicado estes conceitos durante a determinação das características dos principais equipamentos a serem instalados a bordo de seus navios, de modo a atingir as metas de disponibilidade determinadas pelo setor operativo da instituição, utilizando técnicas de diagrama de blocos e Análise Crítica de Modos e Efeitos de Falhas (FMECA), conforme apresentado por CAMARGO e RIBEIRO (2010).

Diante do exposto acima, pode-se observar que a utilização da Engenharia de Confiabilidade aplicada à Manutenção em sistemas marítimos vem se desenvolvendo nos últimos anos, seguindo uma tendência clara de crescimento, sendo sua aplicação de extrema importância como fonte de informações para a tomada de decisão e viabilidade operacional e econômica dos processos envolvidos.

1.2 EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE PETRÓLEO *OFFSHORE*

De acordo com NETO e COSTA (2010), a indústria offshore mundial teve seu nascimento entre 1930 e 1950 na Venezuela e Golfo do México, respectivamente. No Brasil, já no final de 1950, devido às análises geográficas, havia o conhecimento de que o país possuía reservas de petróleo em profundidade marítima, ainda sem uma definição precisa dos locais. A confirmação ocorreu pela descoberta do primeiro poço offshore em 1968, no Campo de Guaricema (SE), e a primeira perfuração, também em 1968, na Bacia de Campos, no campo de Garoupa (RJ). O ano seguinte também foi marcado por mais descobertas, com o Campo de São Mateus (ES), e posteriormente no campo de Ubarana (ES), ambos na bacia de Potiguar. A partir destas primeiras descobertas, a Petrobras deu início a uma série de outras. Entretanto, tais descobrimentos não surtiram maior efeito, pelo fato das tecnologias existentes não serem condizentes com a realidade brasileira.

Conforme abordado por SILVEIRA (2002), nesses anos de atividades *offshore*, a produção de petróleo no mar tornou-se vital para o Brasil, passando a responder por cerca de 80% do total produzido no país no início de 1999. Já em 2008, a produção offshore passou a corresponder a 90% do volume produzido pelo país, conforme informações obtidas junto a Petrobrás.

Apesar de todo o crescimento ocorrido nas últimas décadas, a auto-suficiência na produção de petróleo, conquistada em 2006, corre o risco de sucumbir ao crescimento do consumo de combustíveis no País. Segundo dados da Agência Nacional do Petróleo (ANP), o Brasil importou mais petróleo e derivados do que exportou nos quatro primeiros meses de 2008, conforme PORTAL BRASIL (2010).

O País nunca deixou de comprar óleos mais leves, devido à qualidade do petróleo extraído no país e da tecnologia disponível nas refinarias. Em 2007, o consumo de combustíveis cresceu 5,8%, mais que o dobro dos 2,4% projetados pela Petrobrás no ano da "independência", segundo o discurso do presidente Luiz Inácio Lula da Silva na festa da conquista.

Atualmente, de acordo com informações obtidas no site VALOR ECONÔMICO (2010), a Petrobras, lançou um projeto de US\$ 174 bilhões em cinco anos para o fornecimento de plataformas, sondas, navios de apoio e sistemas de perfuração para desenvolver dezenas de bilhões de barris de petróleo. Autoridades em energia projetam que o Brasil – que há cinco anos ainda era um importador de petróleo - terá, na próxima década, uma das maiores reservas mundiais de petróleo.

Com as reservas de pré-sal, o Brasil deve consolidar sua auto-suficiência no combustível fóssil, além de conseguir reservas estratégicas do produto. Ainda não há um tamanho preciso do reservatório, que fica entre o litoral de Santa Catarina e Espírito Santo. Mas, segundo estimativas da Petrobras a produção atual de 14,4 bilhões de barris de petróleo subirá para 70 a 107 bilhões nos próximos anos.

É possível observar, diante do exposto acima, que a elevada disponibilidade e confiabilidade do processo de extração e produção de petróleo são imprescindíveis para que se consiga atingir as estimativas de produção. A demanda por produtividade exigirá cada vez mais dos equipamentos envolvidos no processo, e eventuais paradas não planejadas por problemas de manutenção acarretarão em grandes perdas de produção de petróleo, afetando diretamente os resultados do país.

De maneira geral, conforme colocado por NETO e COSTA (2010), pode-se sintetizar todo o processo de extração de Petróleo em três conjuntos tecnológicos distintos, as plataformas, o sistema de perfuração e o mecanismo de transmissão do petróleo da profundidade para a plataforma. Abordando especificamente o processo de extração de petróleo pelas plataformas, se podem destacar as embarcações supridoras de plataformas, mais comumente chamadas de embarcações PSV (*Platform Supply Vessel*), que são responsáveis pelo transporte de equipamentos, insumos para perfuração, tubos, alimentos, cimento, dentre outros materiais, no trajeto entre a plataforma *offshore* e a base de operação. A Figura 1.2 apresenta a plataforma P-52 da Petrobrás em operação na Bacia de Campos.



Figura 1.2 – Plataforma P-52 em operação na Bacia de Campos - Fonte:
<http://www.petrobras.com.br>

1.3 OBJETIVOS

Considerando o cenário exposto acima, este trabalho tem como objetivo geral realizar a análise de Confiabilidade de Motores Diesel de Propulsão Principal de embarcações de apoio a plataformas de petróleo (embarcações PSV), utilizando os resultados das análises dos lubrificantes em utilização nos referidos motores, de modo a determinar o comportamento dos níveis de desgaste em função do tempo de operação e da concepção do motor.

Para tal análise, serão utilizados conceitos de manutenção preditiva associados a análises probabilísticas baseadas nos resultados dos níveis de metais encontrados nos lubrificantes operantes nos motores através da análise de Espectrometria por Plasma, técnica amplamente utilizada por empresas que prestam serviços de análise de lubrificantes usados.

Para contribuir na concepção do objetivo geral da pesquisa, foram determinados os seguintes objetivos específicos:

- Análise do comportamento de falha de componentes dos motores, em função do tempo e da concepção construtiva dos mesmos (motores dois-tempos e quatro-tempos), através da modelagem utilizando as distribuições de valores extremos de Weibull;
- Determinação do comportamento de falhas dos motores a partir dos dados de seus componentes, utilizando a técnica de Diagrama de Blocos;
- Determinação, para um dado nível de confiabilidade requerida, dos intervalos adequados para manutenção preventiva em cada modelo de motor diesel;
- Definição de estratégias de manutenção em função dos resultados obtidos, visando o aumento da confiabilidade e redução de custos;
- Definição da melhor concepção de motor em função dos níveis tecnológicos dos departamentos de manutenção das entidades.

Para atingir os objetivos expostos acima, este trabalho abordará no capítulo 2 a metodologia relativa a manutenção de motores diesel, monitoramento de condições através da análise de lubrificantes usados, conceitos de manutenibilidade, disponibilidade e confiabilidade, descrevendo-as durante a determinação da metodologia de análise aplicada.

Após a apresentação da metodologia aplicada e revisão bibliográfica, o trabalho apresentará no Capítulo 3 os resultados alcançados a partir do modelo de abordagem proposto, tanto para os componentes individuais dos motores, através das distribuições de Weibull, quanto para os sistemas compostos, utilizando a técnica de Diagrama de Blocos, para ambas as concepções de motores analisadas.

A seguir, no Capítulo 4, será realizada uma análise comparativa dos

equipamentos em termos de disponibilidade, confiabilidade e vida útil dos mesmos, correspondente a discussão dos resultados.

Por fim, serão abordadas no Capítulo 5 as conclusões do estudo, a partir dos resultados alcançados, determinando, em função de cada concepção de motor, as estratégias de atuação mais adequadas sob o ponto de vista de manutenção, assim como a determinação da melhor concepção de motor em função dos níveis tecnológicos dos usuários finais dos equipamentos.

Posteriormente, serão apresentadas nos capítulos 6 e 7, respectivamente, as referências bibliográficas utilizadas na elaboração do trabalho e os anexos contendo alguns dos dados utilizados na análise e as fichas técnicas dos lubrificantes utilizados em cada concepção de motor.

2. METODOLOGIA

2.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta pesquisa pode ser classificada segundo sua natureza como pesquisa aplicada, que, segundo GOBBO (2008), objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática e dirigida a solução de problema específico. Sob o ponto de vista de seus objetivos, esta pesquisa apresenta caráter exploratório, que, de acordo com GOBBO (2008), proporciona maior familiaridade com o problema em estudo.

A classificação metodológica relativa a procedimentos técnicos aplicada neste trabalho aborda fundamentalmente estudos de caso, a utilização de dados reais como fonte de informações para a análise do problema. Sob o ponto de vista do método de abordagem do problema, pode-se dizer que esta pesquisa apresenta caráter quantitativo, devido ao fato das conclusões serem obtidas através de análise estatística de dados.

2.2 POPULAÇÃO E AMOSTRA

Para a realização do presente estudo, se utilizaram como população os resultados de 393 diagnósticos de amostras de óleo lubrificante em uso em duas concepções de motores de combustão interna ciclo diesel: ciclos dois-tempos (8 motores pertencentes a 5 embarcações) e quatro-tempos (10 motores pertencentes a 5 embarcações), operantes em embarcações PSV, referentes ao período de outubro de 2004 a março de 2010, obtidas através da aplicação da técnica preditiva de monitoramento de equipamentos através da análise de óleos usados.

Foram extraídos de cada amostra as quantidades dos elementos metálicos em PPM (partes por milhão), medidas através do ensaio de Espectrometria por Plasma, de acordo com a norma ASTM D 5185, comparando-as com os limites de desgaste toleráveis para cada elemento metálico pertencente aos componentes dos motores, registrando, para cada amostra, os tempos de vida correspondentes e indicando a localização do desgaste da seguinte forma:

Parte Alta: presença de Ferro (cilindro), Cromo (anéis de seguimento) ou Alumínio (pistão).

Parte Baixa: presença de Cobre, chumbo ou estanho (casquilhos).

Além disso, a população foi subdividida em 2 sub-populações, cada uma correspondendo a uma concepção específica de motor. Maiores detalhes referentes a divisão dos motores serão apresentados na seção 2.7.5.

Foram considerados como dados em suspensão as amostras cujas quantidades de metais eram inferiores aos limites toleráveis, e como falhas aqueles resultados que se encontram acima dos referidos limites. Além disso, os modos de falhas Parte Alta e Parte Baixa são considerados independentes entre si, por se tratar da detecção das mesmas em sua fase inicial.

Visando garantir a correta comparação e acuracidade dos resultados, os dados analisados foram obtidos a partir de uma única empresa do segmento, estando os motores da população expostos a condições semelhantes de operação e sujeitos às mesmas tecnologias e estratégias de manutenção.

Além disso, os lubrificantes utilizados em cada motor apresentam alto desempenho e são especificamente desenvolvidos para cada concepção de motor, estando estes no mesmo nível de proteção para os equipamentos e, portanto, não influenciaram significativamente nos resultados de vida dos motores.

Outro aspecto que deve ser considerado é que os motores em estudo apresentam dimensões e potências próximas, diferindo principalmente na concepção de funcionamento.

2.3 ANÁLISE DOS DADOS

A análise dos dados foi realizada utilizando os softwares Reliasoft Weibull ++ versão 7 para a determinação dos parâmetros de Estimação das distribuições e seus correspondentes testes de comparação, assim como para a determinação e elaboração dos gráficos apresentados na análise.

Para a análise dos sistemas e de seus respectivos resultados, se fez uso do software BlockSim versão 6.5, o qual permite a utilização dos resultados obtidos com o Weibull ++ em seus cálculos e simulações.

Ambos os softwares são versões comerciais, desenvolvidos pela empresa Reliasoft, e apresentam boa reputação nos mercados nacional e internacional.

2.4 OS EQUIPAMENTOS

As embarcações tipo PSV devem possuir alta capacidade de manobra e dimensões que permitam o suprimento das unidades de produção de petróleo. Para atingir este objetivo, estes tipos de equipamento possuem lemes e hélices independentes, sendo estas acionadas por motores independentes, geralmente denominados Motor de Combustão Principal Boreste (MCP BE) e Motor de Combustão Principal Bombordo (MCP BB). Esta disposição permite maior mobilidade da embarcação, tanto em deslocamento, quanto em aproximação para descarga.

Outros recursos para melhorar a mobilidade destas embarcações foram inseridos, conforme citado por SILVEIRA (2002), tais como impelidores laterais de popa (*Stern Thruster*) e de Proa (*Bow Thruster*), porém estes são considerados como motores auxiliares, e não apresentam o mesmo nível de criticidade para as embarcações, comparativamente aos motores de combustão principais. A Figura 2.1 apresenta uma embarcação do tipo PSV em deslocamento e aproximação a uma plataforma de petróleo.



Figura 2.1 – Embarcação Supridora em aproximação à Plataforma de Petróleo - Fonte: www.nyt.com

É importante ressaltar que, apesar da embarcação apresentar dois motores de acionamento independentes, a falha de um destes motores levará a total perda de capacidade da embarcação de executar sua função.

2.5 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Os motores de combustão interna são classificados de acordo com o modo de queima do combustível, em motores com ignição por centelha (ciclo otto) e motores com ignição por compressão ou motores diesel (ciclo diesel).

Motores movidos a gasolina ou a álcool são exemplos de motores com ignição por centelha. Neste caso, a queima de combustível é iniciada com uma centelha fornecida pela vela de ignição, que é um componente instalado na superfície superior do cilindro, na parte chamada cabeçote. Motores diesel normalmente utilizam o óleo diesel como combustível. Nestes motores a ignição é iniciada pela injeção de combustível no cilindro através de bicos injetores. A combustão em motores diesel se dá de maneira espontânea, estimulada por elevadas pressão e temperatura da mistura ar/combustível no cilindro.

Os motores também podem ser classificados como de quatro tempos ou dois tempos. Durante seu funcionamento, um motor continuamente admite uma quantidade de ar e combustível, comprime e queima a mistura e a deixa expandir antes de expulsá-la do cilindro. Quando este ciclo é feito ao tempo em que o pistão executa quatro movimentos, dois para cima e dois para baixo, o motor é chamado de quatro tempos. Quando o pistão realiza somente dois movimentos durante o ciclo, um para cima e um para baixo, o motor é chamado de dois tempos.

2.5.1 Princípios de Funcionamento

De acordo com BRAIN (2010), a grande diferença entre motores de dois-tempos e quatro-tempos é a quantidade de potência que eles podem produzir. Os motores diesel dois-tempos comprimem inicialmente apenas o ar e injetam o combustível diretamente no ar comprimido, o que permite a esta concepção de motor trabalhar com potências superiores em comparação aos motores quatro-tempos de mesmas dimensões.

2.5.1.1 Motores Diesel Dois-tempos Marítimos

Na parte superior do cilindro estão posicionadas as válvulas de escapamento, que abrem ao mesmo tempo, além do injetor de diesel. O pistão possui forma alongada, permitindo sua atuação como válvula da entrada. O pistão, ao chegar ao final de seu curso, descobre as janelas para a admissão de ar. O ar de admissão é pressurizado por meio de turbocompressor de ar.

A figura 2.2 apresenta a disposição de um típico motor diesel dois-tempos, segundo BRAIN (2010).

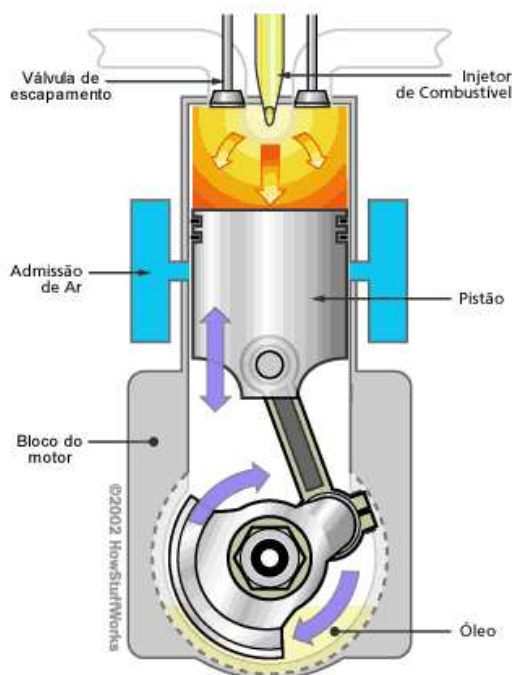


Figura 2.2 – Funcionamento de motor diesel dois-tempos - Fonte:
<http://carros.hsw.uol.com.br>

Quando o pistão está no alto de seu curso, o cilindro contém uma carga de ar altamente comprimida. Neste momento, o combustível diesel é pulverizado no cilindro pelo injetor e inflama-se imediatamente, devido ao calor e à pressão dentro do cilindro. A pressão criada pela combustão do combustível empurra o pistão para baixo.

Quando o pistão se aproxima do fim de seu curso inferior, todas as válvulas de escape se abrem. Os gases queimados são expelidos rapidamente do cilindro, aliviando a pressão.

Quando o pistão chega ao final do seu curso, descobre as janelas de admissão de ar. O ar pressurizado enche o cilindro, forçando para fora o restante dos gases queimados.

As válvulas de escape se fecham e o pistão começa a voltar a subir, fechando as janelas de admissão e comprimindo a carga de ar admitido, e o ciclo se repete quando o pistão se aproxima do topo do cilindro.

2.5.1.2 Motores Diesel Quatro-tempos Marítimos

O ciclo inicia-se com o êmbolo no Ponto Morto Superior (PMS). A válvula de admissão está aberta e o êmbolo, ao descer, aspira o ar para dentro do cilindro.

O êmbolo atinge o Ponto Morto Inferior (PMI) e inicia-se então a compressão. A temperatura do ar dentro do cilindro aumenta substancialmente devido à diminuição do volume.

Pouco antes do PMS o combustível começa a ser pulverizado pelo injetor de combustível, misturando-se com o ar quente até que se dá a combustão. A combustão é controlada pela taxa de injeção de combustível. O combustível começa a ser injetado um pouco antes do PMS devido ao fato de atingir a quantidade suficiente para uma perfeita adequada e, conseqüentemente, uma boa combustão.

A expansão começa após o PMS do êmbolo com a mistura (ar + combustível) na proporção certa para a combustão espontânea, onde o combustível continua a ser pulverizado até momentos antes do PMI.

O ciclo termina com a fase de escape, onde o embolo retorna ao PMS, o que faz com que os gases de combustão sejam expulsos do cilindro, retomando assim o ciclo. A Figura 2.3 apresenta o ciclo em suas quatro etapas.

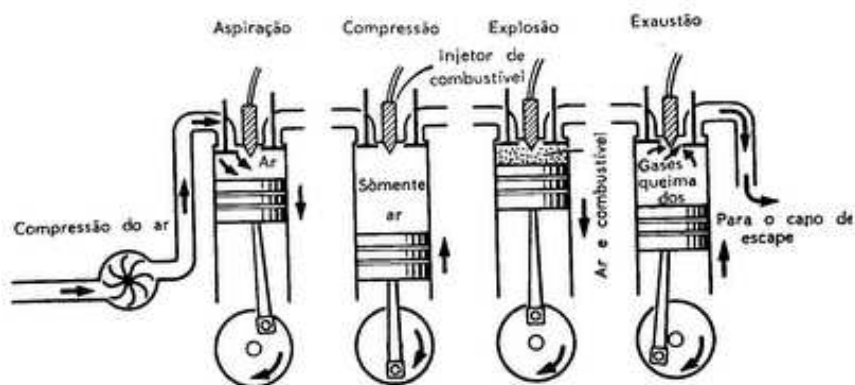


Figura 2.3 – Funcionamento de motor diesel quatro-tempos - Fonte:

<http://carros.hsw.uol.com.br>

Visando manter a uniformidade das condições de contorno do problema, foram escolhidos para análise basicamente dois modelos de motores de combustão principal, sendo suas especificações técnicas apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Principais Especificações Técnicas dos Motores de Combustão Principal

Especificações Técnicas	Caterpillar MAK 9M-20	General Motors EMD 16 645E7
Combustível	Diesel Marítimo	Diesel Marítimo
Concepção	Diesel quatro-tempos	Diesel dois-tempos
Potência nominal (HP)	2330	2850
Rotação nominal (RPM)	1000	900
Nº de Pistões	16	16
Diâmetro do cilindro (mm)	300	230
Curso do Cilindro (mm)	300	254

É possível observar que o motor Caterpillar (quatro-tempos) apresenta dimensões sensivelmente maiores que o General Motors (dois-tempos), porém, devido a sua concepção de funcionamento, este último apresenta potência superior, o que comprova que os motores dois-tempos atingem potências maiores que os motores quatro-tempos, quando comparados motores com dimensões semelhantes.

2.6 ANÁLISE DE LUBRIFICANTES E ESPECTROMETRIA

O monitoramento de equipamentos através da análise de lubrificantes usados é uma técnica de manutenção preditiva amplamente utilizada no segmento marítimo e industrial, e visa à detecção precoce de falhas dos equipamentos, permitindo a maximização da utilização dos mesmos, reduzindo despesas de manutenção.

O método compreende na coleta periódica de amostras do lubrificante em uso nos equipamentos e análise do mesmo e, através de alguns ensaios de laboratório, é possível identificar as seguintes anormalidades:

- Contaminação externa (água doce ou salgada, poeira, particulado, etc.);
- Contaminação por outros produtos ou lubrificantes;

- Níveis de desgaste dos componentes dos equipamentos através de seus elementos metálicos;
- Estado de degradação do lubrificante, determinando o momento para a sua substituição;

Especificamente, no caso de motores diesel, é possível determinar também as condições de queima através da formação de fuligem e também a contaminação do lubrificante por combustível.

A Figura 2.4 apresenta um exemplo de laudo de análise de lubrificante usado.

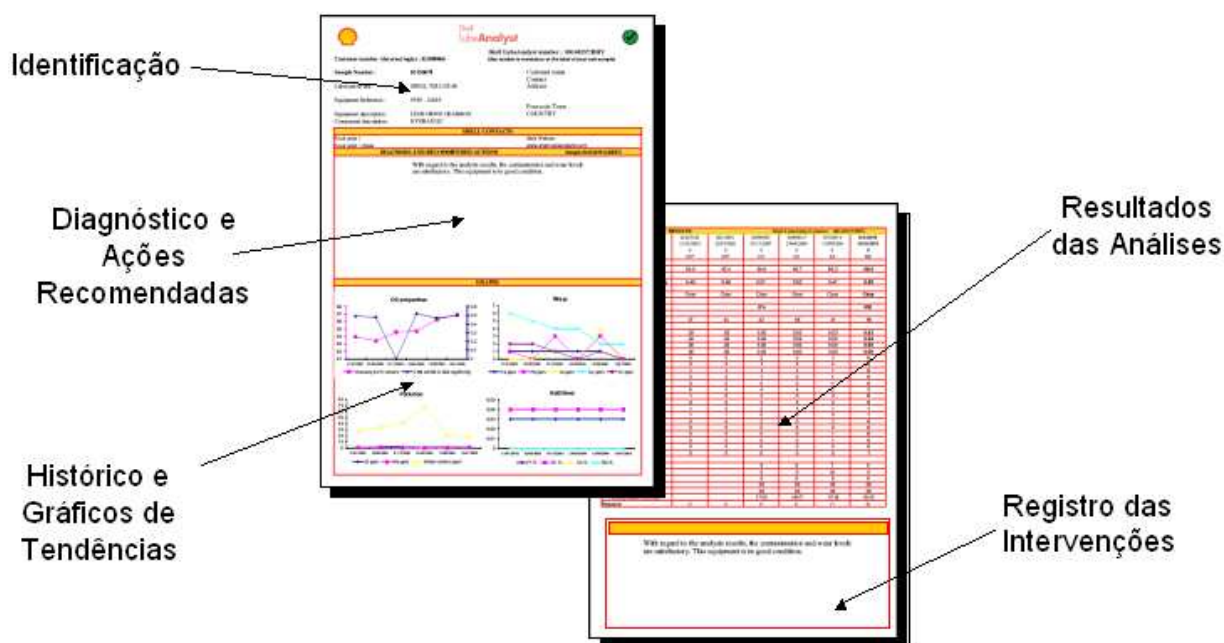


Figura 2.4 – Exemplo de Laudo de Análise de lubrificante usado

No que tange ao acompanhamento dos níveis de desgaste dos equipamentos, geralmente o ensaio utilizado é a Espectrometria por Plasma, através do qual é possível identificar as quantidades dos elementos metálicos existentes no lubrificante em ppm (partes por milhão) e, conseqüentemente, vincular sua presença aos materiais que pertencem às constituições dos componentes do equipamento monitorado.

De acordo com SHELL (2008), cada elemento químico possui sua própria característica de emissão ou absorção de energia eletromagnética, sendo a intensidade da emissão ou absorção proporcional a sua concentração no lubrificante. Dessa forma, por meio de comparações com amostras de concentrações conhecidas é possível realizar cálculos quantitativos. A Figura 2.5 apresenta um exemplo de equipamento responsável pelo ensaio de Espectrometria por Plasma.



Figura 2.5 – Equipamento utilizado para realizar Espectrometria por Plasma

Os ensaios de Espectrometria por Plasma, por necessidades de padronização, seguem a norma ASTM D 5185, a qual estabelece os níveis de repetibilidade e reprodutibilidade do método de ensaio, além de apresentar as margens máximas de erros.

2.7 COMPONENTES E PARÂMETROS DE MONITORAMENTO

Os motores de combustão interna, tanto marítimos quanto veiculares, apresentam algumas características particulares e de extrema importância para a investigação de falhas por desgaste de componentes através da análise do lubrificante. Os principais componentes sujeitos a desgaste nestes motores estão sendo apresentados na Figura 2.6.



Figura 2.6 – Principais componentes de motores sujeitos a desgaste evidenciado pela análise do lubrificante

2.7.1 Pistões

Os pistões são componentes responsáveis pelo recebimento da potência oriunda da queima na câmara de combustão, transmitindo a energia em forma de movimento para o eixo virabrequim através das bielas. Os pistões são fabricados utilizando ligas de Alumínio e, em casos de motores com problemas de combustão, podem sofrer aquecimentos localizados que poderão levar a trincas em sua face superior.

A presença de Alumínio nas análises de lubrificantes sugere a ocorrência de desgaste nestes componentes.

2.7.2 Cilindro ou Camisa

São componentes nos quais ocorre o movimento do pistão no interior do motor, e é o local onde ocorre a transferência de energia da combustão em movimento no pistão. As camisas geralmente são inseridas nos blocos dos motores como luvas e, devido ao fato de serem produzidas em aço, possuem como principal elemento químico detectável através das análises de lubrificantes o Ferro.

2.7.3 Anéis de Segmento

São fixados em ranhuras feitas nos pistões e geralmente são inseridos três anéis por pistão. Os dois anéis superiores têm a incumbência de evitar perdas da potência gerada na combustão e impedir a passagem da mistura ar-combustível para o cárter através do espaçamento entre o pistão e o cilindro. O terceiro anel tem a tarefa de selar a passagem de óleo do cárter para a câmara de combustão.

Os anéis apresentam uma separação que permite sua montagem no pistão e lhes dá uma tendência a se abrirem, pressionando-os contra a parede do cilindro e melhorando a vedação. Geralmente estes componentes são fabricados de Aços ao Cromo e, devido a este fator, a presença de Ferro e Cromo nas análises dos lubrificantes indica a presença de desgaste nos anéis.

2.7.4 Biela

Componente que transmite o movimento do pistão e a potência gerada pela combustão ao eixo de manivelas durante a expansão. A biela também transmite movimento ao pistão durante os processos de exaustão, admissão e compressão. A biela consiste de uma haste com dois furos nos extremos. É conectada ao pistão através de um pino que passa através do furo menor. O furo maior é constituído por um mancal fixado por parafusos, que envolve um dos pinos excêntricos do eixo de manivelas. No interior do furo maior da Biela estão dispostas as chamadas Bronzinas ou Casquilhos, componentes que atuam como bucha de deslizamento entre a biela e o eixo virabrequim, reduzindo o atrito mecânico entre os mesmos.

Devido a serem produzidas com ligas de cobre, chumbo e estanho, são componentes de sacrifício (já que a biela e o eixo virabrequim em geral são constituídos de aço), e a presença destes elementos metálicos no lubrificante em uso indica o desgaste do componente.

2.7.5 Classificação dos Componentes – Parte Alta e Parte Baixa

Diante do exposto anteriormente, para fins de simplificação, a análise de lubrificantes considera o motor de combustão interna dividido em duas partes principais: a “Parte Alta” e a “Parte Baixa” do motor, tendo como limite o anel de segmento responsável pela selagem do lubrificante na camisa. Considerando este aspecto, a Parte Alta do motor considera Cilindro, Pistões, válvulas e anéis de segmento (incluindo o anel de vedação do óleo), e a Parte Baixa do motor engloba Biela, Eixo Virabrequim, Cárter e Casquilhos.

É importante ressaltar que para cada um dos metais acima mencionados, existem limites toleráveis para a presença dos mesmos no lubrificante, de modo que, para fins de análise, estão sendo consideradas como falha a ocorrência de níveis de desgaste acima destes limites, para cada um dos elementos metálicos citados. Por isso, a partir de então, os níveis de desgastes dos motores em estudo serão classificados como desgaste na Parte Alta ou Parte Baixa do motor, e não especificamente dos componentes mecânicos, para fins de simplificação do tratamento dos dados.

2.8 CONCEITOS DE CONFIABILIDADE E MANTENABILIDADE

Segundo RELIASOFT (2006 b), a distribuição de Weibull é uma das distribuições mais utilizadas na Engenharia de Confiabilidade. Devido a sua capacidade de mudar de forma dependendo da variação do parâmetro β pode modelar uma grande variedade de dados de vida de componentes mecânicos. A função densidade acumulada de Weibull é definida por

$$P(T \leq T_0) = F(T) = 1 - e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.1)$$

onde β é o parâmetro de forma, γ o parâmetro de localização, η o parâmetro de escala e T o tempo em horas de operação.

Derivando a função $F(T)$ em relação ao tempo é possível determinar a Função Densidade de Probabilidades $f(T)$

$$f(T) = \frac{dF(T)}{dT} \quad (2.2)$$

obtendo como resultado da derivação da equação (2.2) a expressão

$$f(T) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (2.3)$$

A Figura 2.7 apresenta as variações de forma da função densidade de probabilidades de Weibull.

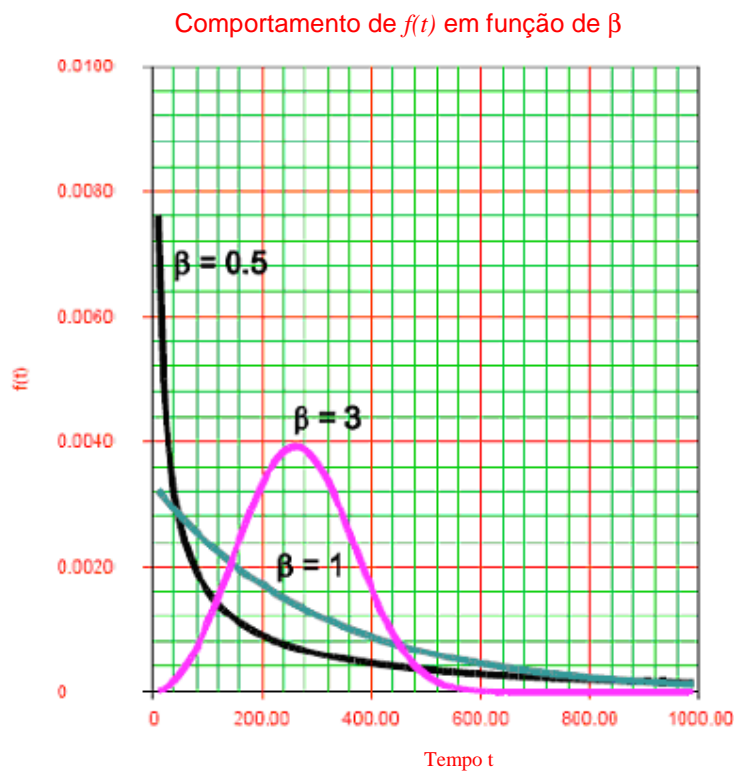


Figura 2.7 – Distribuição de Weibull e suas variações de forma

A Função Confiabilidade de Weibull $R(T)$ é definida através da equação

$$R(T) = e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (2.4)$$

A Probabilidade de Falha $P(T)$ definida em função da confiabilidade $R(T)$, conforme apresentado na equação.

$$P(T) = 1 - R(T) = 1 - e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.5)$$

Com base nas definições acima, pode-se introduzir o conceito de taxa de falhas $\lambda(T)$, definida por

$$\lambda(T) = \frac{f(T)}{R(T)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (2.6)$$

E o tempo médio entre falhas (MTBF), que corresponde ao inverso da taxa de falhas, e pode ser determinado pela expressão

$$MTBF = \frac{1}{\lambda(T)} \quad (2.7)$$

O MTBF representa o período de tempo no qual metade dos componentes com taxa de falhas $\lambda(T)$ apresentará falha.

A Figura 2.8 apresenta alguns comportamentos das funções taxa de falhas $\lambda(T)$ em função do tempo para a distribuição de Weibull, em função dos parâmetros β , γ e

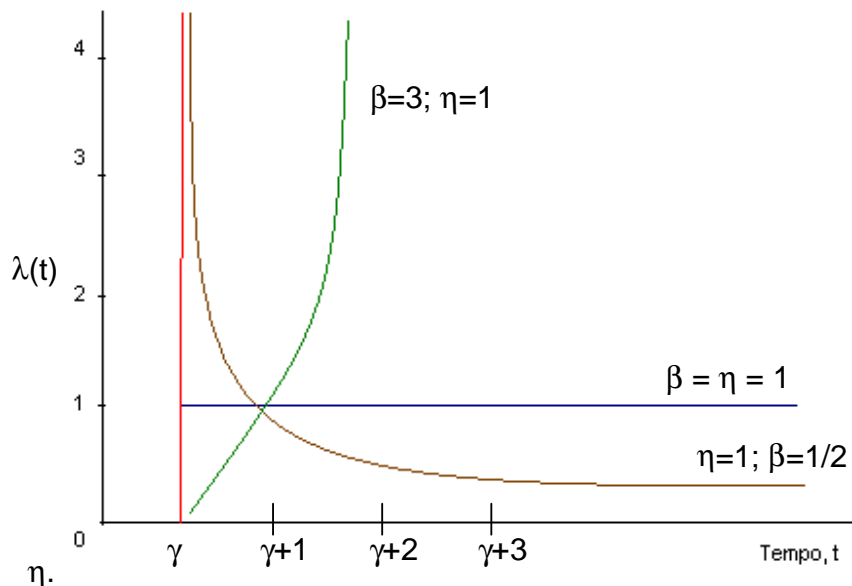


Figura 2.8 – Taxas de Falhas da distribuição de Weibull

É possível observar através da Figura 2.8 que, em função do parâmetro de forma das distribuições, o comportamento da taxa de falhas se altera.

A Tabela 2.2 apresenta alguns casos particulares para o comportamento da taxa de falhas e do parâmetro de forma para a distribuição de Weibull.

Tabela 2.2 – Distribuições e tipos de falhas em função do parâmetro de forma

<i>Parâmetro de forma β</i>	<i>Comportamento da Distribuição</i>	<i>$\lambda(T)$</i>
1,0	Exponencial	Constante
1,0 a 2,5	Aprox. Lognormal	Crescente
2,5 a 3,0	Aprox. Normal	Crescente
>3,0	Weibull com pouca variabilidade	Crescente
<1,0	Semelhante a exponencial	Prematura

Através dos conceitos expostos acima, é possível identificar a fase em que os equipamentos e seus componentes se encontram em termos de sua vida útil, conforme exposto por LAFRAIA (2001), através do comportamento da taxa de falhas e do parâmetro da distribuição de Weibull. As fases de vida apresentam características distintas, e estão apresentadas a seguir.

- *Falhas Prematuras ou Mortalidade Infantil (wear-in)*: falhas decorrentes ainda devido a problemas de projeto e partida do equipamento. Nesta fase, a taxa de falhas do equipamento é decrescente.
- *Período de Vida Útil*: apresenta taxa de falhas constante, e corresponde ao período em que o equipamento apresenta apenas falhas aleatórias devido a problemas operacionais, falha humana, etc. Nesta fase, o comportamento das falhas também poderá ser modelado pela distribuição exponencial.
- *Período de Final de Vida Útil (wear-out)*: último estágio de comportamento da vida útil do equipamento, o qual apresenta taxa de falhas crescente, indicando o período de obsolescência do equipamento, sendo necessária intervenção para recuperação do mesmo e aumento de sua confiabilidade.

Estas 3 fases formam uma curva muito utilizada na manutenção, denominada “Curva da Banheira”, apresentada na Figura 2.9, conforme apresentado por ALADON (1999).

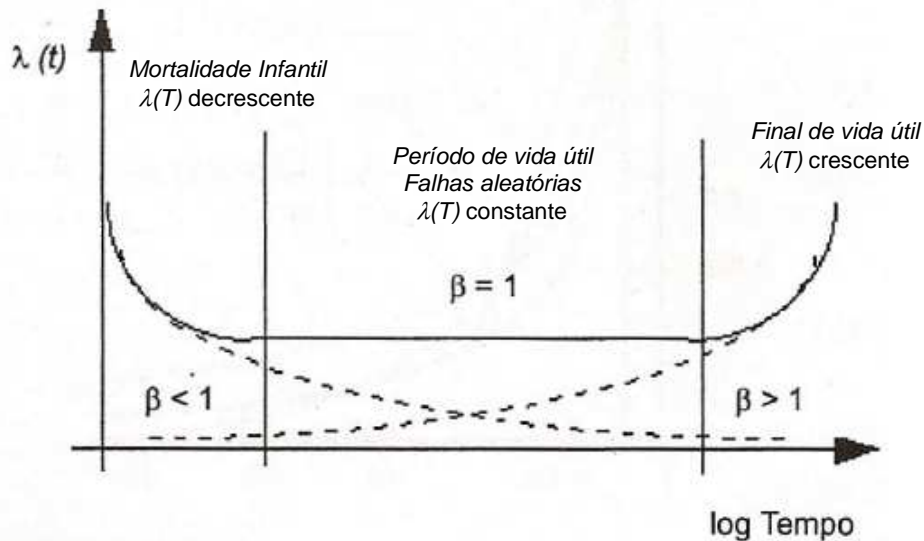


Figura 2.9 – Curva da Banheira - Fonte: ALADON (1999)

2.9 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ESTIMAÇÃO

Existem situações em que o comportamento de falha dos componentes é descrito por determinada distribuição (Distribuição de Weibull neste caso), porém os parâmetros da distribuição são desconhecidos. Um dos métodos que apresenta estimadores de qualidade é o Método de Máxima Verossimilhança (MLE ou MMV).

Segundo RELIASOFT (2006 b), seja x uma variável aleatória contínua com função densidade de probabilidade dada pela expressão

$$f(x; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) \quad (2.8)$$

onde $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$ são parâmetros a serem estimados, para R observações independentes x_1, x_2, \dots, x_R que correspondem aos tempos de falha dos equipamentos. A função de verossimilhança é dada por

$$L(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k | x_1, x_2, \dots, x_R) = L = \prod_{i=1}^R f(x_i; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) \quad (2.9)$$

$$i=1, 2, \dots, R$$

O Logaritmo Neperiano da função verossimilhança é dado por

$$\Lambda = \ln L = \sum_{i=1}^R \ln f(x_i; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) \quad (2.10)$$

Os estimadores de máxima verossimilhança de $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$ são obtidos através da maximização de L ou Λ . Para maximizar Λ , que é mais facilmente realizado que L , os estimadores de máxima verossimilhança de $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$ são as soluções de k equações:

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial \theta_j} = 0, \text{ para } j=1, 2, \dots, k \quad (2.11)$$

2.9.1 Intervalos de Confiança dos Parâmetros de Estimação

De acordo com RELIASOFT (2006 b), a metodologia adotada para a determinação de intervalos de confiança quando se está analisando dados em suspensão é chamado de Matriz de Fischer.

Os parâmetros estimadores de máxima verossimilhança seguem assintoticamente a distribuição Normal. Portanto, se $\hat{\theta}$ é estimador de máxima verossimilhança de θ e admitindo a consideração acima, para um intervalo de confiança δ os intervalos de confiança unilateral podem ser determinados através das equações a seguir.

$$\theta_s = \hat{\theta} e^{\frac{k_1 - \delta \sqrt{\text{var}(\hat{\theta})}}{\hat{\theta}}} \quad (2.12)$$

$$\theta_i = \frac{\hat{\theta}}{e^{\frac{k_1 - \delta \sqrt{\text{var}(\hat{\theta})}}{\hat{\theta}}}} \quad (2.13)$$

onde k_I representa uma constante de integração obtida no processo de normalização na determinação das equações dos parâmetros estimadores e θ_i e θ_s são respectivamente os limites inferior e superior do intervalo de confiança.

Os parâmetros das distribuições em estudo, assim como os intervalos de confiança, foram obtidos através do software Reliasoft Weibull ++, através de métodos iterativos de cálculo na obtenção das estimativas de máxima verossimilhança e Matriz de Fischer, considerando que os dados de falhas se comportam segundo a distribuição de probabilidades de Weibull.

2.10 COMPETIÇÃO DE MODOS DE FALHAS

De acordo com RELIASOFT (2006 b), um determinado equipamento irá falhar devido a mais de um modo de falha. Os modos de falha “competem” quanto ao que motiva a falha de cada componente em particular.

Para dar início à análise do conjunto de dados com mais de um modo de falha, como é o caso do presente estudo, onde se está analisando basicamente dois modos de falhas – níveis de desgaste na “parte alta” e na “parte baixa” do motor, deve-se inicialmente realizar a análise de cada modo de falha. Nesta análise, os tempos de falhas para todos os outros modos de falhas (com exceção do modo de falha em estudo) devem ser considerados como suspensões.

Uma vez terminada cada uma das análises para cada modo de falha, o resultado da equação de confiabilidade para todos os modos é o produto da equação de confiabilidade de cada um dos modos, e pode ser representado pelo Método de Diagrama de Blocos, através de um sistema em série, o qual está sendo apresentado a seguir.

2.10.1 Método de Diagrama de Blocos – Confiabilidade de Sistemas

O método de diagrama de blocos é utilizado na determinação e análise de confiabilidade de sistemas compostos por vários componentes isolados.

Considerando que a abordagem de pesquisa que está sendo realizada, através de dois componentes para cada tipo de motor, ou seja, Parte Alta e Parte Baixa, e que, a eventual falha de um destes componentes implicará na falha do sistema, a modelagem do sistema Motor Diesel será representada através de um sistema em série, conforme apresentado na Figura 2.10.

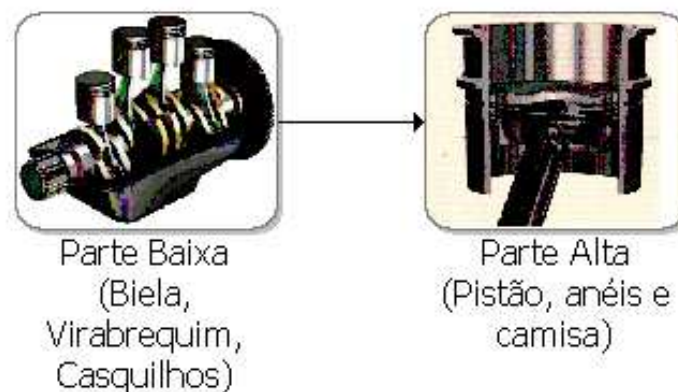


Figura 2.10 – Diagrama de Blocos dos Motores Diesel – Parte Alta e Parte Baixa em série

Considerando dois componentes em série, com respectivas confiabilidades $R_{pb}(T)$ e $R_{pa}(T)$, a confiabilidade do motor, ou seja, a probabilidade de que ambos os componentes sobrevivam há um tempo T é determinado pela expressão

$$R_{motor}(T) = R_{pa}(T) R_{pb}(T) \quad (2.14)$$

onde $R_{motor}(T)$ representa a confiabilidade do motor para o tempo T , $R_{pa}(T)$ a confiabilidade da Parte Alta do motor e $R_{pb}(T)$ a confiabilidade da Parte Baixa do motor.

2.10.2 Testes de Comparação

De acordo com RELIASOFT (2006 b), vários métodos comparativos estão disponíveis na literatura, tanto para dados completos (ou dados de falha dos

componentes), quanto para dados censurados ou em suspensão (dados de componentes que não apresentaram falha até o período em análise), situação esta em que se torna mais difícil a análise, assim como a comparação de modos de falhas que apresentam distribuições de probabilidade diferentes.

No estudo em questão se pretende determinar através de testes de comparação a existência de diferenças significativas entre as populações sob análise, sendo que estas apresentam dados censurados.

Diante disso, a determinação da probabilidade dos tempos de falha de uma população ser melhor do que de outra será realizada utilizando o modelo proposto por Brown e Rutenmiller, através da equação

$$P[t_2 \geq t_1] = \int_0^{\infty} f_1(t) R_2(t) \cdot dt \quad (2.15)$$

onde $P[t_2 \geq t_1]$ representa a probabilidade dos tempos de falhas t_2 serem melhor do que de os tempos de falhas t_1 , $f_1(t)$ a função densidade de probabilidade da primeira distribuição e $R_2(t)$ a função de confiabilidade da segunda distribuição.

A avaliação de superioridade de uma população em relação à outra está baseada no resultado da integral. Se o resultado do cálculo da probabilidade resultar em 0.5 pode-se concluir que as duas distribuições são estatisticamente idênticas.

Se o objetivo final fosse, por exemplo, determinar dentre duas populações, qual é a mais confiável para um determinado tempo t , bastaria calcular as confiabilidades de ambas as populações, e a melhor seria a que obtivesse o maior resultado.

Porém, quando se está buscando determinar qual das populações possui maior vida, o modelo acima proposto deverá ser aplicado.

Resultados superiores a 0,8 implicam em concluir que uma população é superior a outra, ou ainda, que 80% dos dados de uma população são estatisticamente superiores ao de outra população.

2.11 CONCEITOS DE MANUTENÇÃO

A manutenção pode ser classificada basicamente como Corretiva e Preventiva.

A manutenção corretiva compreende todas as ações necessárias para retornar um equipamento ou componente em situação de falha para seu estado disponível e operacional. A frequência de manutenção corretiva é determinada pela confiabilidade do equipamento. Quanto maior a confiabilidade, menor será a frequência de manutenção corretiva.

A manutenção preventiva busca manter o equipamento ou sistema disponível, através da prevenção de ocorrência das falhas. As tarefas de manutenção preventiva podem ser classificadas em dois grupos:

- Baseada em Tempo ou Preventiva Sistemática: destinada a prevenção ou postergação das falhas através da substituição, restauração ou inspeção.
- Baseada em Condição ou Preditiva: destinada à detecção do início da falha ou do sintoma da falha. Neste grupo se encontram as técnicas de monitoramento de condições, nas quais estão incluídas análise de videoscopia, análise de lubrificantes usados, análise de vibrações, entre outras.

Geralmente, o “bom senso” permite admitir que a melhor forma de aperfeiçoar a disponibilidade da instalação é fazer algum tipo de manutenção preventiva rotineira. A conscientização desses fatos levou algumas empresas a abandonar a idéia desta estratégia de manutenção. Na verdade, isso pode ser o certo para falhas com conseqüências pequenas, mas, quando as conseqüências da falha são significativas, algo tem que ser feito para prevenir as falhas ou, pelo menos, reduzir as conseqüências. Diante do exposto acima, as principais estratégias de manutenção utilizadas atualmente estão sendo apresentadas a seguir.

2.11.1 Tarefas programadas sob condição

São tarefas técnicas que se baseiam no fato de que a maioria das falhas fornece algum tipo de aviso de que estão prestes a ocorrer. Esses avisos são conhecidos como falhas potenciais e são definidos como condições físicas identificáveis que indicam que uma falha funcional está prestes a ocorrer ou já está ocorrendo. Essas técnicas são usadas para detectar falhas potenciais, de modo que podem ser tomadas providências para prevenir às conseqüências que poderiam advir caso as falhas se tornassem funcionais. As tarefas são chamadas de sob condição porque os itens permanecem em serviço com a condição de que continuem a cumprir os padrões de desempenho desejados. Neste caso, está se referindo a Manutenção Baseada em Condição ou Preditiva.

A freqüência das tarefas de manutenção baseada em condição não deve ser baseada somente na freqüência de ocorrência da falha e/ou na criticidade do item, mas sim no período de evolução da falha, conforme apresentado na Figura 2.11.

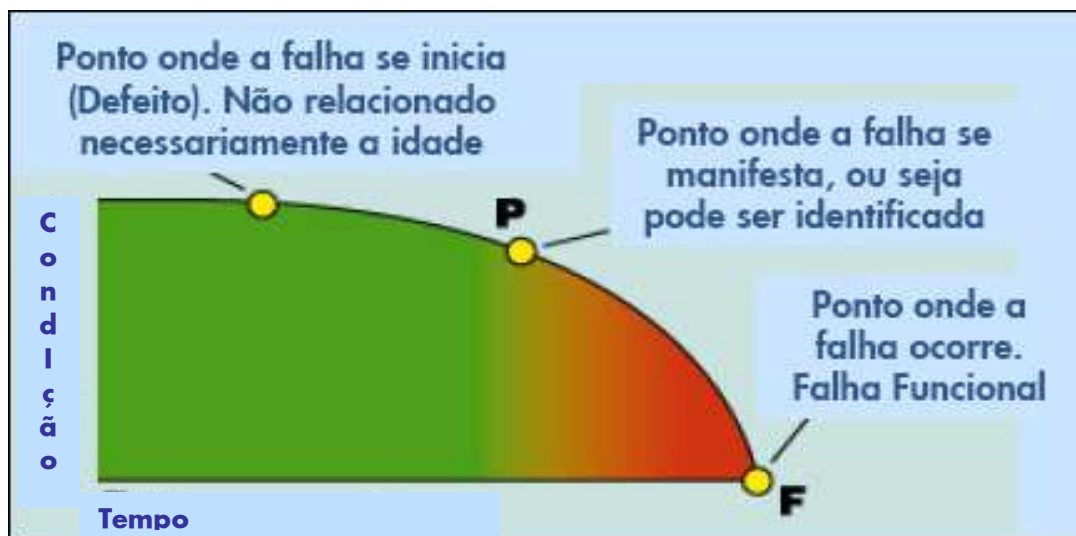


Figura 2.11 – Determinação de freqüência de tarefas de manutenção baseadas em condição – Diagrama P-F. – Fonte: ALADON (1999)

De acordo com ALADON (1999), a periodicidade de uma tarefa de monitoramento de condições deverá ser no máximo igual à um terço do intervalo P-F.

2.11.2 Tarefas programadas de restauração e descarte

A restauração programada implica na refabricação de um componente ou revisão de um conjunto em uma idade limite especificada, ou antes, independente da sua condição naquele momento. De forma semelhante, o descarte programado implica na substituição de um item em uma vida útil limite especificada, independentemente da sua condição naquele momento. Neste caso está se referindo a Manutenção Preventiva Sistemática.

2.11.3 Tarefas Padrão

Se uma tarefa preventiva é ou não tecnicamente viável, depende das características técnicas da tarefa e da falha que ela destina-se prevenir. Se ela vale a pena ser realizada depende da competência com a qual ela está relacionada com as conseqüências da falha. Se não for encontrada uma tarefa preventiva que seja tecnicamente viável e valha a pena ser feita, então, uma ação padrão tem que ser realizada.

A natureza das ações depende basicamente das conseqüências da falha, podendo acarretar nas chamadas Tarefas de Localização de Falhas, as quais implicam na verificação periódica de funções ocultas, para determinar se as funções falharam, ou ainda nas Tarefas de Prevenção de Falha, relacionadas ao bloqueio de conseqüências sobre segurança ou meio ambiente.

As tarefas de manutenção afetam diretamente a taxa de falhas e seu efeito pode ser verificada através forma da Curva da Banheira, conforme apresentado por LAFRAIA (2001) e exposto na Figura 2.12.

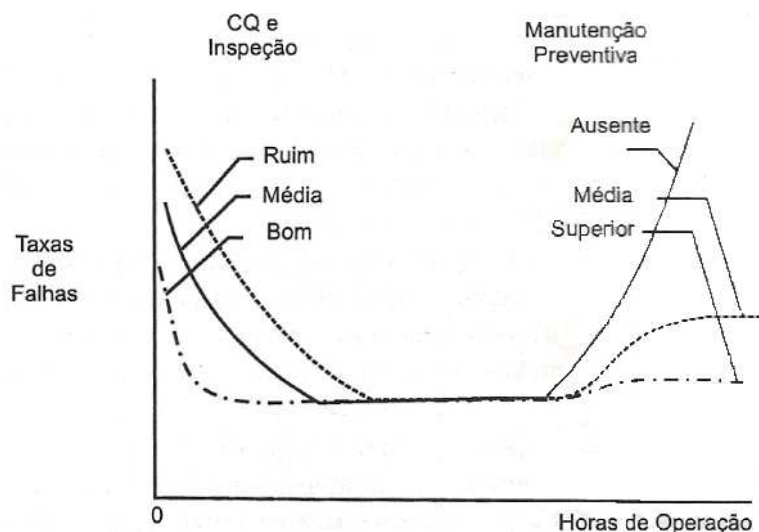


Figura 2.12 - Influência da estratégia de manutenção na Curva da Banheira – Fonte: LAFRAIA (2001)

2.11.4 Tipos de Falhas associadas às Estratégias de Manutenção

2.11.4.1 Falhas relacionadas à Idade

De acordo com LAFRAIA (2001), componentes mecânicos aparentemente idênticos podem ter comportamentos diferentes, de acordo com as condições operacionais sob as quais forem submetidos. A resistência dos mesmos diminui com o tempo de maneira diferente, mesmo para componentes semelhantes. Pequenas diferenças operacionais podem levar a grandes diferenças na vida, fazendo com que a sua previsão seja extremamente difícil.

As curvas de distribuição de frequência de falhas e probabilidade de falhas para este tipo de comportamento mostram que o conceito de vida pode ter, pelo menos, duas interpretações. A primeira é o Tempo Médio entre Falhas ou também chamado *Medium Time Between Failure*, ou simplesmente “MTBF”, que é o mesmo que vida média para uma amostragem total. A segunda é vida útil, determinada pelo ponto em que se inicia um rápido aumento na probabilidade condicional de falha. A Figura 2.13 ilustra graficamente estes dois tipos de vida.

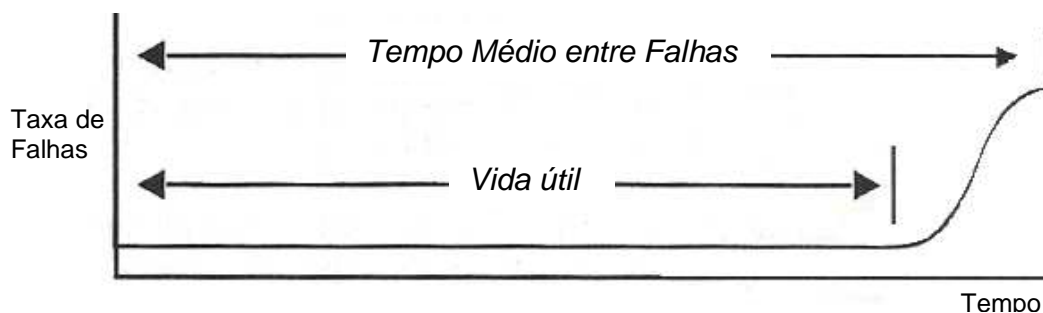


Figura 2.13 – Diferença entre MTBF e Vida útil

Como é possível observar através da Figura 2.13, a determinação de um programa de restauração ou substituição programada com intervalo igual ao MTBF implicaria na falha de metade dos componentes, antes de chegar ao término do intervalo proposto e, conseqüentemente, somente metade das falhas seria evitada, o que é inaceitável sob o ponto de vista operacional em se tratando de motores de embarcações.

Para evitar a maioria das falhas, as intervenções deveriam ocorrer antes do final da vida útil. Portanto, o MTBF tem pouca utilização no estabelecimento tempo para restaurações ou substituições programadas para componentes mecânicos sujeitos ao desgaste. O tempo de vida útil deve ser determinado a partir do ponto em que a taxa de falhas começa a aumentar rapidamente, ou ainda, a partir de um nível de confiabilidade requerido, conceito que está sendo aplicado neste trabalho. O efeito das intervenções para reparo ou substituição na taxa de falhas pode ser visualizado na Figura 2.14.

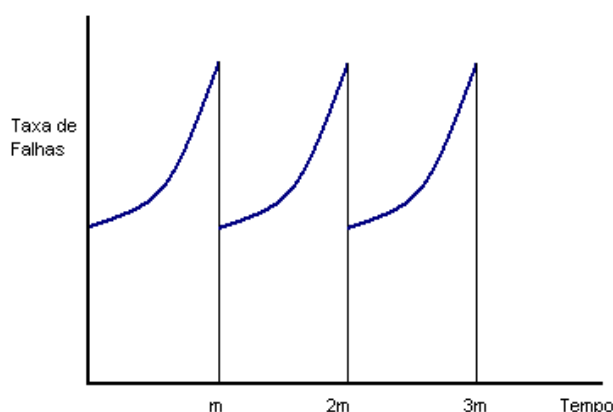


Figura 2.14 – Efeito de intervenções em equipamentos com taxa de falhas crescente

É possível observar que a estratégia de substituições ou reparos periódicos afeta diretamente a taxa de falhas, sendo esta a técnica de manutenção mais adequada para componentes mecânicos sujeitos a falhas decorrentes a desgaste.

2.11.4.2 Falhas Aleatórias

Na prática, a "prevenção" deste tipo de falha é feita tentando-se limitar oscilações nas condições operacionais do equipamento, as quais podem ser causadas por erros humanos como, por exemplo, a partida rápida do equipamento sem seguir os procedimentos recomendados pelos fabricantes, ou ainda submeter o equipamento a condições para as quais o mesmo não foi desenvolvido, etc.

A utilização de políticas de substituições ou reparos periódicos para este tipo de falha não implicará na redução da taxa de falhas do equipamento, conforme apresentado na Figura 2.15.



Figura 2.15 – Efeito de intervenções em equipamentos com taxa de falhas constante – Fonte: ALADON (1999)

Nos casos de erro humano, a melhor forma de minimizar as falhas aleatórias é a capacitação e treinamento, assim como para os casos de sobrecarga, a ação preventiva recomendada seria a adequação do projeto do equipamento considerando as condições extremas esporádicas, sob o qual poderá ser submetido, conforme colocado por LAFRAIA (2001).

2.11.4.3 Falhas Prematuras

No período de falhas prematuras ou de mortalidade infantil, a taxa de falhas é decrescente, e nesses casos, intervenções para reparo ou substituição poderão acarretar no aumento da taxa de falhas, conforme apresentado na Figura 2.16.

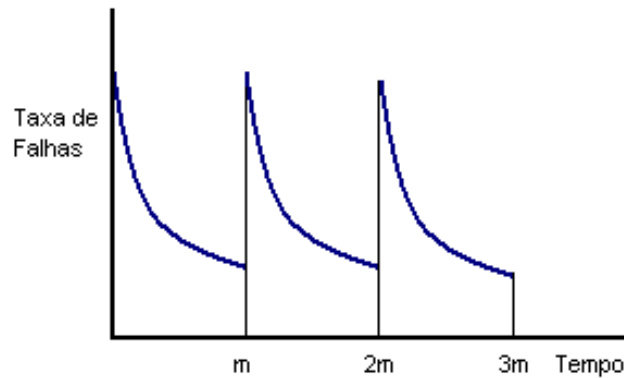


Figura 2.16 – Possível efeito de intervenções em equipamentos com taxa de falhas decrescente

De acordo com ALADON (1999) estas falhas podem ter origem em processos de fabricação deficientes, controle de qualidade deficiente, amaciamento insuficiente, etc.

3. RESULTADOS

Para confirmação do comportamento dos dados segundo a distribuição de Weibull, realizou-se primeiramente o ajuste dos mesmos na distribuição de probabilidade acumulada de Weibull $F(T)$. Para isso, foram incluídos, para cada motor, os dados de falhas sem a separação por componentes, analisando a dispersão dos mesmos em relação à probabilidade acumulada de Weibull ajustada.

As Figuras 3.1 e 3.2 apresentam as funções $F(T)$ para os dois tipos de motores. O detalhamento dos testes de aderência executados no software Weibull ++ para a obtenção dos gráficos será apresentado na seção 3.1.

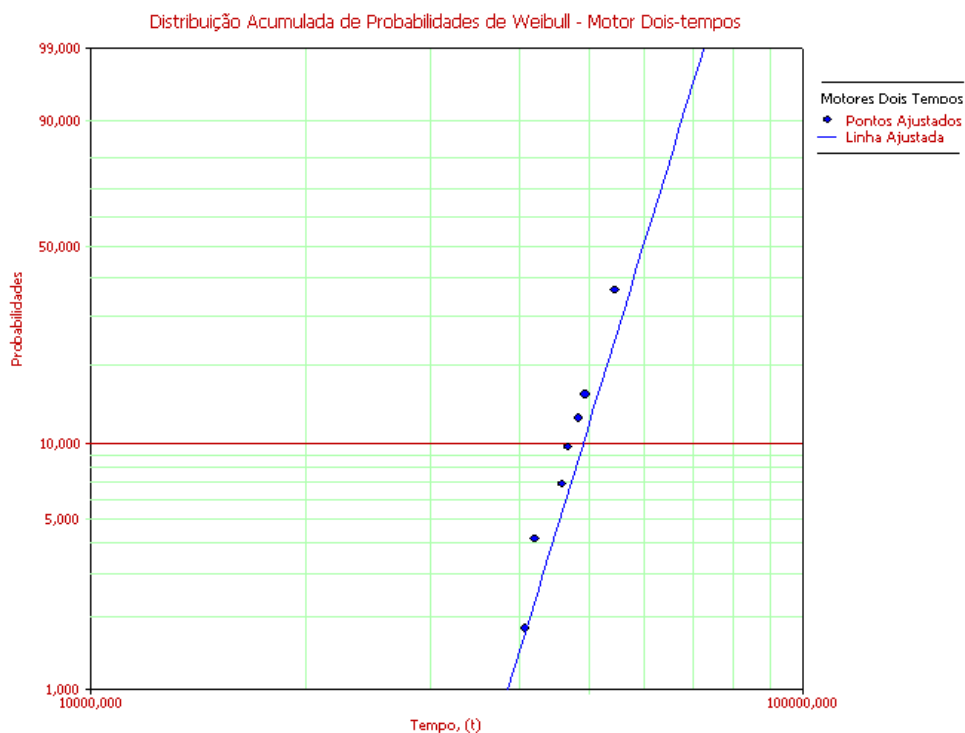


Figura 3.1 – Ajuste dos dados – Distribuição de Probabilidade Acumulada de Weibull dos dados do Motor Dois-tempos

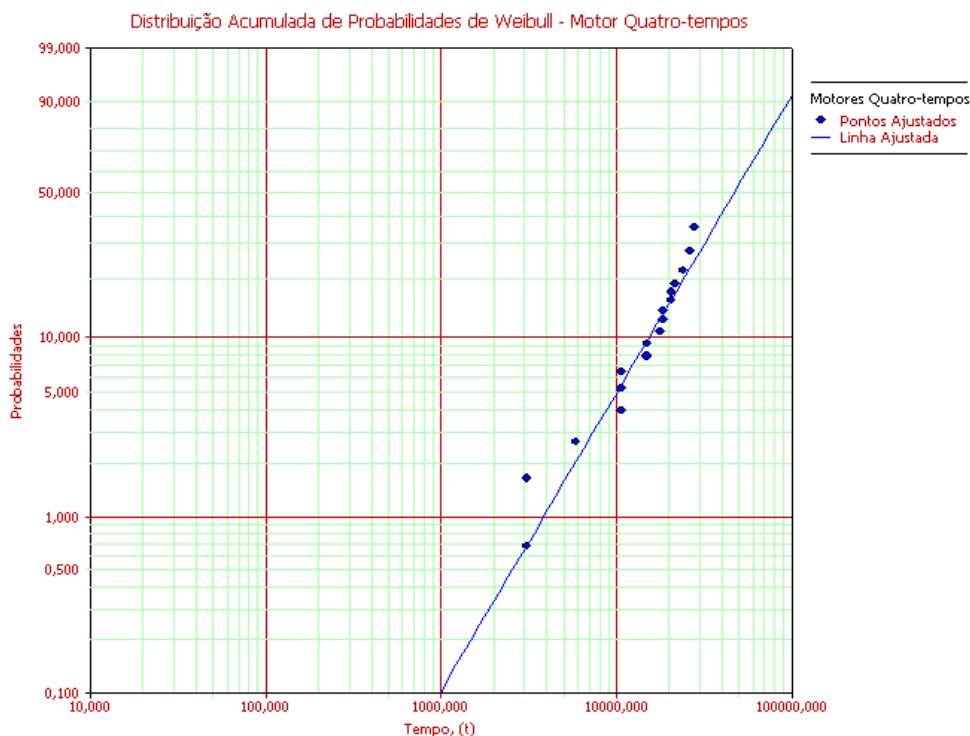


Figura 3.2 – Ajuste dos dados – Distribuição de Probabilidade Acumulada de Weibull dos dados do Motor Quatro-tempos

É possível observar através dos gráficos que os dados se ajustam satisfatoriamente à distribuição de Weibull, o que confirma a suposição de que a Distribuição de Weibull é um modelo adequado para análise de dados de vida de equipamentos mecânicos sujeitos a desgaste.

3.1 TRATAMENTO DOS DADOS

O processo de tratamento dos dados ocorreu a partir da extração dos resultados das análises dos motores do banco de dados para uma planilha em Microsoft Excel, a qual foi adequada para a finalidade deste trabalho. Esta adequação incluiu exclusão de informações, inserção de colunas e elaboração de fórmulas, de modo a obter os dados em condições de inclusão no software Reliasoft Weibull ++. A Tabela 3.1 apresenta uma parte do banco de dados após o tratamento no Microsoft Excel. A tabela completa está disponível no Anexo B.

Tabela 3.1 – Parte do Banco de Dados após tratamento no Microsoft Excel

	A	D	N	O	R	W	AB	AC	AE	AF	AG	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF
1															Condição Amostra MetalParte Alta	Cond. Final Parte Alta	Condição Amostra Metal Parte Baixa	Cond. Final Parte Baixa	
2	Função	Modelo Comj	Mach Life	Mach	DateDrai	Al	Pb	Cu	Cr	Sn	Fe	Fe	Al	Cr	Desgaste	Pb	Cu	Sn	
38	PSV	MAK 9M-20	3.213,0	Horas	29/08/2008	3,00	3,00	2,00	5,00	3,00	30,00	S	S	S	S	S	S	S	S
39	PSV	MAK 9M-20	38.286,0	Horas	29/09/2008	2,00	3,00	4,00	1,00	2,00	12,00	S	S	S	S	S	S	S	S
40	PSV	MAK 9M-20	24.756,0	Horas	29/10/2009	2,00	1,00	1,00	1,00	1,00	101,00	F	S	S	F	S	S	S	S
41	PSV	MAK 9M-20	24.600,0	Horas	29/10/2009	3,00	-	1,00	-	1,00	19,00	S	S	S	S	S	S	S	S
42	PSV	MAK 9M-20	21.495,0	Horas	30/03/2009	2,00	-	-	2,00	-	23,00	S	S	S	S	S	S	S	S
43	PSV	MAK 9M-20	21.638,0	Horas	30/03/2009	-	-	-	-	-	73,00	S	S	S	S	S	S	S	S
44	PSV	MAK 9M-20	18.326,0	Horas	30/09/2008	2,00	2,00	1,00	3,00	2,00	20,00	S	S	S	S	S	S	S	S
45	PSV	MAK 9M-20	18.182,0	Horas	30/09/2008	3,00	3,00	4,00	4,00	3,00	26,00	S	S	S	S	S	S	S	S
46	PSV	MAK 9M-20	24.416,0	Horas	30/09/2009	3,00	3,00	1,00	1,00	2,00	84,00	S	S	S	S	S	S	S	S
47	PSV	MAK 9M-20	24.270,0	Horas	30/09/2009	4,00	3,00	3,00	1,00	2,00	24,00	S	S	S	S	S	S	S	S
48	PSV	MAK 9M-20	22.796,0	Horas	31/05/2009	2,00	2,00	1,00	3,00	1,00	66,00	S	S	S	S	S	S	S	S
49	PSV	MAK 9M-20	22.655,0	Horas	31/05/2009	2,00	2,00	1,00	6,00	1,00	29,00	S	S	S	S	S	S	S	S
50	PSV	MAK 9M-20	18.770,0	Horas	31/10/2008	3,00	3,00	2,00	3,00	3,00	25,00	S	S	S	S	S	S	S	S
51	PSV	MAK 9M-20	18.625,0	Horas	31/10/2008	3,00	4,00	2,00	5,00	3,00	44,00	S	S	S	S	S	S	S	S
52	PSV	MAK 9M-20	19.920,0	Horas	31/12/2008	3,00	-	-	2,00	-	51,00	S	S	S	S	S	S	S	S
53	PSV	MAK 9M-20	19.778,0	Horas	31/12/2008	5,00	-	-	5,00	-	22,00	S	S	S	S	S	S	S	S
54	PSV	EMD 16 645E7	54.129,0	Horas	05/09/2009	3,00	4,00	16,00	2,00	2,00	68,00	S	S	S	S	S	S	S	S
55	PSV	EMD 16 645E7	54.654,0	Horas	05/09/2009	4,00	6,00	13,00	4,00	2,00	47,00	S	S	S	S	S	S	S	S
56	PSV	EMD 16 645E7	43.540,0	Horas	05/10/2007	4,00	7,00	24,00	10,00	5,00	95,00	S	S	F	F	S	F	S	F
57	PSV	EMD 16 645E7	43.752,0	Horas	05/10/2007	2,00	3,00	16,00	4,00	2,00	37,00	S	S	S	S	S	S	S	S
58	PSV	EMD 16 645E7	40.600,0	Horas	10/01/2007	1,00	-	9,00	4,00	-	32,00	S	S	S	S	S	S	S	S
59	PSV	EMD 16 645E7	40.730,0	Horas	10/01/2007	1,00	3,00	13,00	5,00	-	65,00	S	S	S	S	S	S	S	S
60	PSV	EMD 16 645E7	46.872,0	Horas	16/04/2008	2,00	5,00	17,00	4,00	5,00	49,00	S	S	S	S	S	S	S	S
61	PSV	EMD 16 645E7	46.662,0	Horas	16/04/2008	2,00	5,00	11,00	2,00	4,00	20,00	S	S	S	S	S	S	S	S
62	PSV	EMD 16 645E7	45.068,0	Horas	16/12/2007	2,00	3,00	4,00	2,00	3,00	19,00	S	S	S	S	S	S	S	S
63	PSV	EMD 16 645E7	44.855,0	Horas	16/12/2007	2,00	9,00	20,00	8,00	5,00	62,00	S	S	S	S	S	S	S	S
64	PSV	EMD 16 645E7	54.548,0	Horas	17/11/2009	5,00	7,00	12,00	6,00	5,00	37,00	S	S	S	S	S	S	S	S
65	PSV	EMD 16 645E7	55.042,0	Horas	17/11/2009	4,00	5,00	17,00	3,00	4,00	54,00	S	S	S	S	S	S	S	S
66	PSV	EMD 16 645E7	38.569,0	Horas	18/09/2006	-	-	14,00	2,00	-	41,00	S	S	S	S	S	S	S	S
67	PSV	EMD 16 645E7	38.700,0	Horas	18/09/2006	1,00	-	9,00	2,00	-	20,00	S	S	S	S	S	S	S	S
68	PSV	EMD 16 645E7	39.423,0	Horas	19/11/2006	2,00	5,00	19,00	3,00	4,00	62,00	S	S	S	S	S	S	S	S
69	PSV	EMD 16 645E7	39.554,0	Horas	19/11/2006	2,00	8,00	14,00	4,00	4,00	46,00	S	S	S	S	S	S	S	S
70	PSV	EMD 16 645E7	55.373,0	Horas	22/12/2009	4,00	5,00	15,00	4,00	2,00	38,00	S	S	S	S	S	S	S	S
71	PSV	EMD 16 645E7	54.843,0	Horas	22/12/2009	3,00	2,00	15,00	1,00	2,00	45,00	S	S	S	S	S	S	S	S
72	PSV	EMD 16 645E7	47.435,0	Horas	28/06/2008	3,00	6,00	22,00	4,00	5,00	50,00	S	S	S	S	S	F	S	F

Conforme apresentado no Capítulo 2, o motor foi dividido em duas partes, “Parte Alta” e “Parte Baixa” e foram consideradas as seguintes premissas:

- Níveis de desgaste de cobre (Cu), chumbo (Pb) ou estanho (Sn) acima dos limites máximos aceitáveis determinados por SHELL (2008), foram considerados como falha (F) da “Parte Baixa” do motor, e níveis abaixo desses limites foram considerados como dados em suspensão (S), conforme é possível observar na coluna BF da tabela 3.1;
- Níveis de desgaste de alumínio (Al), ferro (Fe) ou cromo (Cr) acima dos limites máximos aceitáveis determinados por SHELL (2008), foram considerados como falha (F) da “Parte Alta” do motor, e níveis abaixo desses limites foram considerados como dados em suspensão (S) na coluna BB da tabela 3.1;

Esta classificação foi necessária devido à dependência entre as falhas dos componentes que pertencem a cada parte do motor. Para exemplificar, caso ocorra um problema mecânico na parte alta do motor, por exemplo, no anel de segmento (onde há a presença de cromo), a probabilidade de ocorrência de desgaste na camisa será elevada (onde há predominância de ferro). Diante dessa situação, existe uma relação entre os componentes, sendo que estes não apresentam independência estatística, o que é uma exigência para a análise de dados utilizando os conceitos probabilísticos apresentados no Capítulo 2.

Por outro lado, essa dependência não ocorre entre a Parte Alta e a Parte Baixa do motor, para os níveis de desgaste em que se está trabalhando, ajustando a definição dos modos de falhas adequadamente aos conceitos probabilísticos propostos.

Outro aspecto importante a ser observado é a necessidade de análise das quantidades de elementos metálicos presentes no lubrificante em função do tempo de utilização do mesmo. Considerando este aspecto, os limites propostos por SHELL (2008) correspondem a um determinado nº de horas de uso do lubrificante. Para exemplificar esta consideração, a eventual presença de 100 ppm de ferro em uma amostra de lubrificante com 100 horas de uso apresenta maior gravidade do que a mesma quantidade do referido metal em uma amostra de óleo com 1000 horas de operação. Esta informação também foi considerada na determinação da ocorrência de Falha nos componentes.

De posse dos dados devidamente organizados, realizou-se a inclusão dos dados no software Reliasoft Weibull ++, com foco na análise de cada modo de falha. Nesta fase, foram realizadas 4 inclusões, sendo duas para cada motor, cada uma correspondente ao seu modo de falha, com o objetivo de obter as seguintes informações:

- Ajuste dos dados à distribuição de Weibull, considerando os conceitos de Máxima Verossimilhança com seus respectivos intervalos de confiança, através da utilização da Matriz de Fischer unilateral inferior com precisão de 95%;
- Parâmetros das distribuições de Weibull (β , η e γ), Função Densidade de Probabilidade $f(T)$;
- Comportamento da Confiabilidade $R(T)$;
- Comportamento da Probabilidade de Falhas $P(T)$;
- Comportamento da Taxa de Falhas $\lambda(T)$.

A seguir estão sendo apresentados os referidos processos, aplicados a um modo de falha, no caso, Parte Alta do Motor dois-tempos. Para os demais modos de falha, serão apresentados somente os resultados finais das análises e seus respectivos gráficos de comportamento.

3.1.1 Parte Alta do Motor dois-tempos

Embora se trate da análise da Parte Alta do motor dois-tempos, foram incluídos todos os dados correspondentes à Parte Baixa do referido motor como dados em suspensão, conforme sugerido por RELIASOFT (2006 a), devido ao fato de todos os componentes em estudo serem lubrificados pelo mesmo lubrificante, além de seus dados (de falha ou em suspensão) correspondentes à Parte Alta. A Tabela 3.2 ilustra parte dos dados inseridos no software.

Tabela 3.2 – Parte dos Dados inseridos no software Weibull ++ - Parte Alta do Motor dois-tempos

Estado F ou S	Tempo da F ou S	Subconjunto ID
F	43540	Parte Alta
S	43540	Parte Baixa
S	43676	Parte Alta
S	43676	Parte Baixa
S	43752	Parte Alta
S	43752	Parte Baixa
S	43962	Parte Alta
S	43962	Parte Baixa
S	44748	Parte Alta
S	44748	Parte Baixa
S	44855	Parte Alta
S	44855	Parte Baixa
S	45068	Parte Alta
S	45068	Parte Baixa
S	46662	Parte Alta
S	46662	Parte Baixa
S	46872	Parte Alta
S	46872	Parte Baixa
S	46883	Parte Alta
S	46883	Parte Baixa
S	47435	Parte Alta
S	47435	Parte Baixa
F	48337	Parte Alta
S	48337	Parte Baixa
S	49707	Parte Alta
S	49707	Parte Alta
S	49707	Parte Baixa
S	49707	Parte Baixa
F	49914	Parte Alta
S	49914	Parte Baixa

Os tempos apresentados na coluna “Tempo da S ou F” são dados em horas de operação, a coluna “Subconjunto ID corresponde à descrição do modo de falha (parte alta ou parte baixa), e a coluna “Estado S ou F” indica se o dado corresponde a dados em suspensão (S) ou em falha (F).

Após a inclusão dos dados, realizou-se o ajuste dos conceitos que serão utilizados para a determinação dos parâmetros da distribuição de Weibull, através conforme apresentado na Figura 3.3.

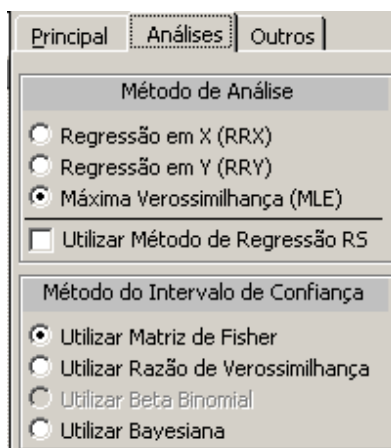


Figura 3.3 – Ajuste dos conceitos probabilísticos utilizados para a determinação dos parâmetros de estimação e intervalo de confiança.

Mediante a realização dos ajustes apresentados acima, realizou-se a determinação dos parâmetros de estimação, considerando a distribuição de Weibull como modelo, os quais estão sendo apresentados na Figura 3.4.

The screenshot shows the ReliaSoft Weibull++ 7 interface. The main window displays a data table for 'C174 Parte Baixa' with columns for 'Estado F ou S', 'Tempo da F ou S', and 'Subconjunto ID'. The 'Análises' tab is active, showing the 'Distribuição' (Distribution) set to 'Weibull'. The 'Parâmetros (Tipo)' (Parameters) section shows the following values:

Parâmetro	Valor
Beta	10,5670
Eta	7,1019E+4

The 'Valor do LK' (Lack of Fit) is -54,1515. The 'Configurações' (Configurations) section shows 'MLE' and 'SRM' selected. The 'Resumo das Análises' (Summary of Analyses) section shows 'P() = ...'.

Figura 3.4 – Determinação dos parâmetros de estimação

Através da Figura 3.4 pode-se observar que $\beta=10,56$, $\eta=71.019$ e $\gamma=0$.

É possível constatar que a confiabilidade do modo de falha começa a diminuir na medida em que o equipamento entra em operação, já que o parâmetro de localização $\gamma \neq 0$, conforme exposto por LAFRAIA (2001).

De posse dos Parâmetros de Estimação, podem-se obter todas as propriedades da distribuição. As Figuras 3.5 a 3.8 apresentam, respectivamente, as funções $f(T)$, $R(T)$, $P(T)$ e $\lambda(T)$ para o modo de falha em estudo, assim como o limite estabelecido pelo intervalo de confiança.

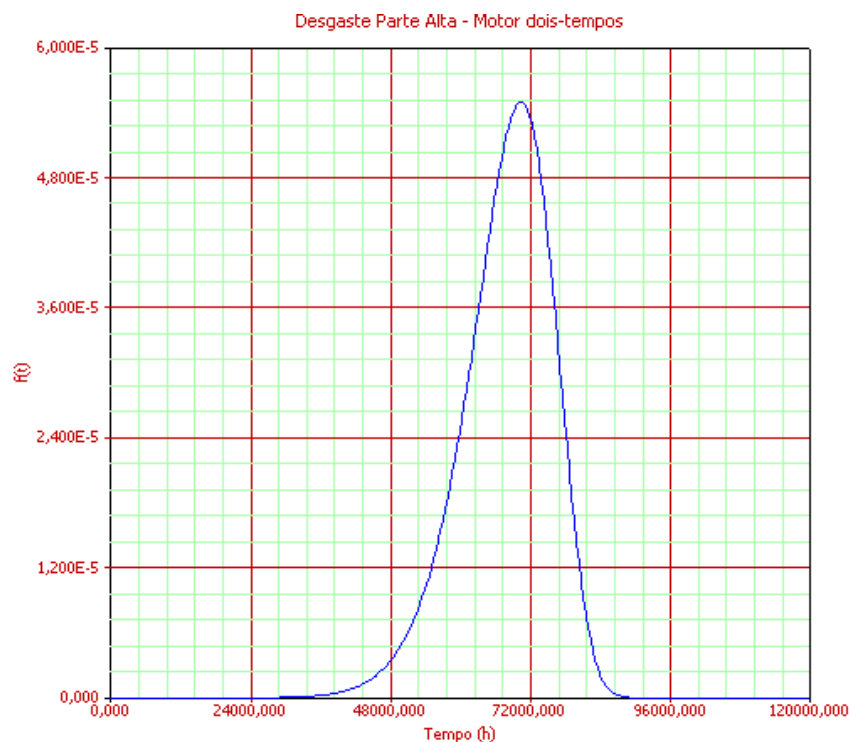


Figura 3.5 – Função $f(T)$ do Modo de Falha

É possível observar, como esperado, a baixa dispersão dos dados, como conseqüência do valor do parâmetro de forma β ser muito superior a 1,0, de forma que, quanto maior o valor deste parâmetro, menor a dispersão dos dados, conforme RELIASOFT (2006 b).

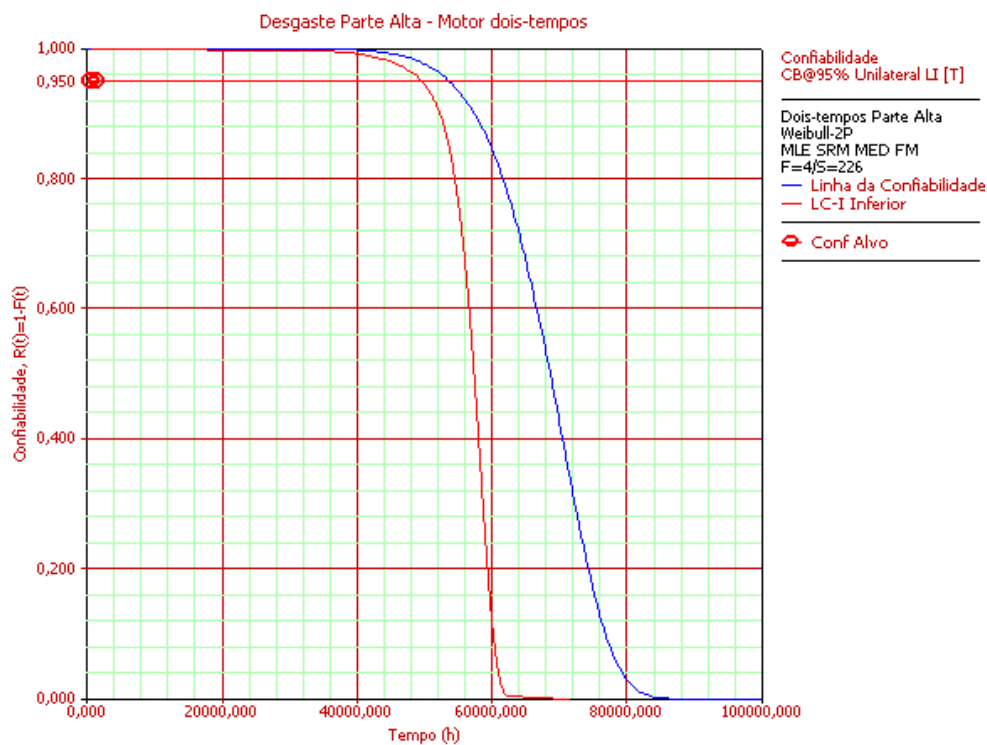


Figura 3.6 – Função $R(T)$ do Modo de Falha

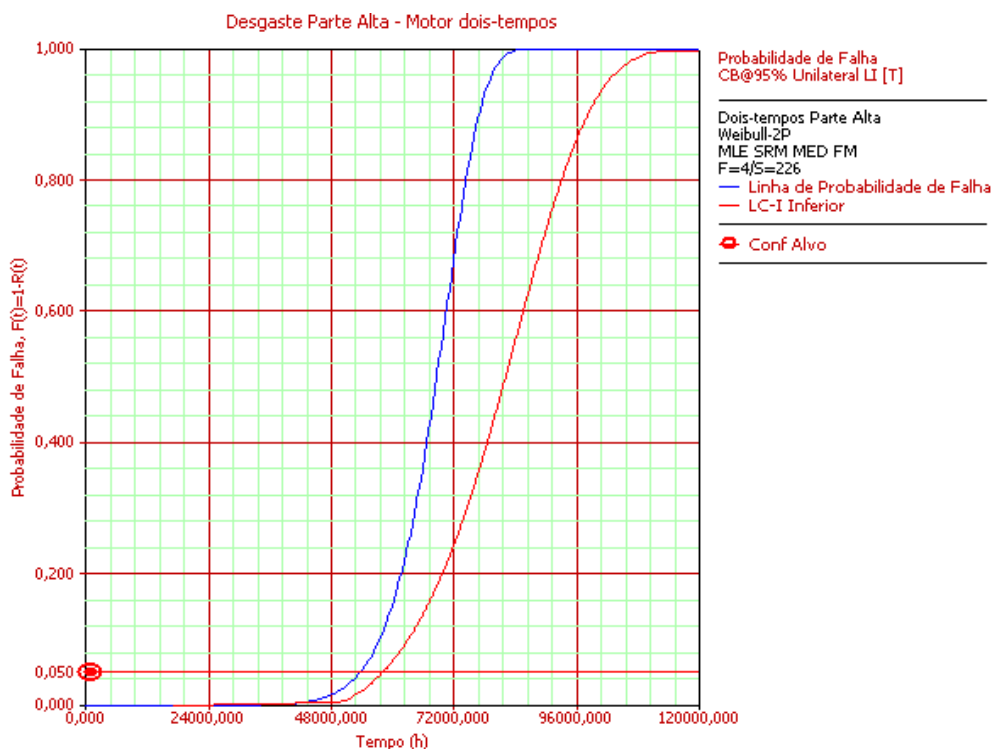


Figura 3.7 – Função $P(T)$ do Modo de Falha

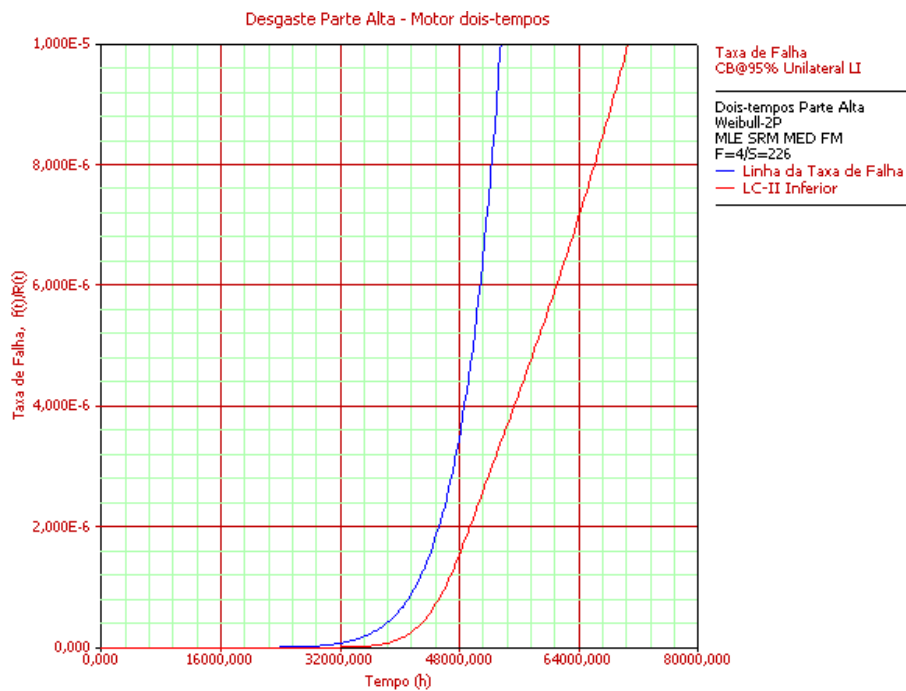


Figura 3.8 – Função Taxa de Falhas $\lambda(T)$ do Modo de Falha

Para fins de comparação, a seguir estão apresentados os cálculos do tempo médio entre falhas (MTBF) e do tempo de operação correspondente a uma confiabilidade requerida de 95%. As Figuras 3.9 e 3.10 apresentam os referidos cálculos.

Tábu de Cálculo

QCP

Cálculos Básicos | Intervalos de Confiança | Limites dos Parâmetros

Opções para Cálculos

Cálculos de Prob. Padrões Garantia (Tempo)

Cálculos Condicionais BX

Taxa de Falha Vida Média

Opções de Resultados

Resultados de Confiabilidade Resultados de Probabilidade de Falha

Entrada Requerida pelo Usuário

Confiabilidade Requerida: 0,95

Resultados

Tempo: 5,3617E+4

Inferior: 4,9579E+4

Confiância: 15 @ 0,95

Calcular

Fechar

Relatório...

Ajuda [En]

Weibull++ 7

Falhas: Motores (27,7)

Figura 3.9 – Tempo de Vida para $R(T)=95\%$

É possível observar que os resultados obtidos apresentam pouca variação, o que se deve a grande quantidade de dados em suspensão.

O tempo de vida da parte alta do motor dois tempos, para uma confiabilidade requerida de 95% e com 95% de precisão é de 53.617 horas tendo como limite mínimo correspondendo ao limite inferior do intervalo de confiança 49.579 horas.

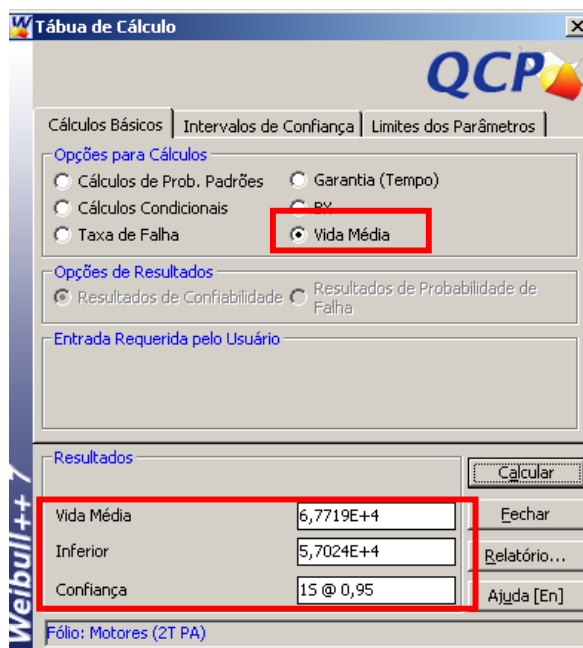


Figura 3.10 – Tempo Médio entre Falhas

O mesmo comportamento pode ser observado com a vida média, que neste caso, é de 67.719 horas de operação, tendo como vida média mínima, correspondendo ao limite inferior do intervalo de confiança, 57.024 horas. Isso significa que em média, a parte alta do motor poderá apresentar desgaste anormal a partir de 57.024 horas, com uma precisão de 95%.

3.1.2 Parte Baixa do Motor dois-tempos

De forma análoga ao que foi feito para a Parte Alta, na análise da Parte Baixa foram incluídos todos os dados correspondentes a Parte Alta do Motor dois-tempos como dados em suspensão, conforme proposto por RELIASOFT (2006 b), além de seus dados (de falha ou em suspensão) correspondentes.

Os parâmetros da distribuição obtidos, utilizando o mesmo processo aplicado no item 3.1.1 foram $\beta=10,26$, $\eta= 68.873$ e $\gamma=0$.

É possível constatar que, da mesma forma que para a Parte Alta desta concepção de motor, a confiabilidade começa a diminuir na medida em que o equipamento entra em operação, já que o parâmetro de localização $\gamma=0$.

As Figuras 3.11 a 3.14 apresentam respectivamente as funções $f(T)$, $R(T)$, $P(T)$ e $\lambda(T)$ para o modo de falha em estudo, assim como o limite estabelecido pelo intervalo de confiança.

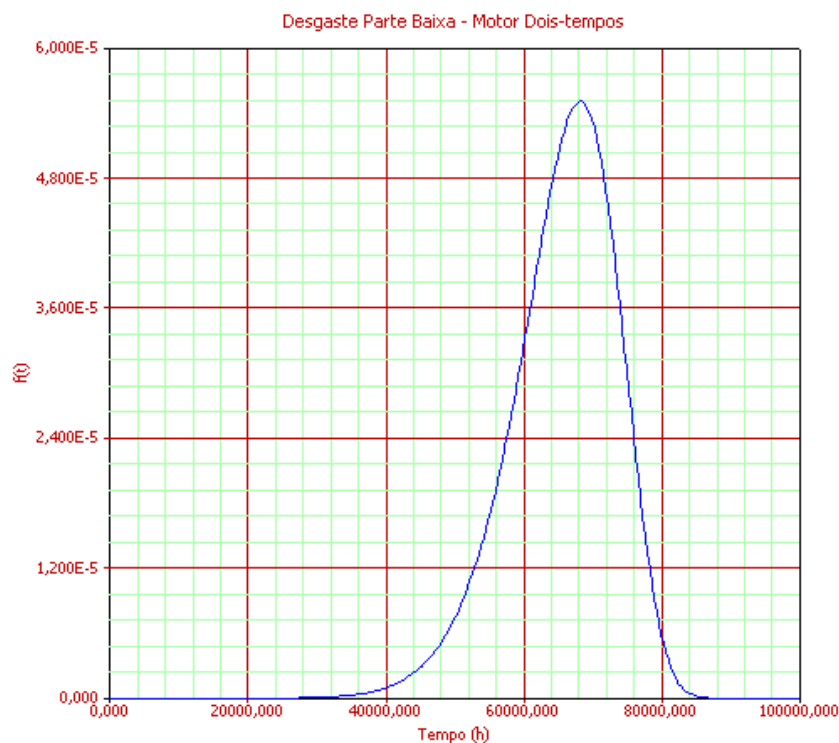


Figura 3.11 – Função $f(T)$ do Modo de Falha

É possível observar, como esperado, a baixa dispersão dos dados, semelhante ao ocorrido com a Parte Alta do mesmo motor, como consequência do valor do parâmetro de forma β ser muito superior a 1,0.

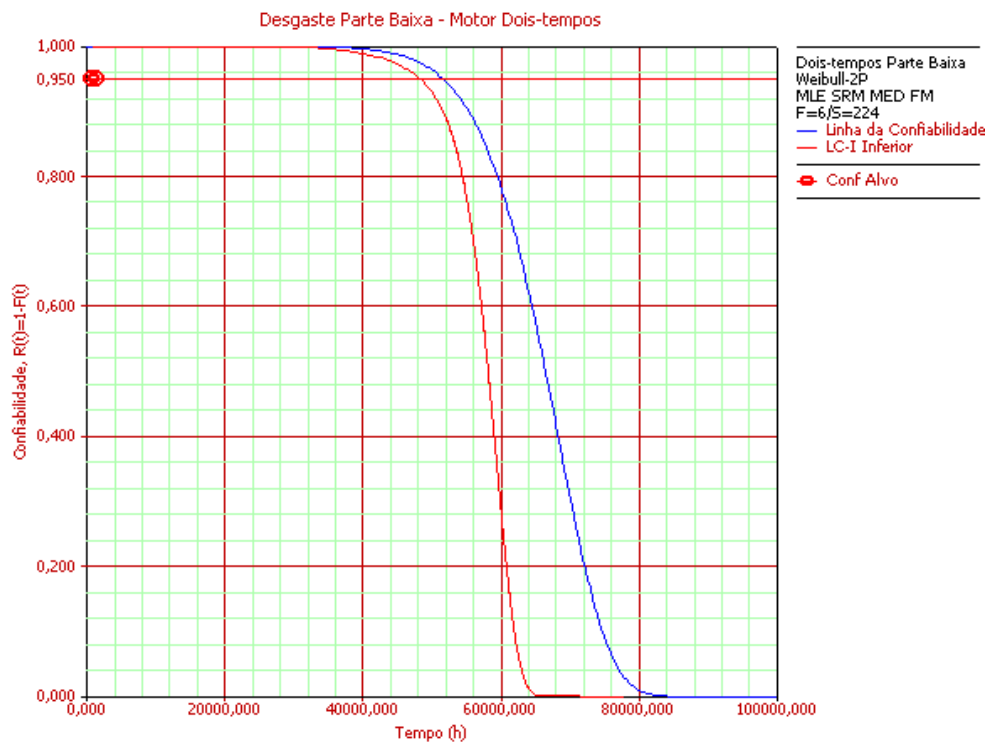


Figura 3.12 – Função $R(T)$ do Modo de Falha

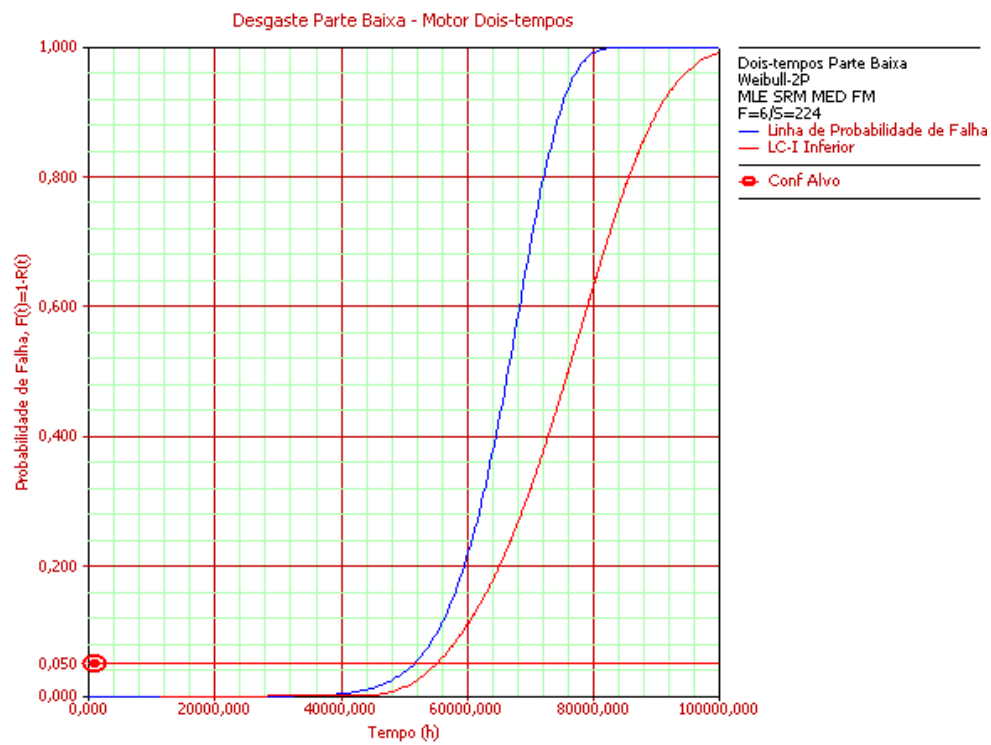


Figura 3.13 – Função $P(T)$ do Modo de Falha

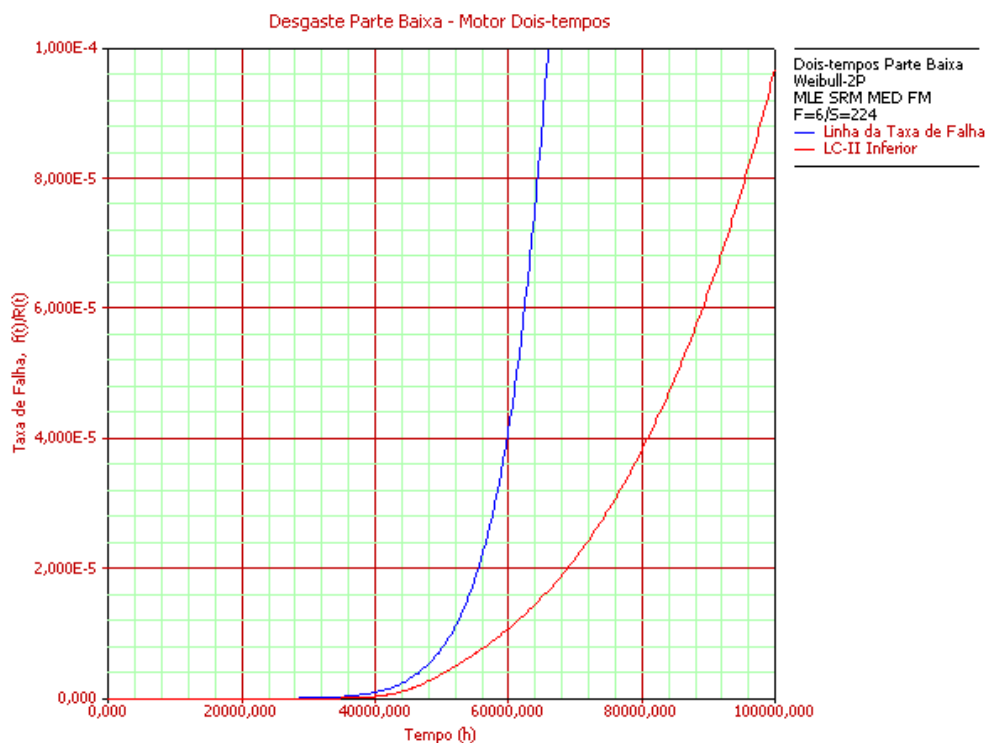


Figura 3.14 – Função Taxa de Falhas $\lambda(T)$ do Modo de Falha

Assim como calculado para a Parte Alta do motor, o tempo de vida da parte alta do motor dois tempos, para uma confiabilidade requerida de 95% e com 95% de precisão é de 51.562 horas tendo como limite mínimo correspondendo ao limite inferior do intervalo de confiança 48.245 horas.

A vida média, neste caso, é de 65.593 horas de operação, tendo como vida média mínima, correspondendo ao limite inferior do intervalo de confiança, 57.711 horas. Isso significa que em média, a parte baixa do motor poderá apresentar desgaste anormal a partir de 57.711 horas, com uma precisão de 95%.

3.1.3 Parte Alta do Motor quatro-tempos

Da mesma forma que para a parte alta do motor dois-tempos, foram inseridos os dados correspondentes a Parte baixa do motor quatro-tempos como dados em suspensão, além de seus dados (de falha ou em suspensão) correspondentes.

Os parâmetros da distribuição obtidos, utilizando o mesmo processo aplicado nos itens 3.1.1 e 3.1.2 foram $\beta=2,23$, $\eta= 133.060$ e $\gamma=0$.

É possível constatar que, da mesma forma que para os modos de falhas do motor dois-tempos, a confiabilidade para este modo de falha também começa a diminuir na medida em que o equipamento entra em operação, já que o parâmetro de localização $\gamma=0$.

As Figuras 3.15 a 3.18 apresentam respectivamente as funções $f(T)$, $R(T)$, $P(T)$ e $\lambda(T)$ para o modo de falha em estudo, assim como o limite estabelecido pelo intervalo de confiança.

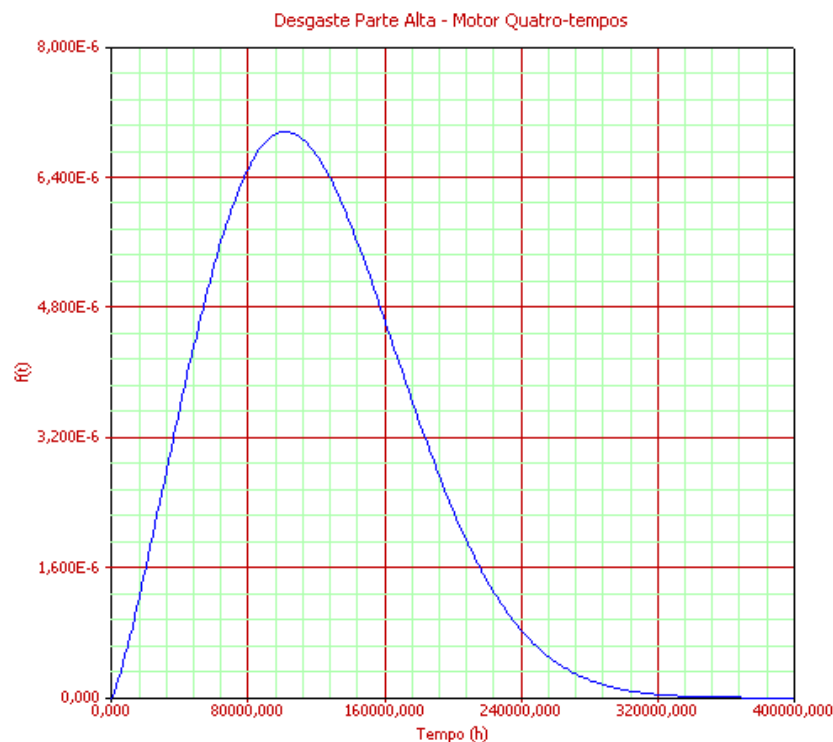


Figura 3.15 – Função $f(T)$ do Modo de Falha

É possível observar, como esperado, a baixa dispersão dos dados, ainda que maior que para os modos de falhas do motor dois-tempos.

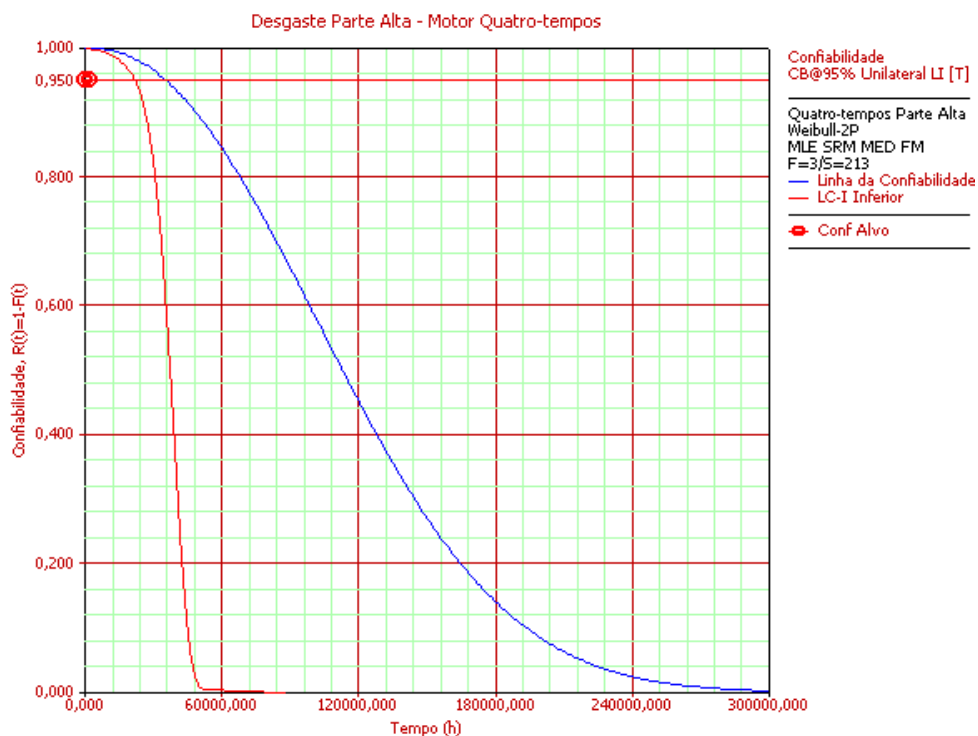


Figura 3.16 – Função $R(T)$ do Modo de Falha

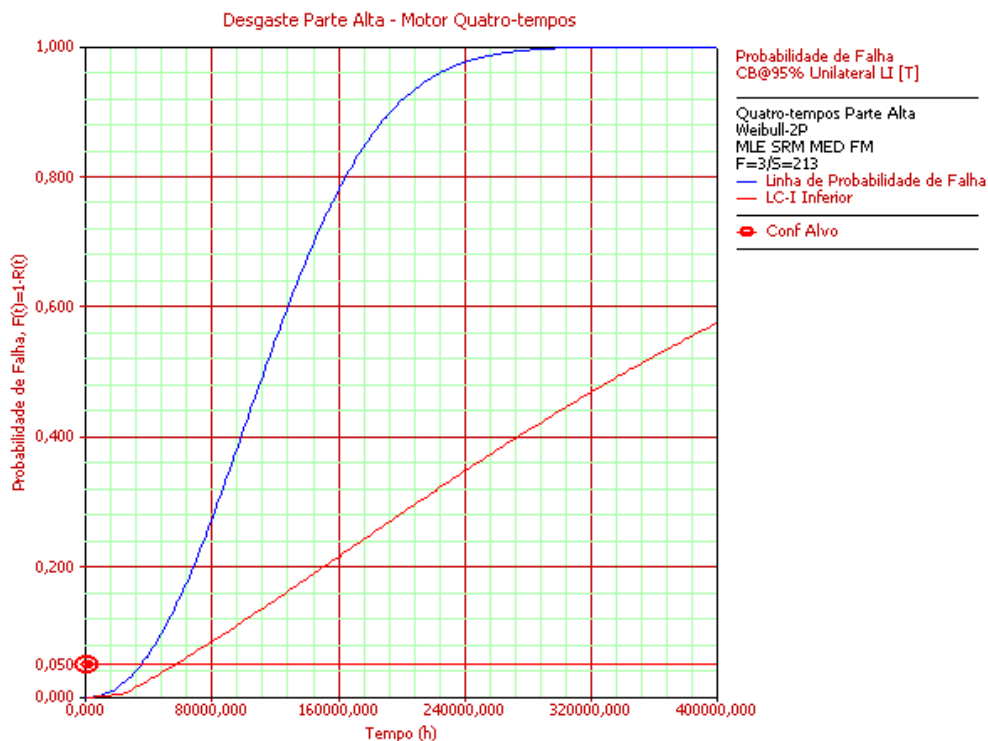


Figura 3.17 – Função $P(T)$ do Modo de Falha

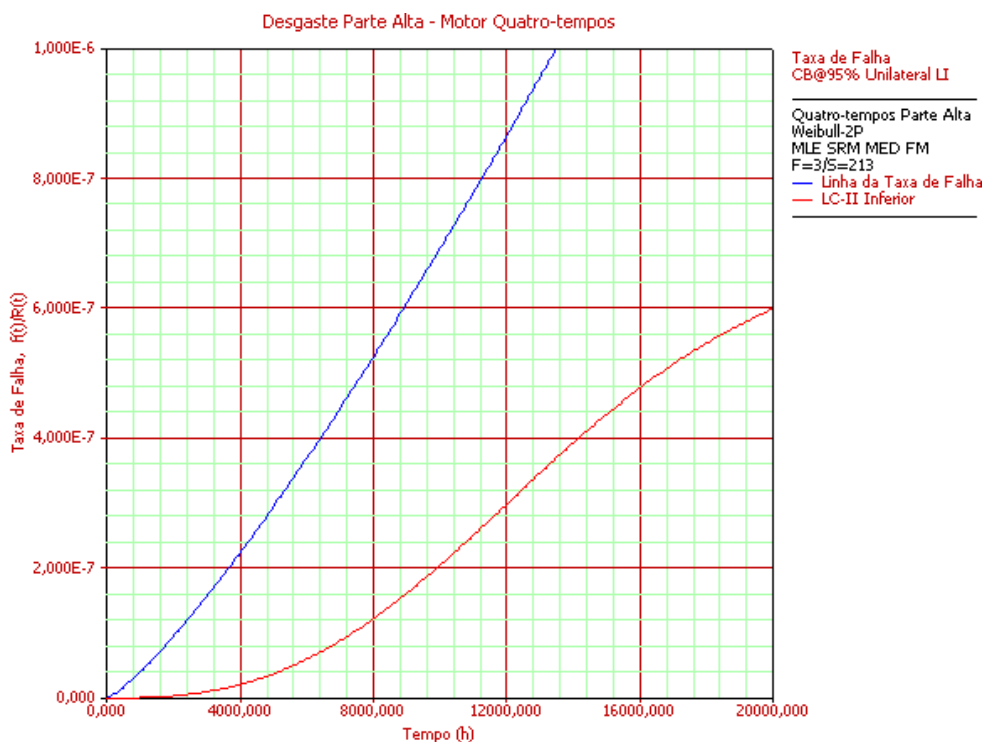


Figura 3.18 – Função Taxa de Falhas $\lambda(T)$ do Modo de Falha

O tempo de vida da parte alta do motor quatro-tempos, para uma confiabilidade requerida de 95% e com 95% de precisão é de 35.167 horas tendo como limite mínimo correspondendo ao limite inferior do intervalo de confiança 21.813 horas.

A vida média, neste caso, é de 117.850 horas de operação, tendo como vida média mínima, correspondendo ao limite inferior do intervalo de confiança, 37.822 horas. Isso significa que em média, a parte baixa do motor poderá apresentar desgaste anormal a partir de 37.822 horas, com uma precisão de 95%.

3.1.4 Parte Baixa do Motor quatro-tempos

Finalizando os cálculos individuais dos modos de falhas, foram inseridos os dados correspondentes a Parte Alta do motor quatro-tempos como dados em suspensão, além de seus dados (de falha ou em suspensão) correspondentes.

Os parâmetros da distribuição obtidos, utilizando o mesmo processo aplicado nos itens 3.1.1 e 3.1.2 foram $\beta=0,7448$, $\eta=608.330$ e $\gamma=0$.

É possível constatar que, da mesma forma que para demais modos de falhas apresentados, que a confiabilidade para estes tipos de subsistemas submetidos a desgaste começa a diminuir na medida em que o equipamento entra em operação, já que o parâmetro de localização $\gamma \neq 0$.

As Figuras 3.19 a 3.22 apresentam respectivamente as funções $f(T)$, $R(T)$, $P(T)$ e $\lambda(T)$ para o modo de falha em estudo, assim como o limite estabelecido pelo intervalo de confiança.

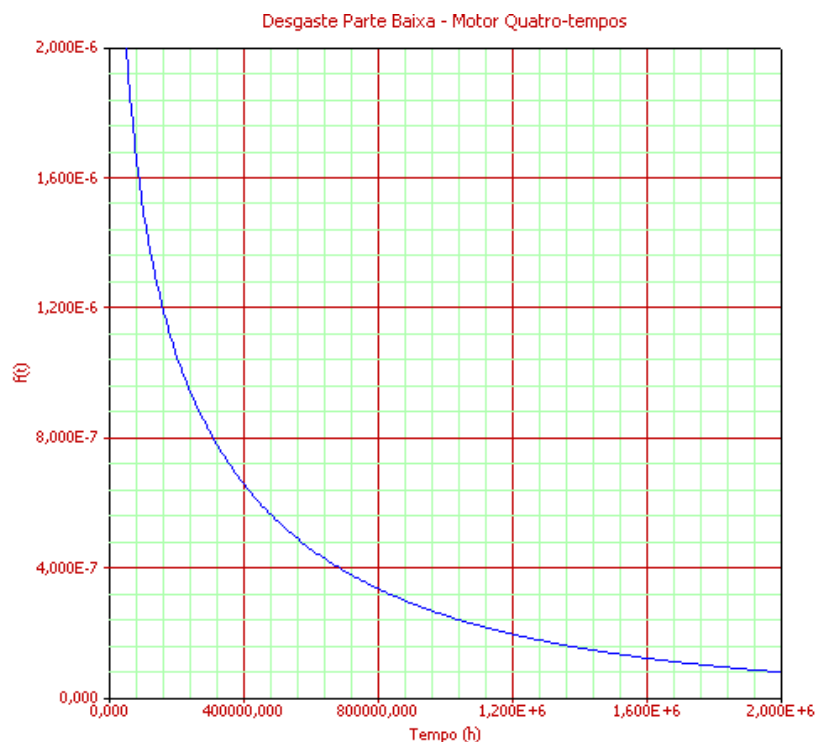


Figura 3.19 – Função $f(T)$ do Modo de Falha

É possível observar, a maior dispersão dos dados em comparação aos demais modos de falha, devido valor do parâmetro de forma β ser reduzido, diferindo dos demais modos de falha analisados, os quais apresentaram valores muito superiores a 1,0.

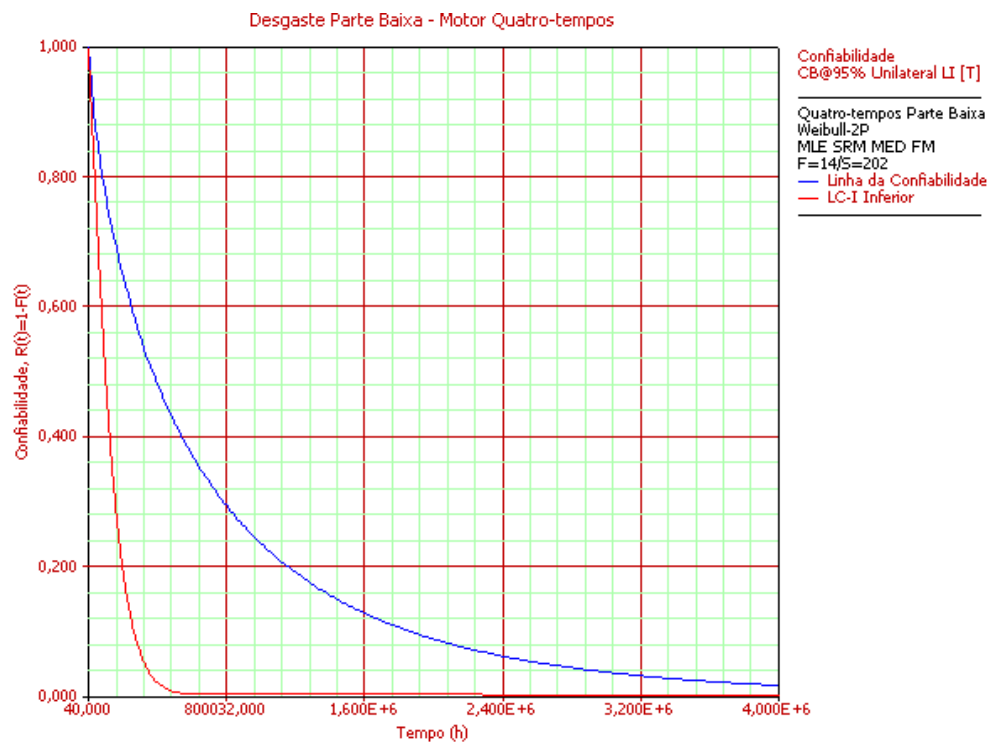


Figura 3.20 – Função $R(T)$ do Modo de Falha

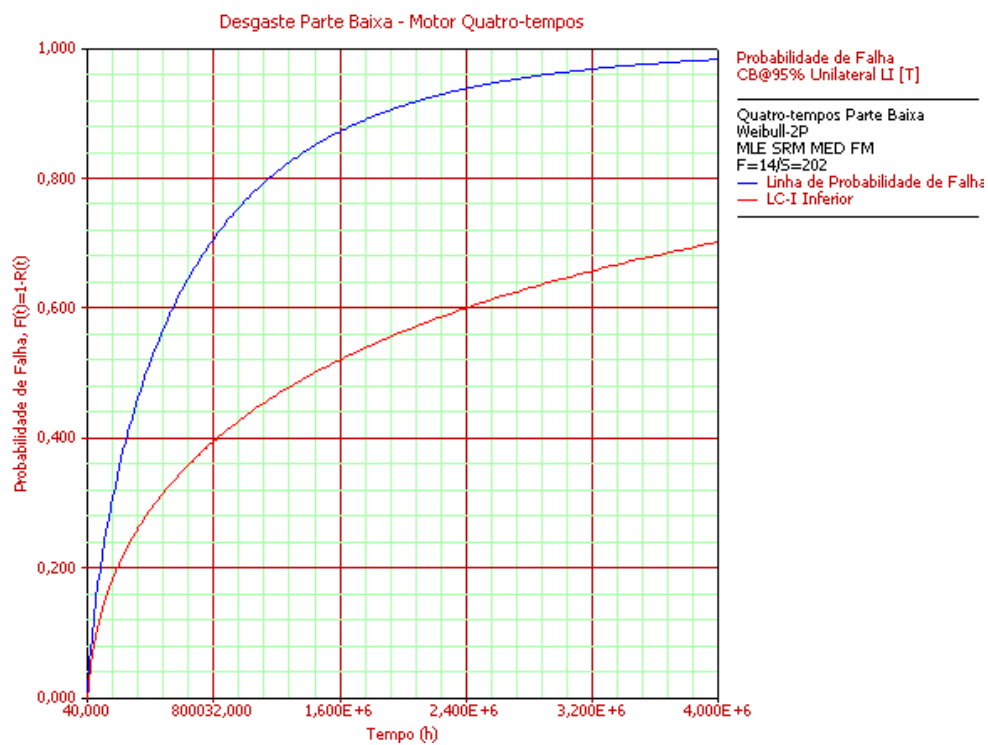


Figura 3.21 – Função $P(T)$ do Modo de Falha

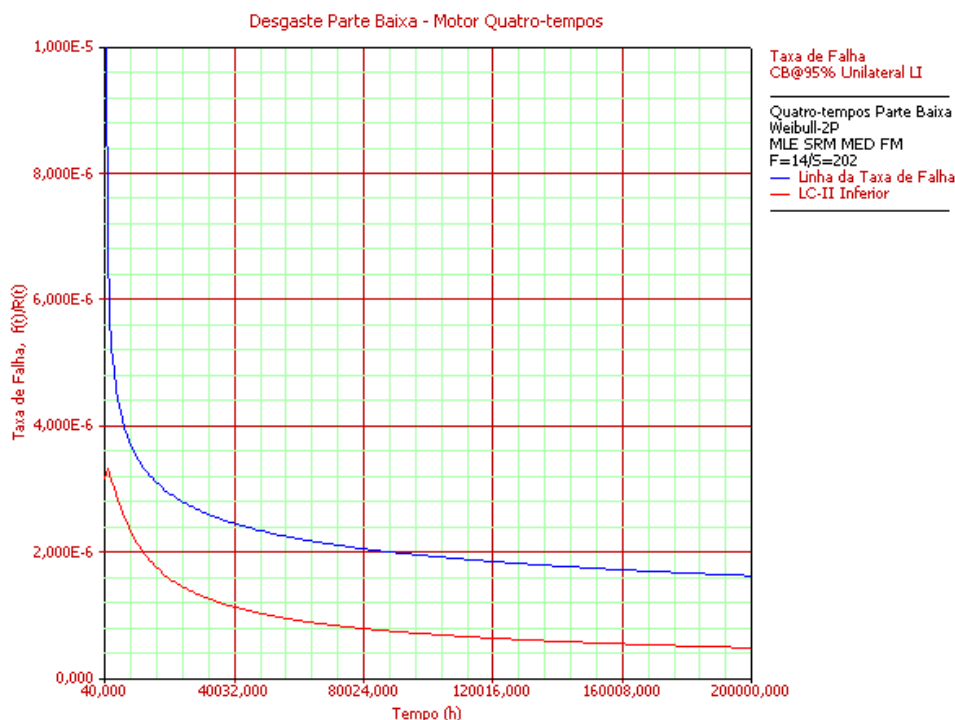


Figura 3.22 – Função Taxa de Falhas $\lambda(T)$ do Modo de Falha

O tempo de vida da parte baixa do motor quatro-tempos, para uma confiabilidade requerida de 95% e com 95% de precisão é de 11.275 horas tendo como limite mínimo correspondendo ao limite inferior do intervalo de confiança 6.052 horas.

A vida média, neste caso, é de 728.530 horas de operação, tendo como vida média mínima, correspondendo ao limite inferior do intervalo de confiança, 146.950 horas. Isso significa que em média, a parte baixa do motor poderá apresentar desgaste anormal a partir de 146.950 horas, com uma precisão de 95%.

3.2 MODELAGEM DOS SISTEMAS

Após a determinação das Distribuições dos subsistemas e de seus correspondentes comportamentos, realizou-se a modelagem dos modos de falhas de cada modelo de motor em estudo, utilizando a Técnica de Diagrama de Blocos, onde cada bloco corresponde a um subsistema dos motores (Parte Alta ou Parte Baixa), sendo o posicionamento dos mesmos em função da condição de projeto do equipamento.

Este processo de modelagem do sistema foi realizado utilizando o software Reliasoft BlockSim versão 6.5, conforme RELIASOFT (2006 c), através do qual é possível realizar os cálculos de confiabilidade e vida dos motores a partir do comportamento de cada componente. A Figura 3.23 apresenta uma idéia geral do software, contemplando a modelagem de um dos tipos de motores.

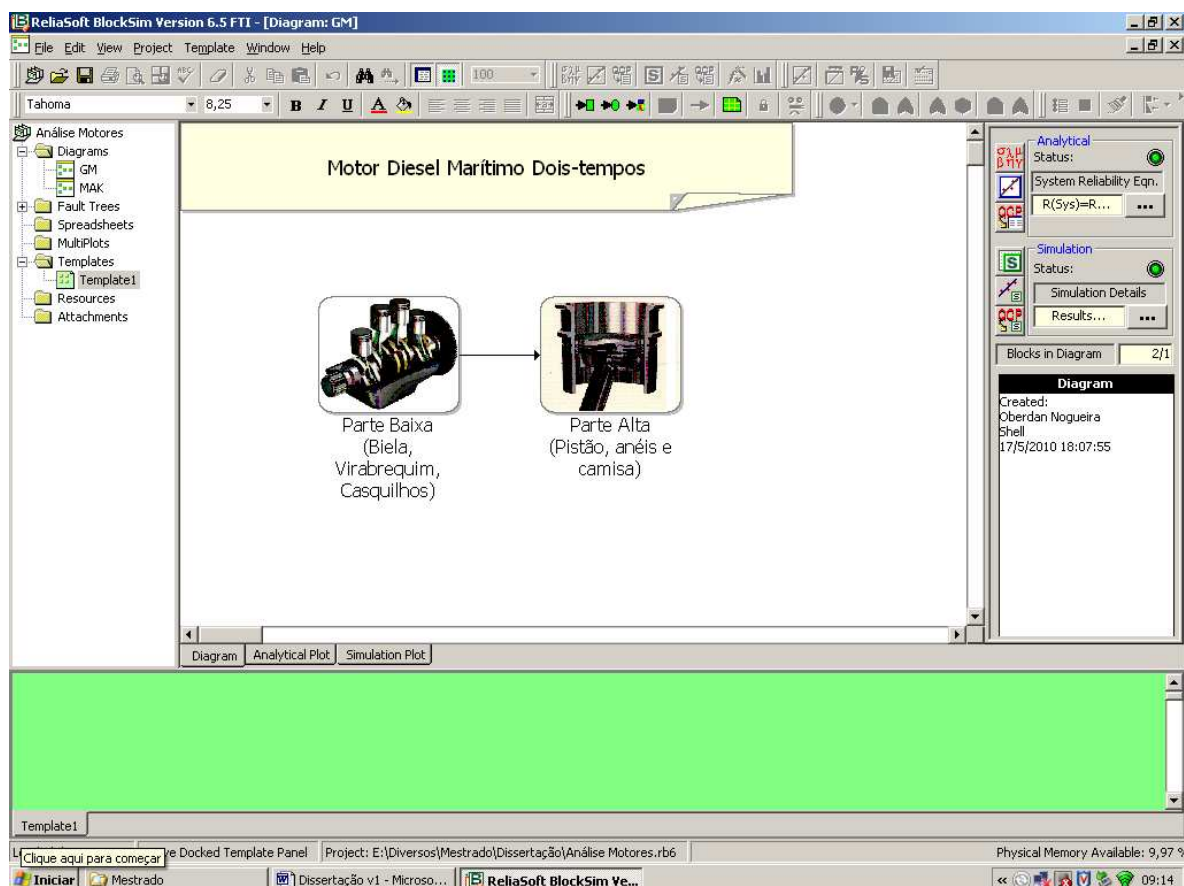


Figura 3.23 – Visão Geral do software Reliasoft BlockSim com o Diagrama de Blocos do motor dois-tempos

Da mesma forma como apresentado para cada modo de falha na seção 3.1, a seguir serão apresentados os cálculos para cada um dos tipos de motores em estudo e seus respectivos gráficos de comportamento:

- Função Densidade de Probabilidade $f(T)$;
- Comportamento da Confiabilidade $R(T)$;

- Comportamento da Probabilidade de Falhas $P(T)$;
- Comportamento da Taxa de Falhas $\lambda(T)$;
- Tempo Médio entre Falhas (MTBF);
- Tempo correspondente a confiabilidade requerida de 95%.

3.2.1 Motor Dois-tempos

A Figura 3.24 apresenta o Diagrama de Blocos correspondente ao motor diesel marítimo dois-tempos, composto pelos dois modos de falhas correspondentes, Parte Alta e Parte Baixa, sendo cada um deles representado por um bloco. Devido ao fato da falha de um dos componentes acarretar na perda da função do motor, o modelo adequado, de acordo com RELIASOFT (2006 c) é o modelo em série.

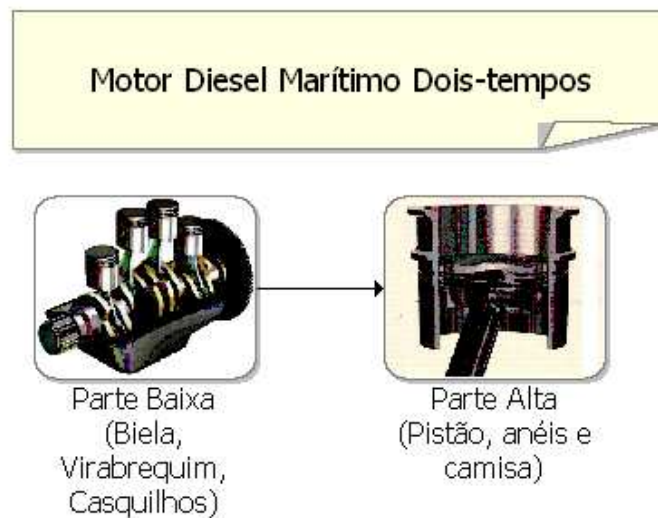


Figura 3.24 – Modelagem do Motor através da técnica de Diagrama de Blocos

Após a elaboração do diagrama, se fez necessária a configuração de cada bloco, importando os parâmetros da distribuição do software Weibull ++, determinados na seção 3.1. A Figura 3.25 apresenta o processo de configuração do bloco correspondente a Parte Baixa, já com a importação dos dados.

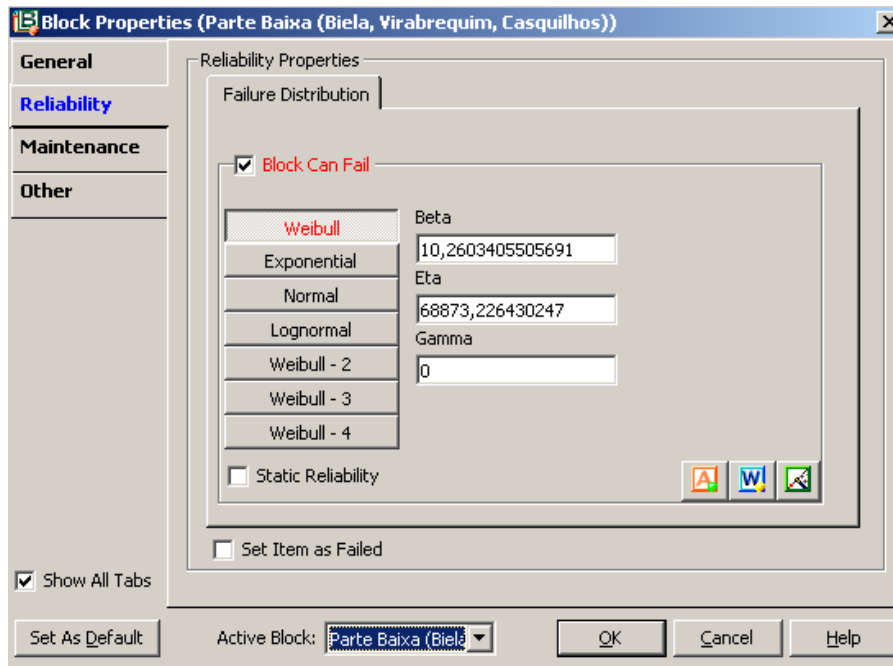


Figura 3.25 – Configuração do Bloco Parte Baixa do Motor Dois-tempos

Utilizando o mesmo processo, a Figura 3.26 apresenta a configuração do bloco Parte Alta do motor dois-tempos.

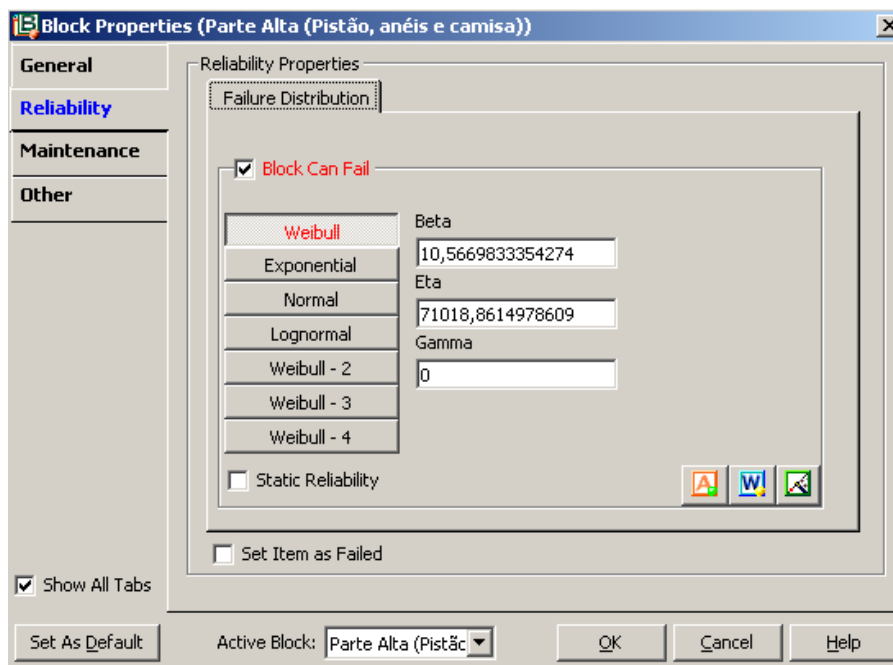


Figura 3.26 – Configuração do Bloco Parte Alta do Motor Dois-tempos

De posse de ambos os blocos devidamente configurados, determinou-se a equação final da confiabilidade do sistema, conforme apresentado na Figura 3.27.

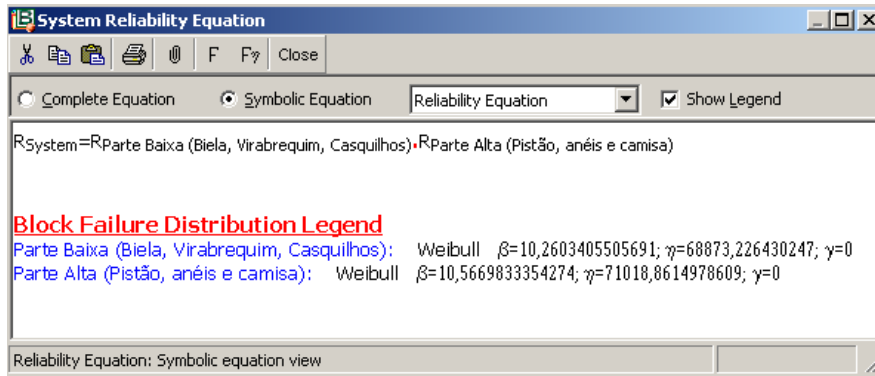


Figura 3.27 – Equação da Confiabilidade do sistema

Utilizando a ferramenta “Analytical Plot” do software foram gerados, com base nas configurações dos blocos e no arranjo dos blocos, os gráficos de comportamento das funções $f(T)$, $R(T)$, $P(T)$ e $\lambda(T)$ para o sistema. As Figuras 3.28 a 3.31 apresentam os referidos gráficos.

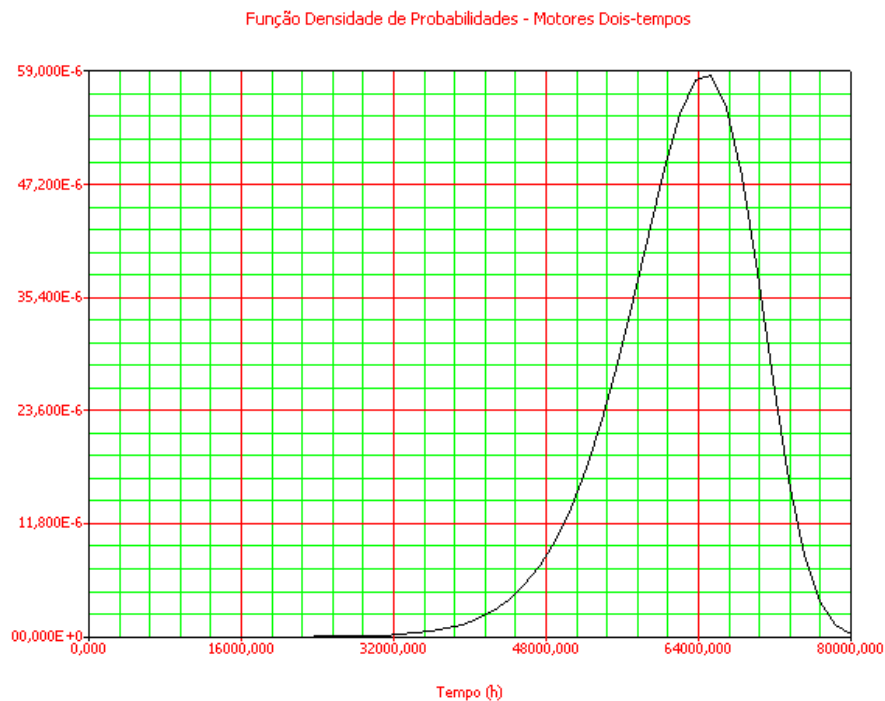


Figura 3.28 – Função $f(T)$ do sistema

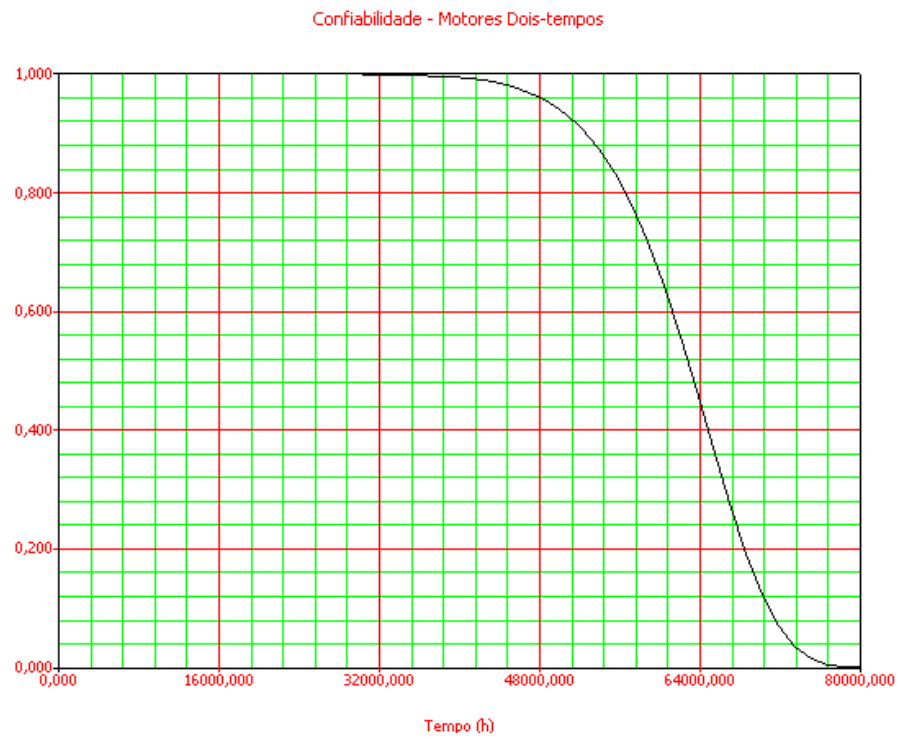


Figura 3.29 – Função $R(T)$ do sistema



Figura 3.30 – Função $P(T)$ do sistema

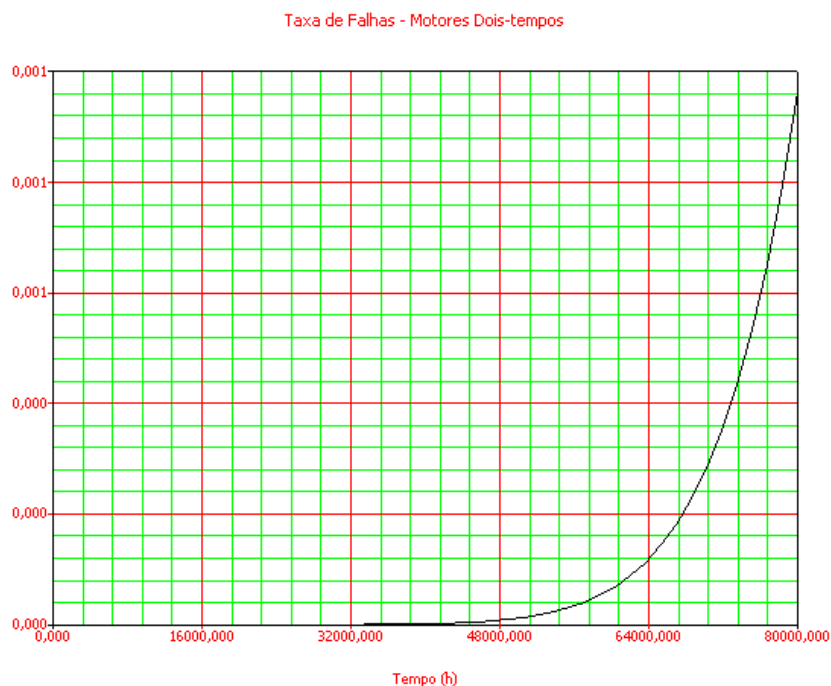


Figura 3.31 – Função $\lambda(T)$ do sistema

Da mesma forma que para os modos de falha, foram calculados o MTBF e o tempo de vida do sistema para uma confiabilidade mínima requerida de 95%. A Figura 3.32 apresenta o cálculo de confiabilidade requerida.

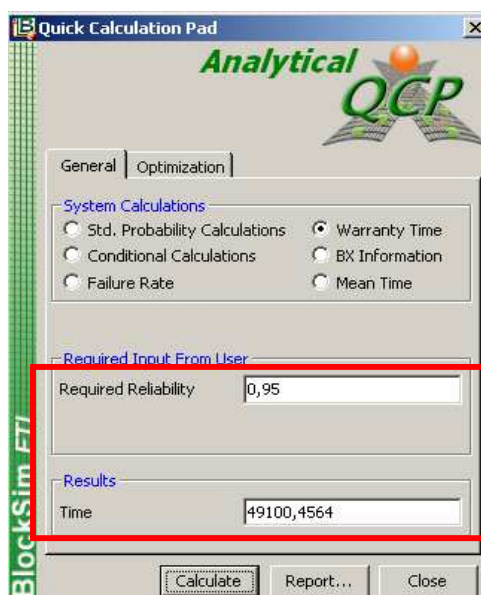


Figura 3.32 – Cálculo de tempo de uso do sistema para confiabilidade de 95%

É possível observar que, realizando o cálculo para uma confiabilidade requerida de 95%, e com 95% de precisão, obteve-se um tempo de 49.100 horas de operação, ou seja, a probabilidade de falhas do motor dois tempos será de apenas 5% quando os mesmos apresentarem 49.100 horas de operação.

A Figura 3.33 apresenta o cálculo de vida média ou tempo médio entre falhas para o motor.

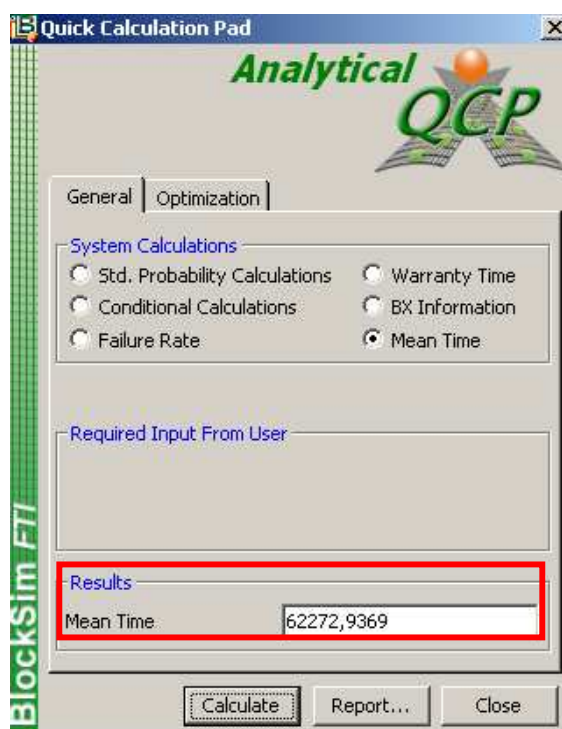


Figura 3.33 – Cálculo do MTBF do sistema

Obteve-se como resultado, com uma precisão de 95%, o período de 62.272 horas de operação, o que significa que em média, 50% dos motores apresentarão falha, ou seja, desgaste anormal (na Parte Alta ou na Parte Baixa) quando tiverem um tempo de operação de 62.272 horas.

3.2.2 Motor Quatro-tempos

O processo utilizado para a determinação dos parâmetros e comportamentos para o motor quatro-tempos foi o mesmo adotado para o motor dois-tempos. A Figura 3.34 apresenta o Diagrama de Blocos correspondente ao motor diesel marítimo quatro-tempos, composto pelos dois modos de falhas correspondentes, Parte Alta e Parte Baixa, sendo cada um deles representado por um bloco. Da mesma forma que para o motor dois-tempos, devido ao fato da falha de um dos componentes acarretar na perda da função do motor, o modelo adequado, de acordo com RELIASOFT (2006 c) é o modelo em série.

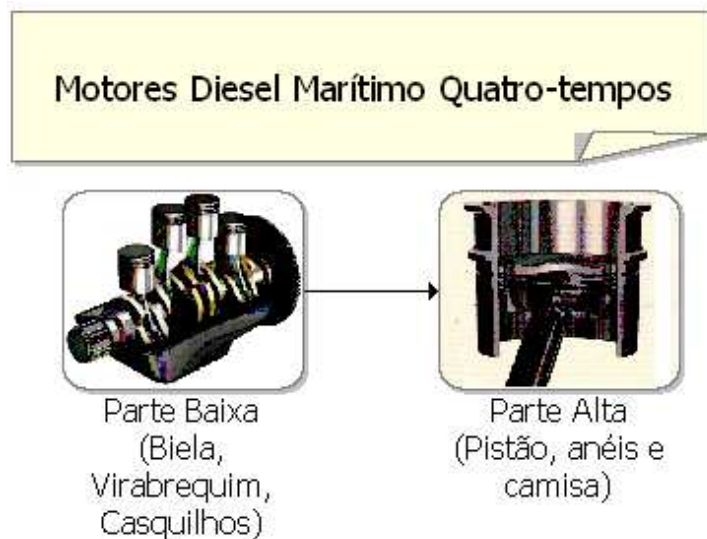


Figura 3.34 – Modelagem do Motor através da técnica de Diagrama de Blocos

Após a elaboração do diagrama, se fez necessária a configuração de cada bloco, importando os parâmetros da distribuição do software Weibull ++, apresentados na seção 3.1. A Figura 3.35 apresenta o processo de configuração do bloco correspondente a Parte Baixa, já com a importação dos dados.

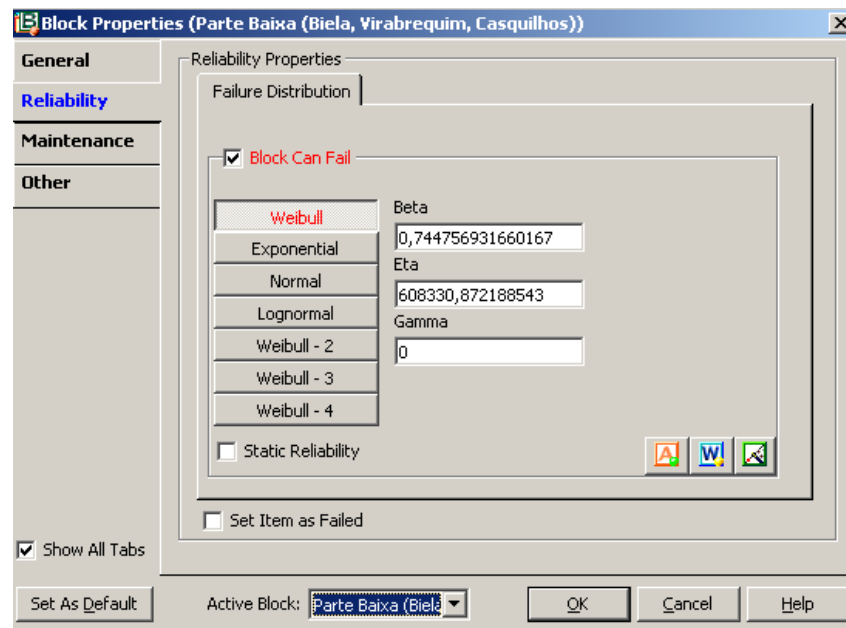


Figura 3.35 – Configuração do Bloco Parte Baixa do Motor Quatro-tempos

Utilizando o mesmo processo, a Figura 3.36 apresenta a configuração do bloco Parte Alta do motor quatro-tempos.

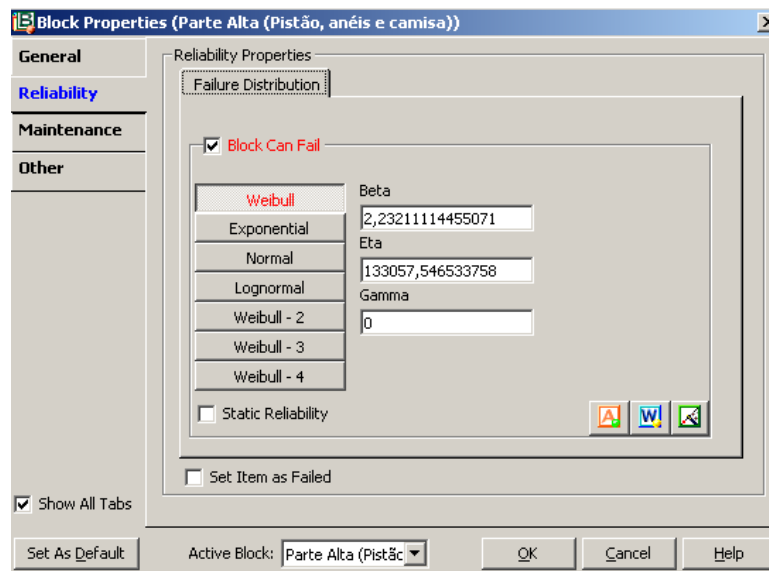


Figura 3.36 – Configuração do Bloco Parte Alta do Motor Quatro-tempos

De posse de ambos os blocos devidamente configurados, determinou-se a equação final da confiabilidade do sistema, conforme apresentado na Figura 3.37.

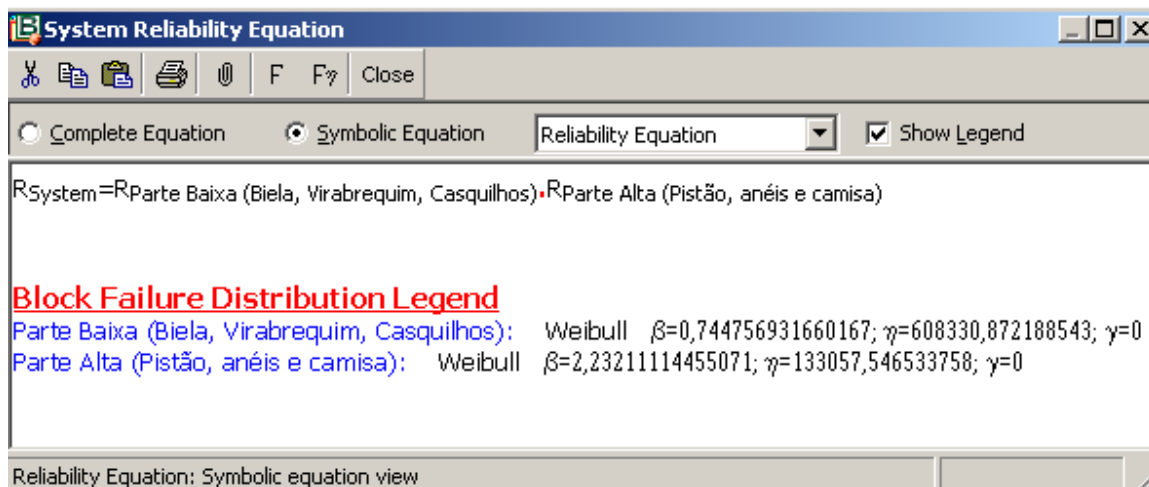


Figura 3.37 – Equação da Confiabilidade do sistema

Utilizando a mesma ferramenta adotada para a determinação dos gráficos do motor dois-tempos, foram gerados, com base nas configurações dos blocos e no arranjo dos blocos, os gráficos de comportamento das funções $f(T)$, $R(T)$, $P(T)$ e $\lambda(T)$ para o motor quatro-tempos. As Figuras 3.38 a 3.41 apresentam os referidos gráficos.

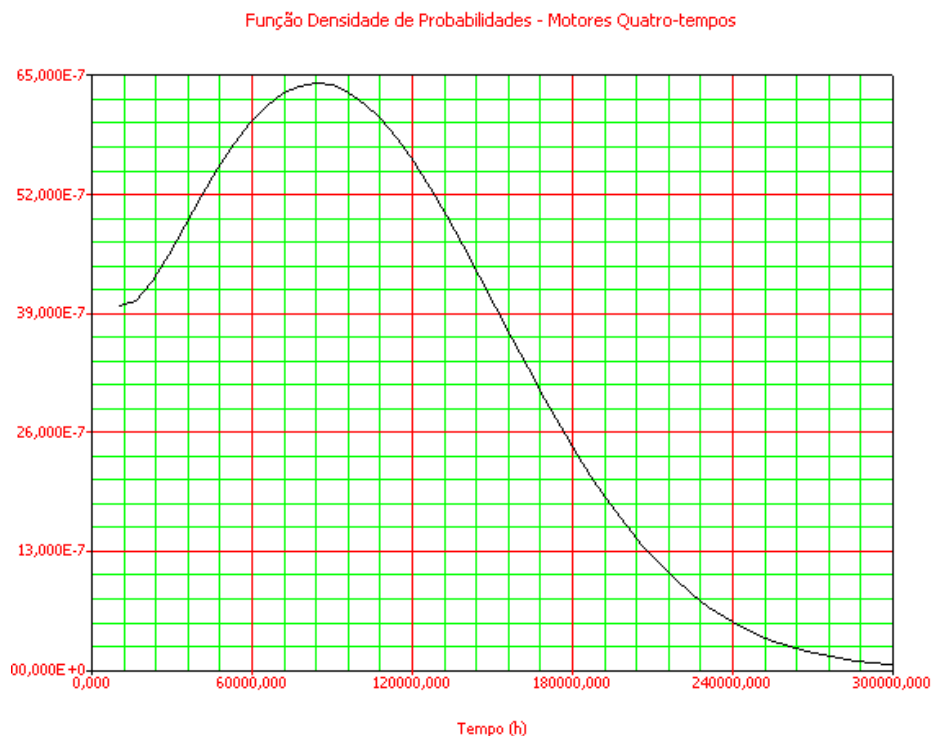


Figura 3.38 – Função $f(T)$ do sistema

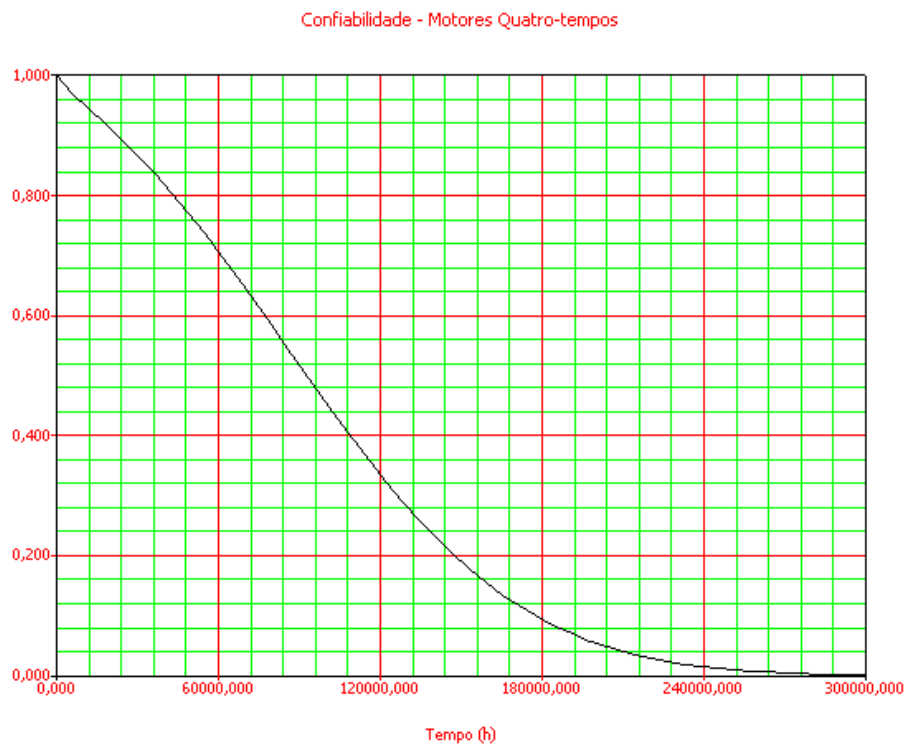


Figura 3.39 – Função $R(T)$ do sistema

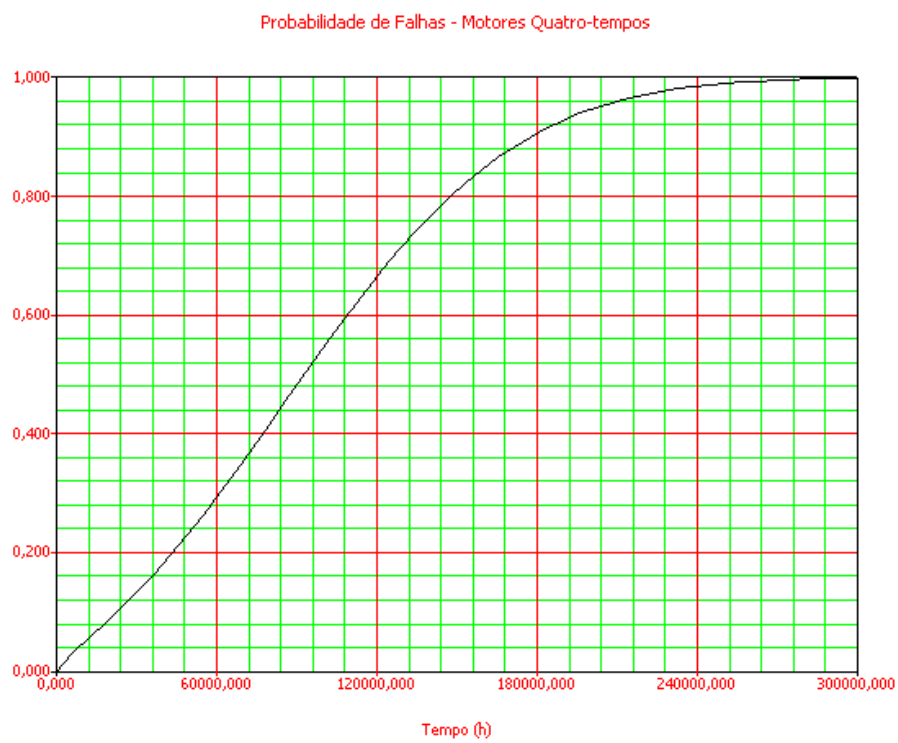


Figura 3.40 – Função $P(T)$ do sistema

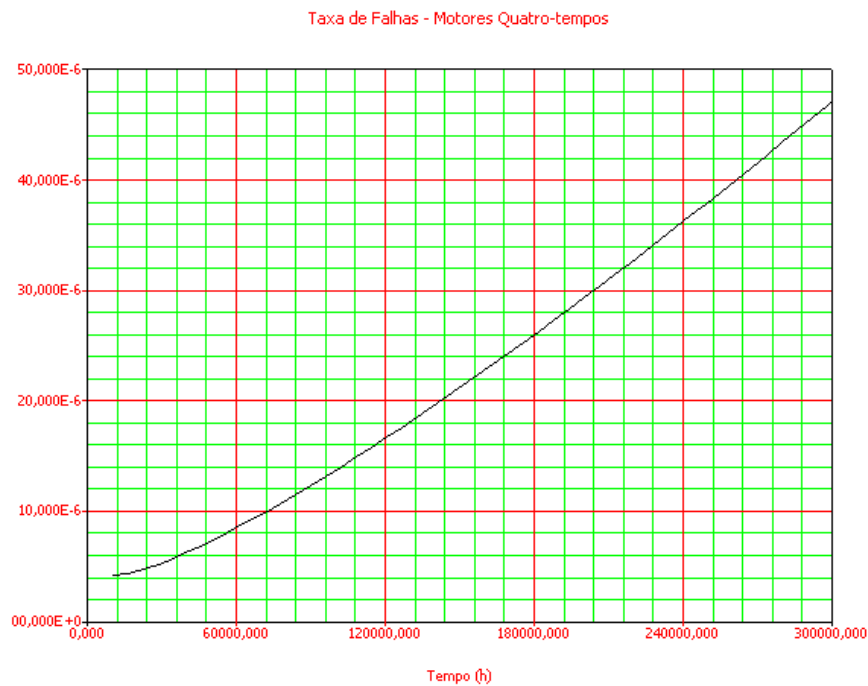


Figura 3.41 – Função $\lambda(T)$ do sistema

O processo utilizado para a determinação do MTBF e do tempo de vida do sistema para uma confiabilidade mínima requerida de 95% foi o mesmo aplicado nos motores dois-tempos. A Figura 3.42 apresenta o cálculo de confiabilidade requerida.

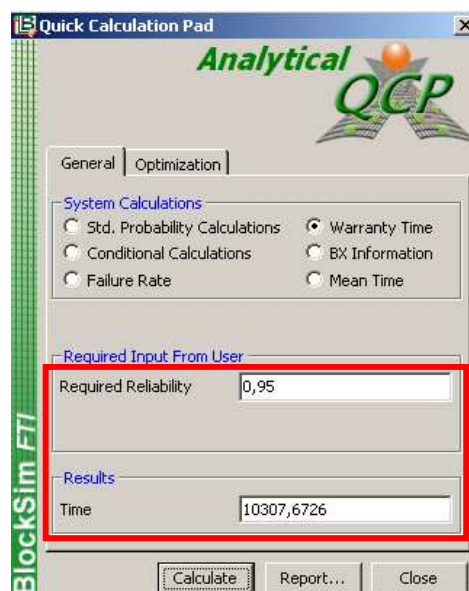


Figura 3.42 – Cálculo de tempo de uso do sistema para confiabilidade de 95%

É possível observar que, realizando o cálculo para uma confiabilidade requerida de 95%, e com 95% de precisão, obteve-se um tempo de 10.307 horas de operação, ou seja, a probabilidade de falhas do motor quatro-tempos será de apenas 5% quando os mesmos apresentarem 10.307 horas de operação.

A Figura 3.43 apresenta o cálculo de vida média ou tempo médio entre falhas para o motor.

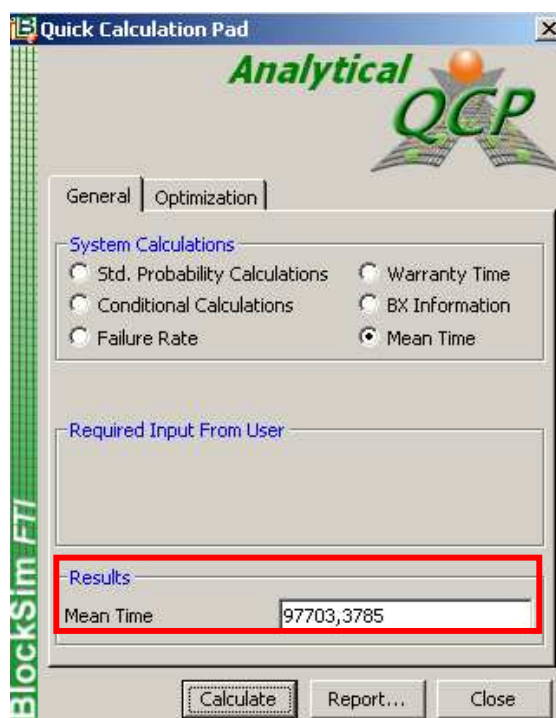


Figura 3.43 – Cálculo do MTBF do sistema

Obteve-se como resultado, com uma precisão de 95%, o período de 97.703 horas de operação, o que significa que em média, 50% dos motores apresentarão falha, ou seja, desgaste anormal (na Parte Alta ou na Parte Baixa) quando tiverem um tempo de operação de 97.703 horas.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODOS DE FALHAS

De posse de todas as informações pertinentes para cada modo de falha, realizou-se a comparação dos modos de falha semelhantes, ou seja, Parte Alta do motor dois-tempos com o mesmo subsistema do motor quatro-tempos, e Parte baixa do motor dois-tempos com o mesmo modo de falha do motor quatro tempos, com o objetivo de evidenciar as principais diferenças sob o ponto de vista de manutenibilidade e vida útil, considerando as condições operacionais dos equipamentos e sua concepção de projeto.

4.1.1 Partes Altas dos Motores

A Tabela 4.1 apresenta a comparação entre os modos de falha “Parte Alta” dos motores dois-tempos e quatro-tempos, utilizando como referência os cálculos realizados no capítulo anterior.

Tabela 4.1 – Resultados obtidos para os modos de falha Parte Alta dos motores

<i>Parâmetro</i>	<i>Motor dois-tempos</i>	<i>Motor quatro-tempos</i>
Fator de forma β	10,56	2,23
Fator de escala η	71.019	133.060
T para $R(T)=95%$ (horas)	53.617	35.167
$T_{min.}$ para $R(T)=95%$ (horas)	49.579	21.813
$MTBF$ (horas)	67.719	117.850
$MTBF$ mín. (horas)	57.024	37.822
Taxa de Falhas $\lambda(T)$	Crescente	Crescente

É possível observar através do fator de forma β a diferença em termos de dispersão dos dados referentes à parte alta do motor quatro-tempos em comparação aos dados do motor dois-tempos. A Figura 4.1 apresenta a comparação entre as funções densidades de probabilidades dos dois modos de falhas, evidenciando graficamente a diferença entre dispersões.

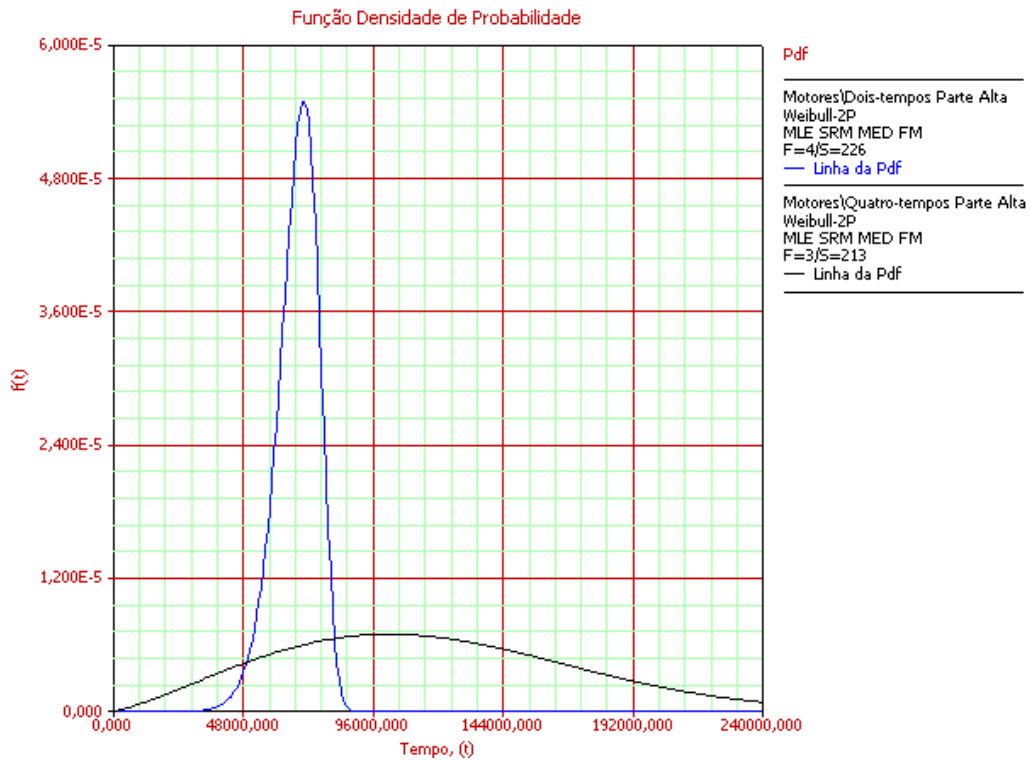


Figura 4.1 – Gráfico comparativo das funções $f(T)$

Além disso, observa-se que os dados dos motores dois-tempos concentram-se em intervalos de tempos menores, o que é evidenciado através da diferença dos fatores de escala η dos dois modos de falhas. Esse aspecto sugere que em média, as partes altas dos motores quatro-tempos apresentam maior vida útil que dos motores dois tempos.

Para verificação dessa suspeita, realizou-se o teste de comparação dos dados, utilizando o modelo proposto por Brown e Rutenmiller, conforme apresentado por RELIASOFT (2006 b). O resultado do teste está sendo apresentado na Figura 4.2.

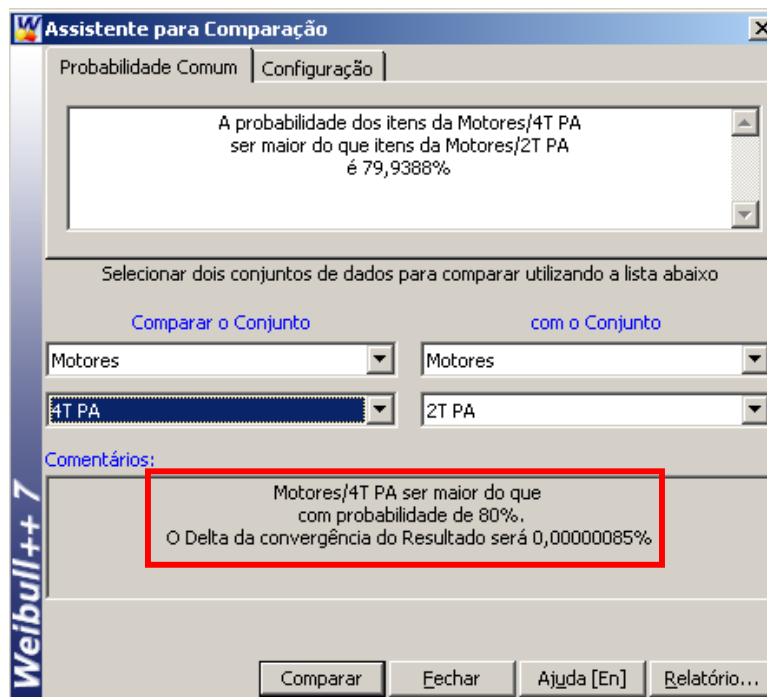


Figura 4.2 – Teste de Comparação de Brown e Rutemiller

É possível constatar através do teste de comparação que a probabilidade da Parte Alta dos motores quatro-tempos apresentarem maior vida útil que a Parte Alta dos motores dois-tempos é de 80%, o que, de acordo com RELIASOFT (2006 b), permite concluir que a vida útil destes componentes do motor quatro-tempos é efetivamente maior que no motor dois-tempos.

Outro aspecto importante a ser analisado são os tempos mínimos correspondentes a confiabilidade requerida de 95%. Este aspecto permite comparar os modos de falha sob o ponto de vista de manutenibilidade, ou seja, a necessidade de investimentos em técnicas de manutenção preventiva e preditiva para minimizar a probabilidade de falhas em operação. A Figura 4.3 apresenta o gráfico comparativo da confiabilidade para estes modos de falha, e a Figura 4.4 apresenta a comparação da probabilidade de falhas para os mesmos.

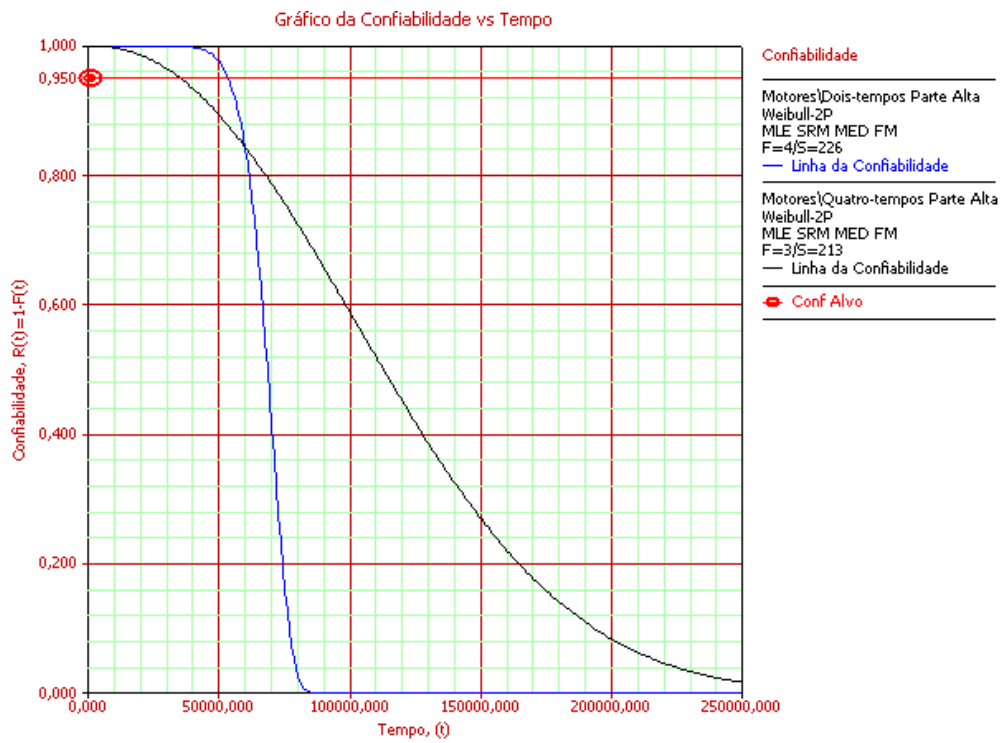


Figura 4.3 – Gráfico comparativo das funções $R(T)$

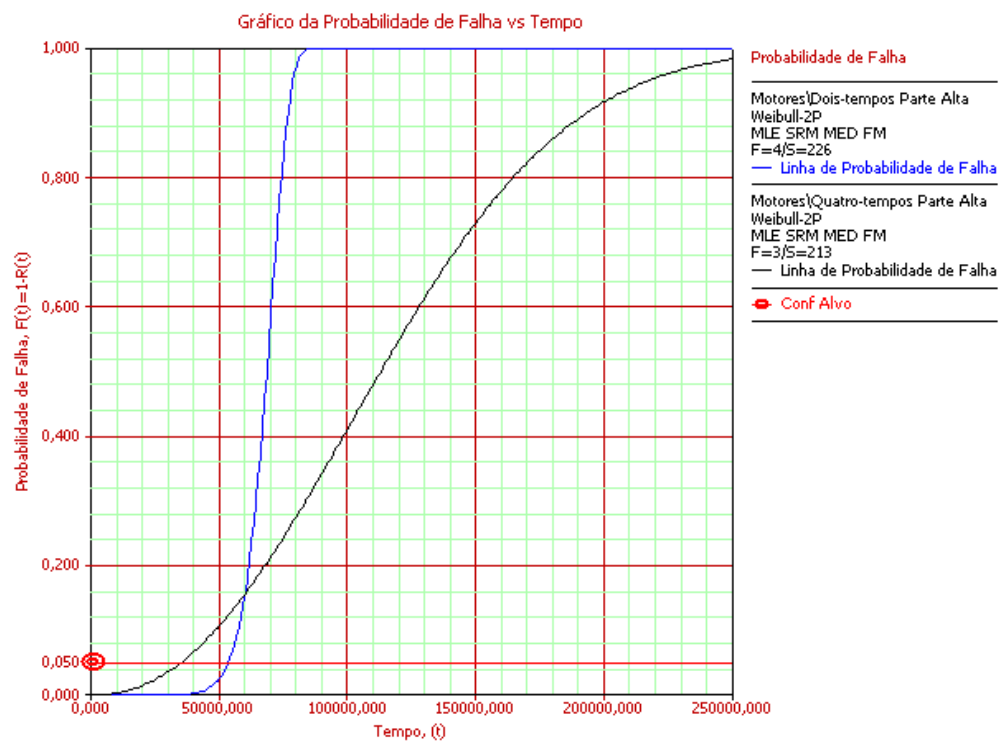


Figura 4.4 – Gráfico comparativo das funções $P(T)$

É possível constatar, através dos gráficos acima que, apesar da confiabilidade da parte alta do motor quatro-tempos diminuir (e a probabilidade de falhas aumentar) de maneira menos abrupta que no motor dois-tempos, o período de tempo para a confiabilidade operacional mínima requerida de 95% é maior para a parte alta do motor dois-tempos, o que é uma vantagem sob o ponto de vista de manutenção e operação.

Analisando os estágios de vida útil em que se encontram os modos de falhas em estudo, observa-se, através do fator de forma β que em ambos os casos os mesmos se encontram na fase de final de vida útil da Curva da Banheira. A Figura 4.5 evidencia esta condição.

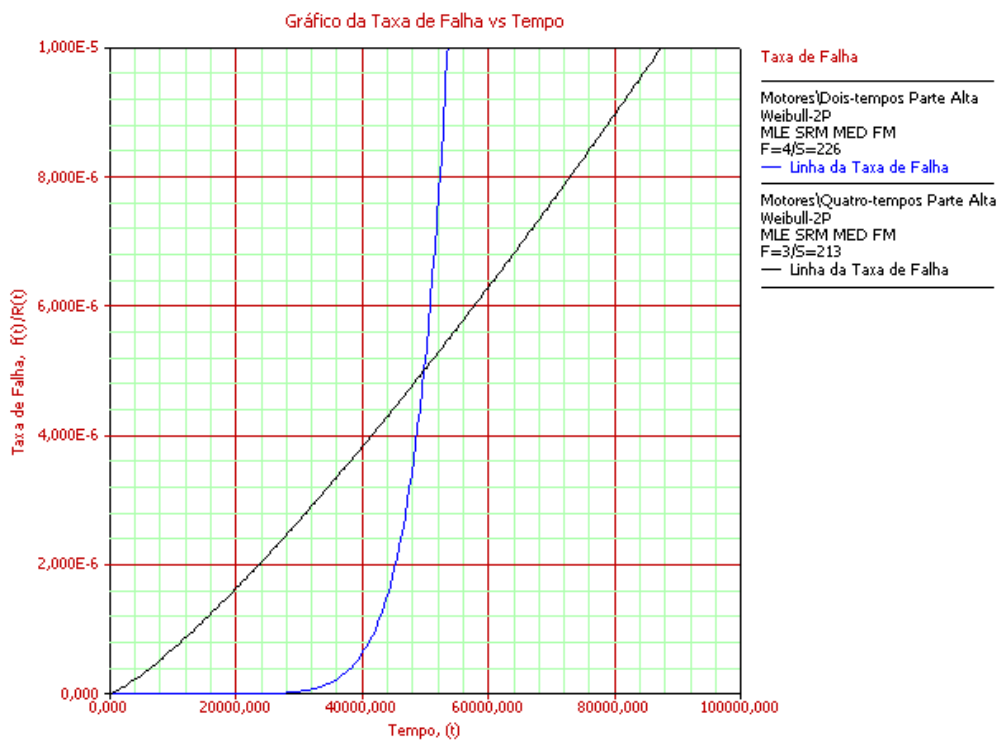


Figura 4.5 – Gráfico comparativo das funções $\lambda(T)$

É possível observar que, enquanto a Parte Alta do motor quatro-tempos aumenta desde seu tempo inicial de operação, no caso do motor dois-tempos esse fenômeno passa a se tornar visível após um determinado período de tempo, o que também é uma vantagem sob o ponto de vista de mantabilidade.

4.1.2 Partes Baixas dos Motores

A tabela 4.2 apresenta a comparação entre os modos de falha “Parte Baixa” dos motores dois-tempos e quatro-tempos, utilizando como referência os cálculos realizados no capítulo anterior.

Tabela 4.2 – Resultados obtidos para os modos de falha Parte Baixa dos motores

<i>Parâmetro</i>	<i>Motor dois-tempos</i>	<i>Motor quatro-tempos</i>
Fator de forma β	10,26	0,74
Fator de escala η	68.873	609.330
T para $R(T)=95\%$ (horas)	51.562	11.275
$T_{min.}$ para $R(T)=95\%$ (horas)	48.245	6.052
$MTBF$ (horas)	65.593	728.530
$MTBF$ mín. (horas)	57.711	146.950
Taxa de Falhas $\lambda(T)$	Crescente	Decrescente

É possível observar através do fator de forma β a grande diferença em termos do comportamento dos dados referentes à parte baixa do motor quatro-tempos em comparação aos dados do motor dois-tempos. A Figura 4.6 apresenta a comparação entre as funções densidades de probabilidades dos dois modos de falhas.

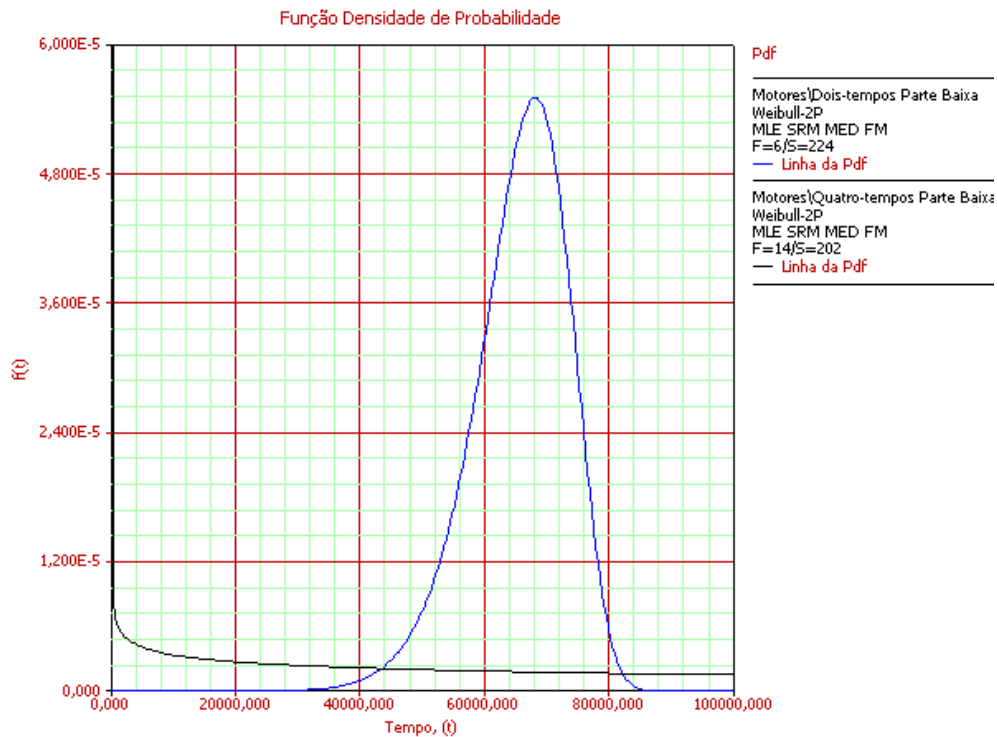


Figura 4.6 – Gráfico comparativo das funções $f(T)$

É possível observar através do gráfico que, enquanto a parte baixa dos motores dois-tempos se comporta como semelhante as partes altas dos dois tipos de motores, a parte baixa do motor quatro-tempos apresenta comportamento semelhante a distribuição exponencial. Além disso, os dados dos motores dois-tempos concentram-se em intervalos de tempos menores, o que é evidenciado através da diferença dos fatores de escala η dos dois modos de falhas. Esse aspecto sugere que em média, as partes baixas dos motores quatro-tempos apresentam maior vida útil que dos motores dois tempos.

Para verificação dessa suspeita, realizou-se, da mesma forma como feito para as partes altas, o teste de comparação dos dados, utilizando o modelo proposto por Brown e Rutenmiller, conforme apresentado por RELIASOFT (2006 b). O resultado do teste está sendo apresentado na Figura 4.7.

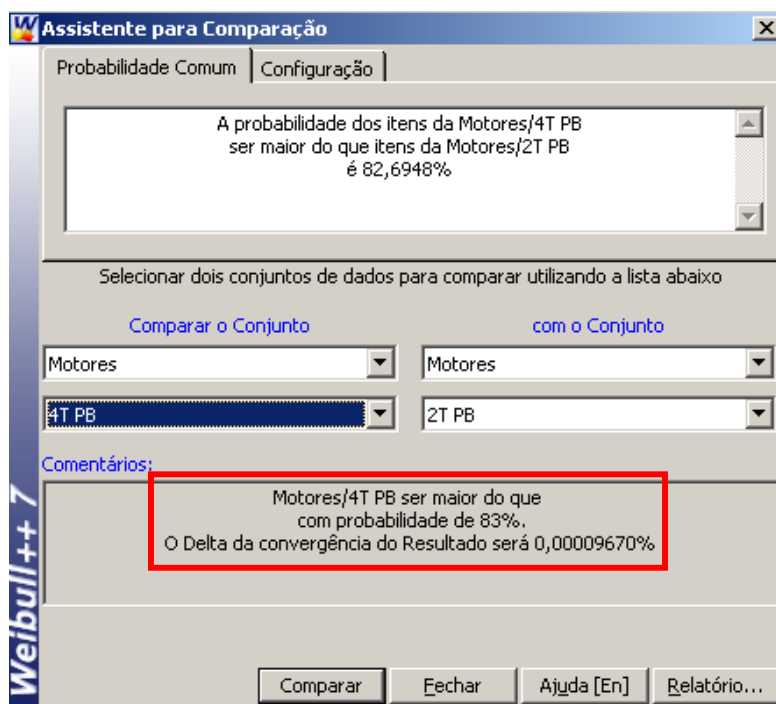


Figura 4.7 – Teste de Comparação de Brown e Rutemiller

É possível constatar através do teste de comparação que a probabilidade da Parte Baixa dos motores quatro-tempos apresentarem maior vida útil que a Parte Baixa dos motores dois-tempos é de 83%, o que, de acordo com RELIASOFT (2006 b), permite concluir que a vida útil destes componentes do motor quatro-tempos é efetivamente maior que no motor dois-tempos.

Outro aspecto importante a ser analisado são os tempos mínimos correspondentes a confiabilidade requerida de 95%. Este aspecto, conforme exposto anteriormente, permite comparar os modos de falha sob o ponto de vista de manutenibilidade, ou seja, a necessidade de investimentos em técnicas de manutenção preventiva e preditiva para minimizar a probabilidade de falhas em operação. A Figura 4.8 apresenta o gráfico comparativo da confiabilidade para estes modos de falha, e a Figura 4.9 apresenta a comparação da probabilidade de falhas para os mesmos.

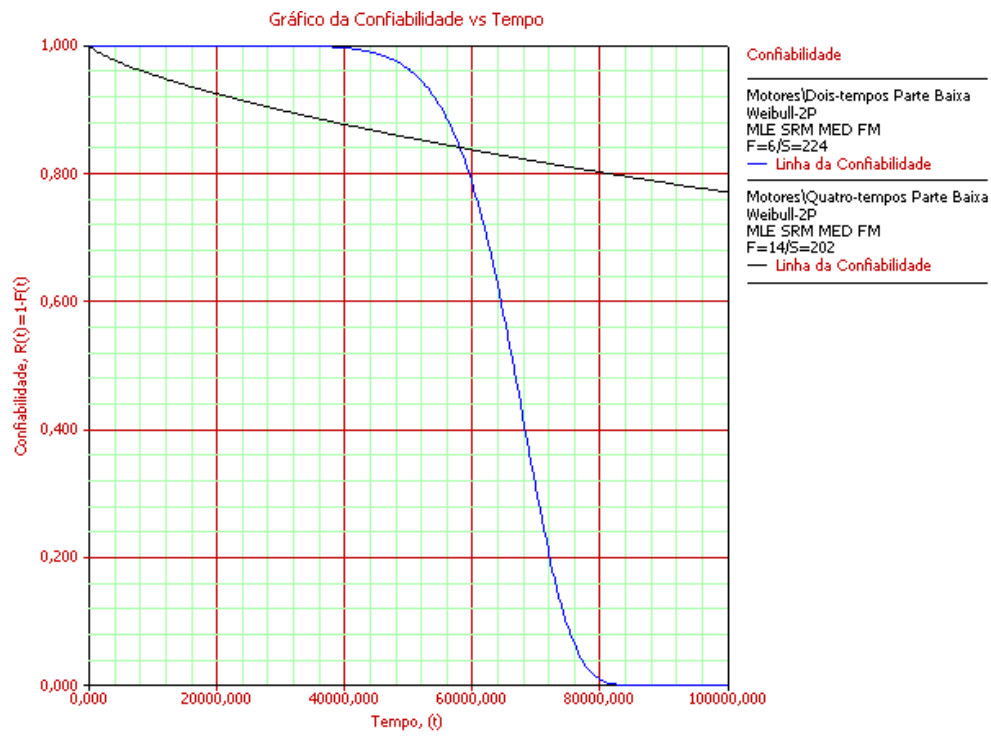


Figura 4.8 – Gráfico comparativo das funções $R(T)$

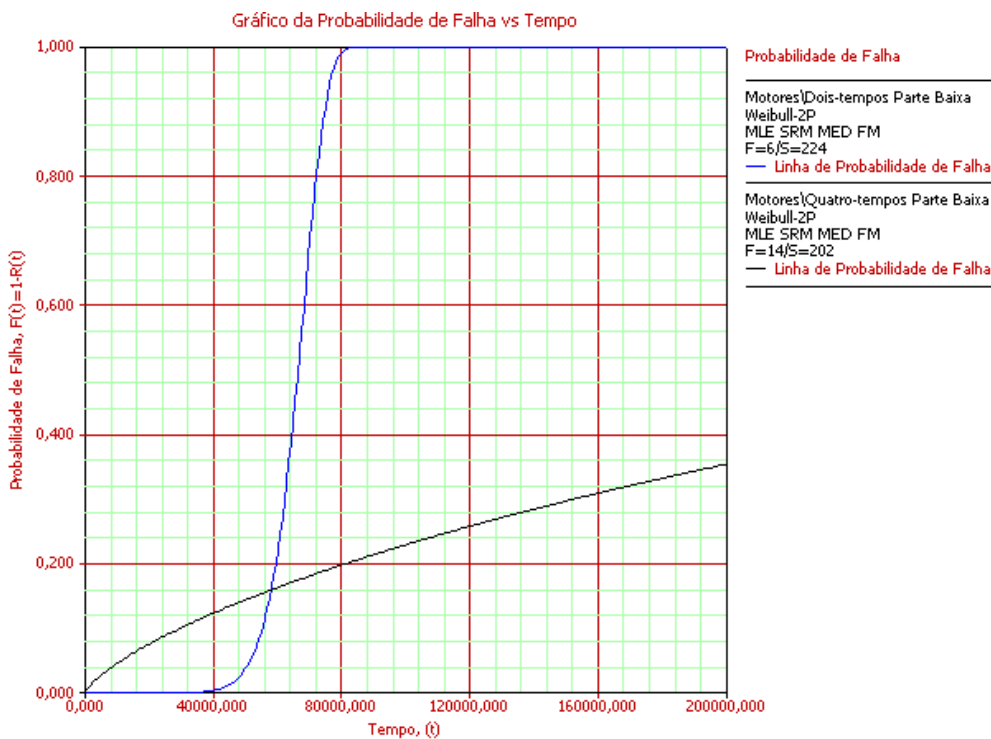


Figura 4.9 – Gráfico comparativo das funções $P(T)$

É possível constatar, da mesma forma que para a análise das partes altas, que apesar da confiabilidade da parte baixa do motor quatro-tempos diminuir (e a probabilidade de falhas aumentar) de maneira menos abrupta que no motor dois-tempos, o período de tempo para a confiabilidade operacional mínima requerida de 95% é significativamente maior para a parte baixa do motor dois-tempos, o que é uma vantagem sob o ponto de vista de manutenção e operação.

Analisando os estágios de vida útil em que se encontram os modos de falhas em estudo, observa-se, através do fator de forma β que, enquanto a parte baixa do motor dois-tempos encontra-se na fase de final de vida útil da Curva da Banheira, a parte baixa do motor quatro-tempos encontra-se ainda na fase de mortalidade infantil, tendendo a fase de vida útil. A Figura 4.10 evidencia esta condição.

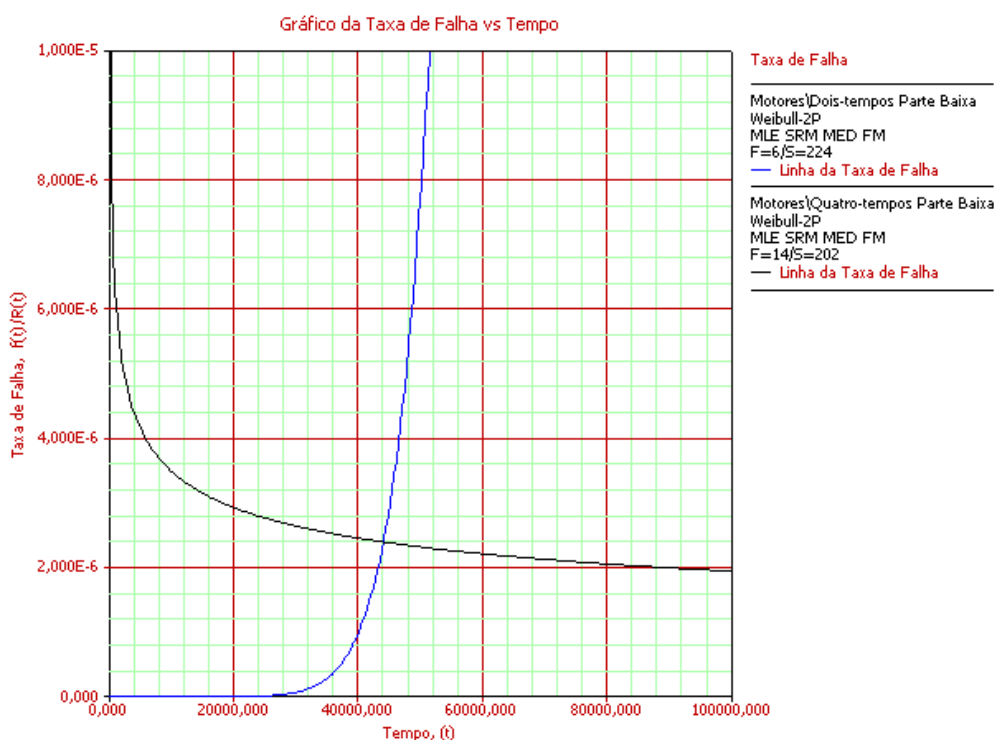


Figura 4.10 – Gráfico comparativo das funções $\lambda(T)$

É possível observar que, enquanto a Parte Baixa do motor quatro-tempos vem diminuindo sua taxa de falhas desde seu tempo inicial de operação, no caso do motor dois-tempos ocorre o acréscimo da mesma a partir de um determinado período de uso.

Para os motores quatro-tempos, enquanto a parte alta encontra-se com a taxa de falhas crescente (final de vida útil), a parte baixa dos motores ainda apresentam taxa de falhas decrescente. Considerando os limites de confiança estabelecidos, é possível observar que o valor de β para a parte baixa destes motores pode ser considerada com tendência a falhas aleatórias ($\beta=1$). Esta diferença é muito importante em termos da definição da melhor estratégia de manutenção a ser aplicada em cada caso.

4.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MOTORES

Após realizar a análise comparativa dos modos de falhas dos dois tipos de motores em estudo, realizou-se a análise comparativa dos motores, levando em consideração os mesmos conceitos adotados na análise dos componentes.

A Tabela 4.3 apresenta a comparação dos principais resultados encontrados para os dois tipos de motores, utilizando como referência os cálculos realizados no Capítulo 3.

Tabela 4.3 – Resultados obtidos para os dois tipos de motores

<i>Parâmetro</i>	<i>Motor dois-tempos</i>	<i>Motor quatro-tempos</i>
<i>T para $R(T)=95%$ (horas)</i>	49.100	10.307
<i>MTBF (horas)</i>	62.272	97.703
<i>Taxa de Falhas $\lambda(T)$</i>	Crescente	Crescente

A Figura 4.11 apresenta a comparação entre as funções densidades de probabilidades dos dois modos de falhas.

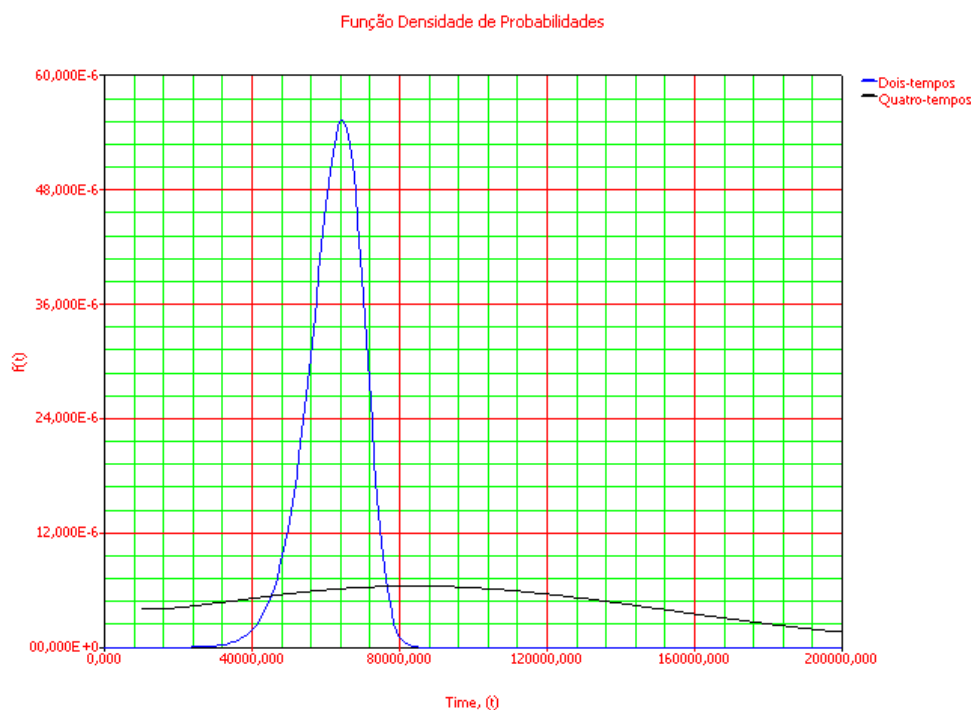


Figura 4.11 – Gráfico comparativo das funções $f(T)$ dos motores

É possível observar-se a reduzida dispersão da função densidade de probabilidade dos motores dois-tempos em comparação aos de quatro-tempos.

Outro aspecto de extrema importância está relacionado à vida útil dos motores. É possível constatar, conforme apresentado na seção 4.1, que os motores quatro-tempos apresentam maior vida útil que os motores dois-tempos. Esta constatação poderia estar sustentada pelo fato de que, enquanto o motor dois tempos está submetido a elevadas pressões oriundas da combustão a cada giro de 360° do eixo virabrequim, o motor quatro-tempos fica exposto a esta situação com menor intensidade, já que, devido a sua concepção de projeto, este tipo de motor ficaria exposto a estes esforços a cada 720° de rotação do referido eixo. Porém, é possível observar através da Figura 4.10 que a taxa de falhas para a parte baixa do motor quatro-tempos, para um tempo de operação elevado tende a permanecer constante. Caso esta suposição fosse verdadeira, a taxa de falhas desse componente deveria apresentar comportamento crescente, o que não ocorre. Por isso, a maior vida útil do motor quatro-tempos não está condicionada exclusivamente devido à menor severidade operacional, mas provavelmente se deve ao projeto e dimensionamento dos mesmos.

Com o objetivo de analisar o comportamento dos tipos de motores sob o aspecto confiabilidade e probabilidades de falhas, as Figuras 4.12 e 4.13 apresentam os gráficos comparativos das funções $R(T)$ e $P(T)$ para os equipamentos em estudo.

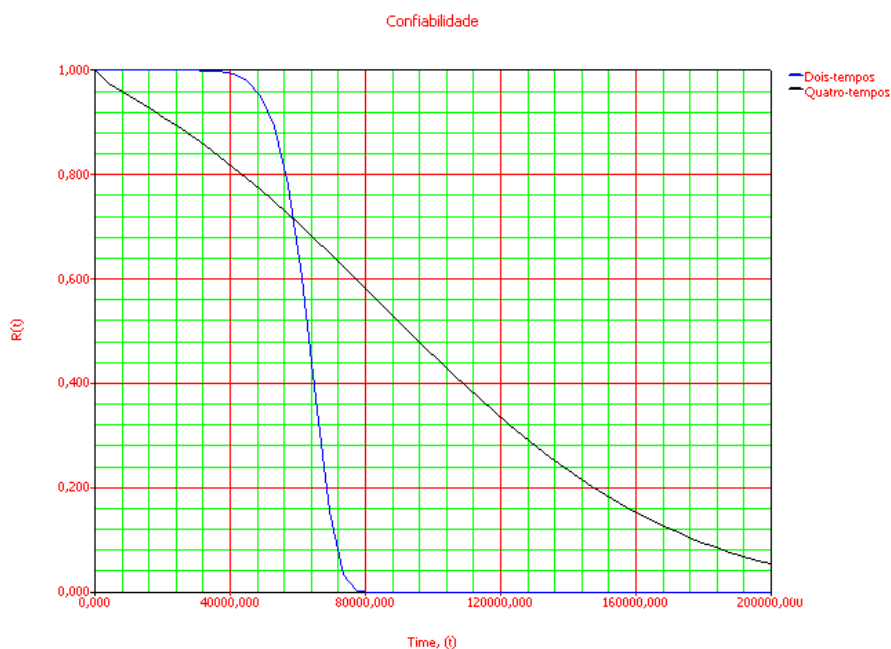


Figura 4.12 – Gráfico comparativo das Confiabilidades $R(T)$ dos motores

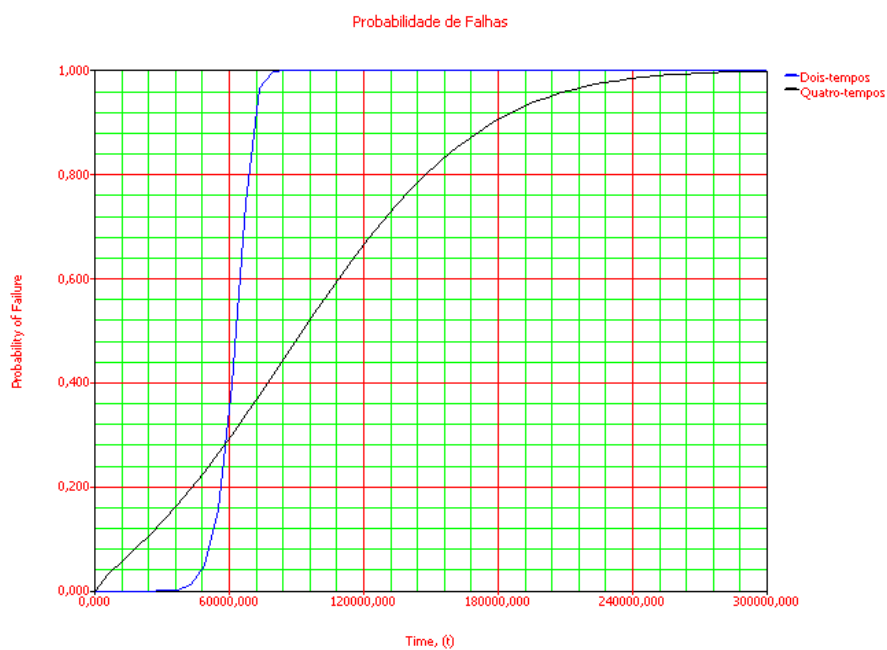


Figura 4.13 – Gráfico comparativo das Probabilidades de Falhas $P(T)$ dos motores

É possível constatar que, enquanto os motores dois-tempos apresentam elevada confiabilidade durante o início de vida útil, os motores quatro-tempos demonstram a queda gradativa da confiabilidade desde o início de operação. Este aspecto, sob o ponto de vista de manutenção, é muito importante, visto a grande necessidade de confiabilidade dos equipamentos em operação.

Este ponto pode ser evidenciado também através dos resultados de tempos de operação para uma mesma confiabilidade requerida, no caso, de 95%, ou seja, espera-se que a probabilidade de ocorrência de desgastes anormais nos motores (parte alta ou parte baixa) em um dado tempo t seja inferior a 5%.

É possível constatar que o tempo de operação para os motores dois tempos (49.100 horas) é muito superior ao dos motores quatro-tempos (aproximadamente 10.300 horas). Este fato permite concluir que os motores dois-tempos apresentam maior previsibilidade de falhas do que os motores quatro-tempos, sobretudo durante os períodos de vida útil dos motores dois tempos.

Estas informações são de extrema importância para a determinação dos intervalos ótimos para intervenções nos equipamentos, nos casos de utilização de manutenção preventiva sistemática, ou ainda para a determinação dos intervalos para a aplicação de técnicas de manutenção preditiva. Estes aspectos foram confirmados através da análise do comportamento das taxas de falhas dos motores, conforme apresentado na Figura 4.14.

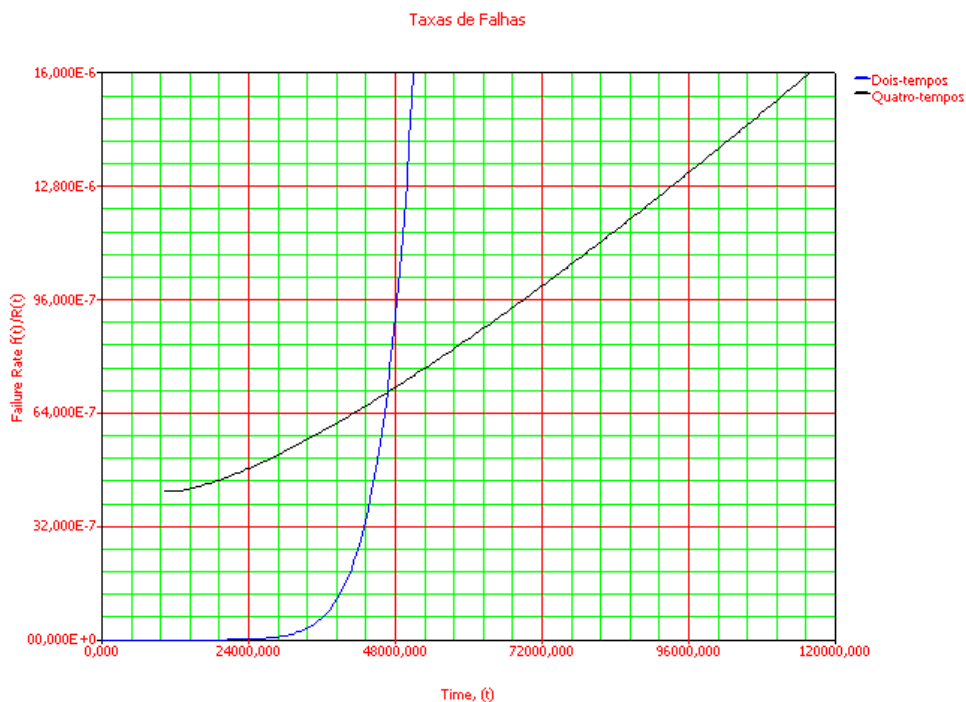


Figura 4.14 – Gráfico comparativo das Taxas de Falhas $\lambda(T)$ dos motores

É possível observar que a taxa de falhas para os motores dois-tempos tendem a aumentar após determinado período de tempo, permanecendo próximas de zero para tempos próximos a 25.000 horas de uso. Por outro lado, para este mesmo período de tempo de operação, a taxa de falhas para os motores quatro-tempos é substancialmente superior, o que confirma o fato de que a previsibilidade de falhas dos motores dois-tempos é superior em comparação a dos motores quatro-tempos.

Outro aspecto importante é que, apesar da parte baixa dos motores quatro-tempos apresentarem comportamento próximo a fase de vida útil da curva da banheira (com fator de forma β próximo de 1,0), a taxa de falhas do equipamento apresenta comportamento de final de vida útil, o que se deve fundamentalmente a parte alta dos referidos motores, as quais se encontram nesse estágio. Esse aspecto sugere que em média, as partes baixas dos motores quatro-tempos apresentam maior vida útil que a Parte Alta do mesmo tipo de motor.

Para verificação dessa suspeita, realizou-se o teste de comparação dos dados, utilizando o modelo proposto por Brown e Rutenmiller, conforme apresentado por RELIASOFT (2006 b). O resultado do teste está sendo apresentado na Figura 4.15.

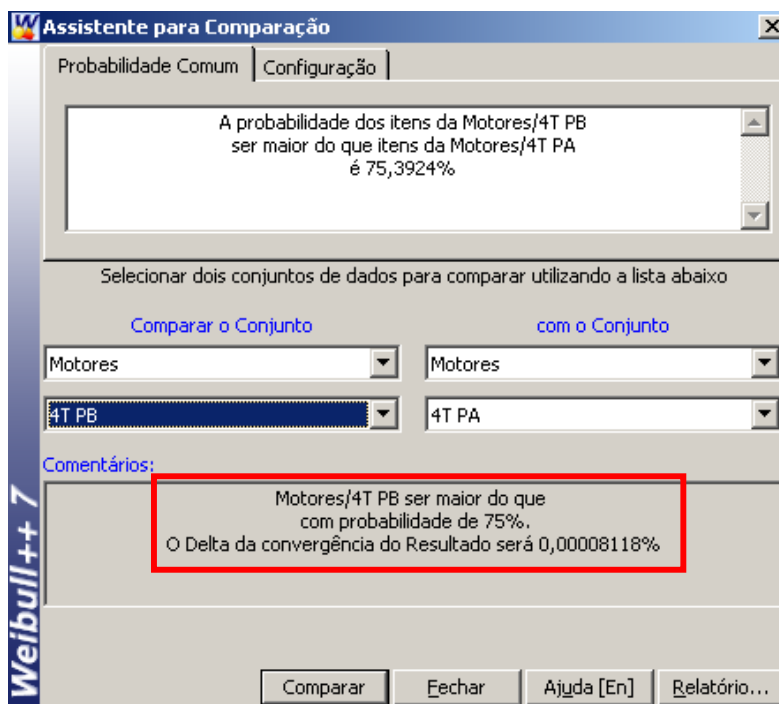


Figura 4.15 – Teste de verificação de diferença de vida útil entre os componentes dos motores quatro-tempos

É possível constatar através do teste de comparação que a probabilidade da Parte Alta dos motores quatro-tempos apresentarem maior vida útil que a Parte Baixa dos mesmos motores é de 75%, o que, de acordo com RELIASOFT (2006 b), permite concluir que a diferença entre vida útil dos componentes apresenta forte tendência a de ser verídica, por estar bem próximo do limite de 80%, o qual determinaria essa condição.

Diante do exposto acima, as estratégias de manutenção para este tipo de motor devem ser determinadas em função do componente crítico, que nesse caso, é a Parte Alta do motor, já que este modo de falha é o que apresenta taxa de falhas crescente, enquanto que a Parte Baixa apresenta comportamento decrescente para este parâmetro, conforme apresentado na Figura 4.16.

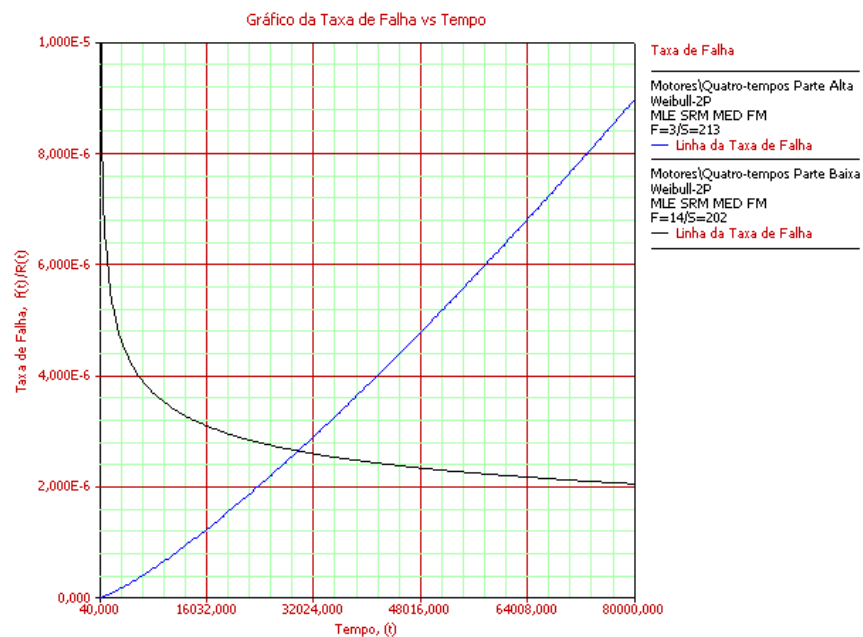


Figura 4.16 – Comparação das Taxas de Falhas dos componentes dos motores quatro-tempos

O mesmo não ocorre com os motores dois-tempos, tendo em vista que os tempos médios entre falhas de ambos os componentes, assim como seus fatores de forma β , são bastante semelhantes. Para confirmar essa afirmação, a Figura 4.17 apresenta o teste de comparação de Brown e Rutemiller para os componentes do referido motor.

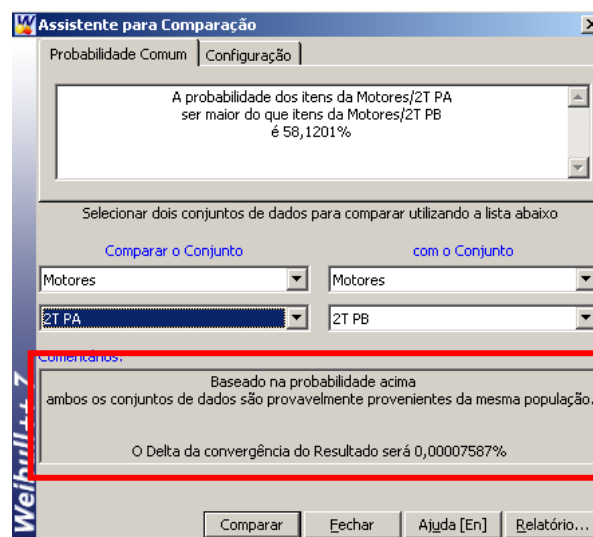


Figura 4.17 – Teste de verificação de diferença de vida útil entre os componentes dos motores dois-tempos

É possível constatar através do teste de comparação que a probabilidade da Parte Alta dos motores dois-tempos apresentarem maior vida útil que a Parte Baixa dos mesmos motores é de 58%, o que, de acordo com RELIASOFT (2006 b), permite concluir que não existem diferenças significativas entre vida útil dos componentes do motor.

Esta semelhança pode ser evidenciada também através do comportamento semelhante da taxa de falhas e da confiabilidade, conforme apresentado nas Figuras 4.18 e 4.19, o que permite concluir que, para os motores dois-tempos não existe componente crítico em termos de manutenção, ou seja, a definição das estratégias de manutenção deve ser realizada igualmente para os dois componentes.

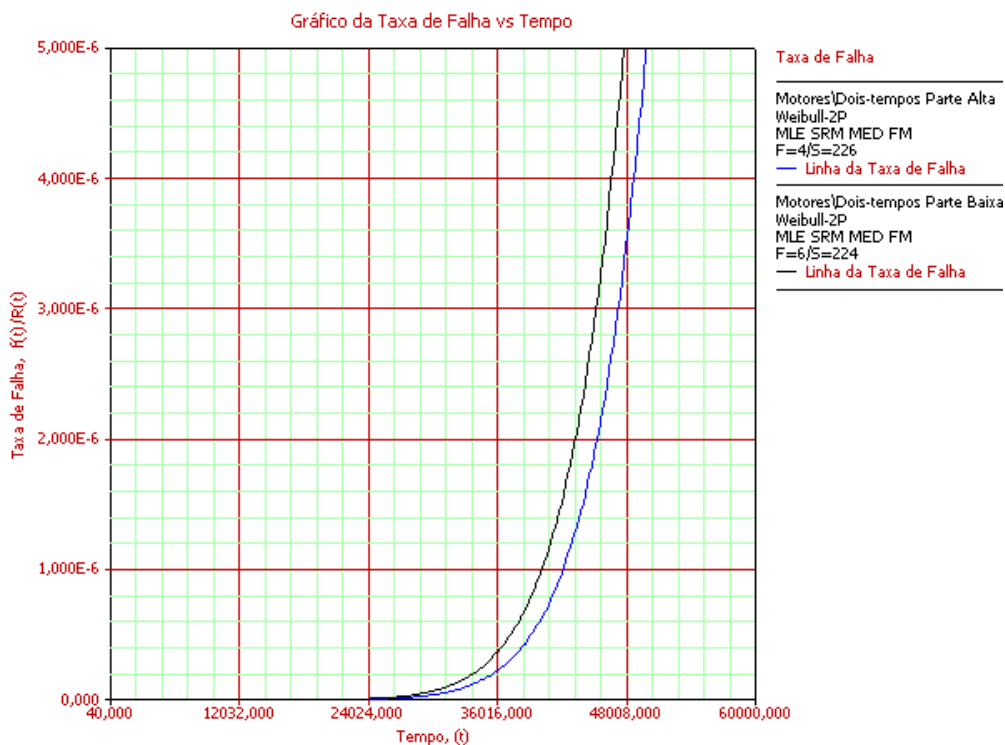


Figura 4.18 – Comparação das Taxas de Falhas dos componentes dos motores dois-tempos

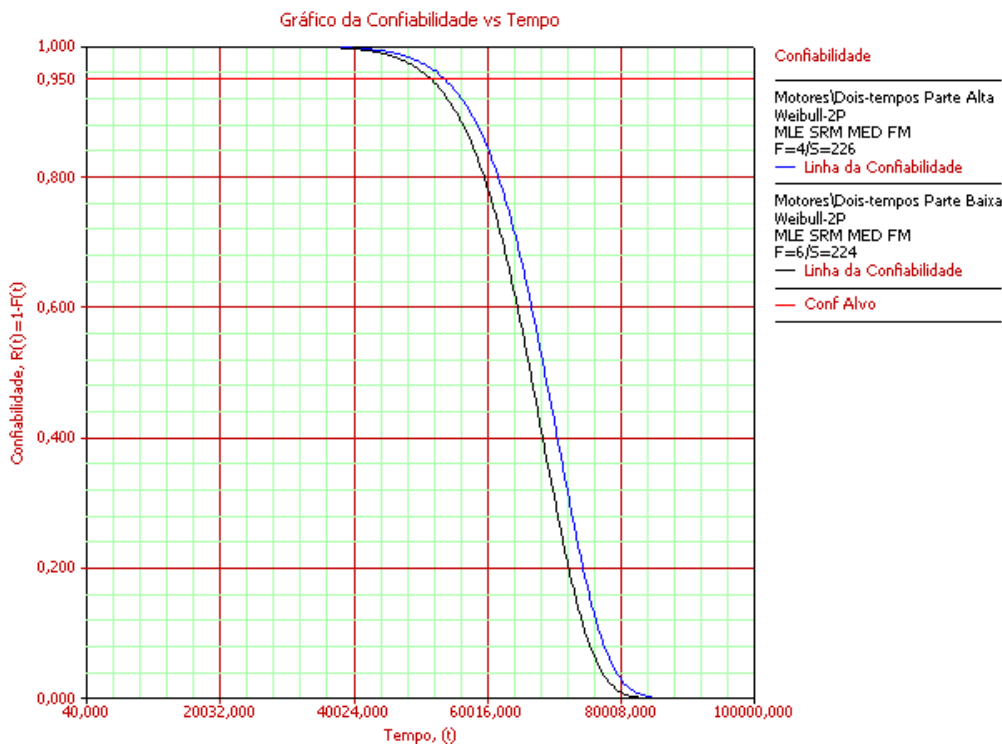


Figura 4.19 – Comparação das Confiabilidades dos componentes dos motores dois-tempos

4.2.1 Definição das Estratégias de Manutenção

Levando em consideração todos os conceitos apresentados no Capítulo 2, além do fato de que a grande maioria das grandes empresas do segmento marítimo já utiliza alta tecnologia de manutenção preditiva, a seguir estão apresentados os intervalos de tempo ótimos para intervenções de manutenção, assim como as técnicas preditivas mais indicadas para cada concepção de motor.

4.2.1.1 Motor dois-tempos

Para esta concepção de motor, devido à elevada previsibilidade de falhas, e considerando os resultados obtidos em termos de confiabilidade requerida e MTBF, pode-se representar qualitativamente o comportamento da vida útil dos equipamentos de acordo com a Figura 4.20.

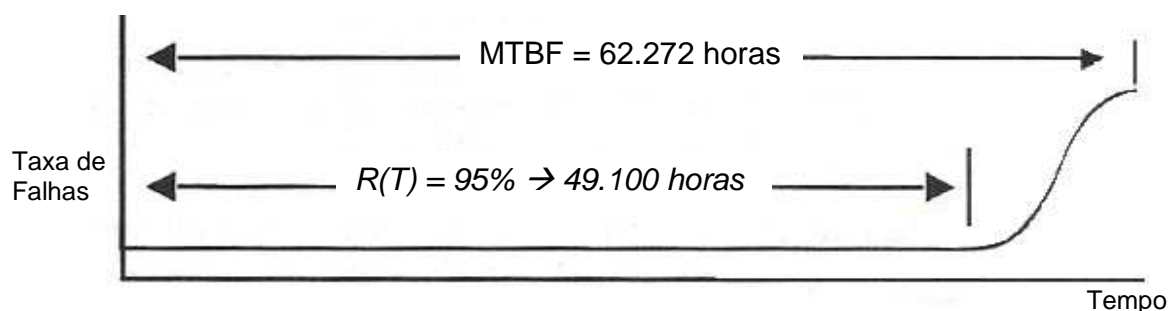


Figura 4.20 – Comparação entre MTBF e “Vida útil” para motores dois-tempos

Analisando sob o ponto de vista de degradação, e com o objetivo de determinar o intervalo adequado para o monitoramento do equipamento através de análise de óleo, determinou-se como tempo para a falha o tempo correspondente a vida útil estipulada na Figura 4.20. A partir dessa definição, de acordo com ALADON (1999), o intervalo entre monitoramentos deve ser de no máximo um terço do período entre a detecção da falha e a ocorrência da mesma.

Considerando este aspecto, o intervalo entre amostragens do lubrificante para acompanhamento não deverá ser superior a 16.367 horas de operação. É evidente que o lubrificante não alcançará essa vida útil, e nos casos onde a substituição do lubrificante ocorre em função do tempo, o acompanhamento dos níveis de desgaste do motor através da análise deve ser realizado observando esta condição. A Figura 4.21 apresenta de maneira qualitativa esta condição, através do diagrama P-F apresentado no Capítulo 2.

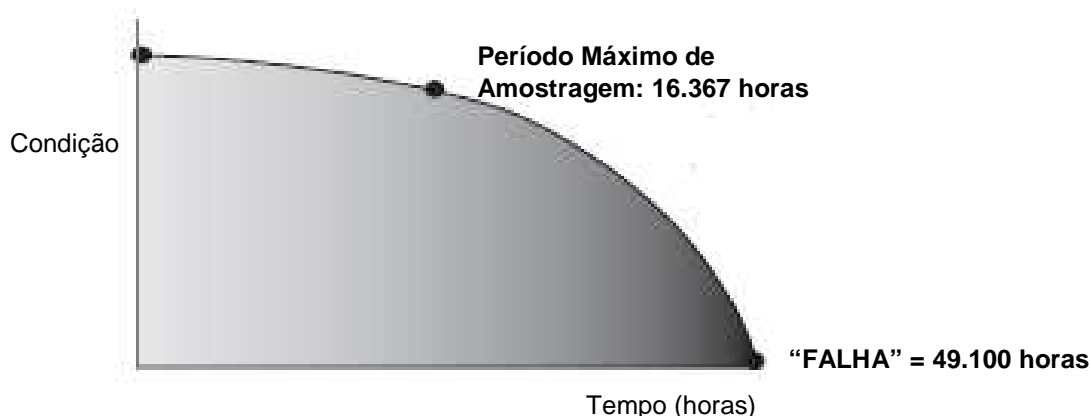


Figura 4.21 – Diagrama P-F para motores dois-tempos

Para empresas que monitoram a vida do lubrificante através da análise do mesmo, os intervalos de amostragem são inferiores ao exposto acima, e poderão ser utilizados para o acompanhamento dos níveis de desgaste dos motores.

Quando evidenciado, através da análise, desgastes anormais no motor, uma ação que vem sendo adotada é a realização da inspeção interna do equipamento através de Videoscopia, visando identificar a origem do desgaste internamente ao equipamento, e assim poder planejar a parada do equipamento para a intervenção de maneira precisa. Essa ação minimiza os custos de manutenção, pelo fato de saber onde atuar durante a intervenção, além de diminuir o tempo de parada do equipamento.

Se por outro lado, os motores não apresentam monitoramento preditivo, uma estratégia de manutenção preventiva sistemática que pode ser adotada nesse caso é a parada do motor para recondicionamento em intervalos regulares a cada 50.000 horas, além das demais ações de manutenção recomendadas nos manuais dos fabricantes dos motores.

4.2.1.2 Motor quatro-tempos

A mesma análise foi realizada para os motores quatro-tempos, considerando os resultados obtidos em termos de confiabilidade requerida e MTBF. A Figura 4.22 representa qualitativamente o comportamento da vida útil dos equipamentos.

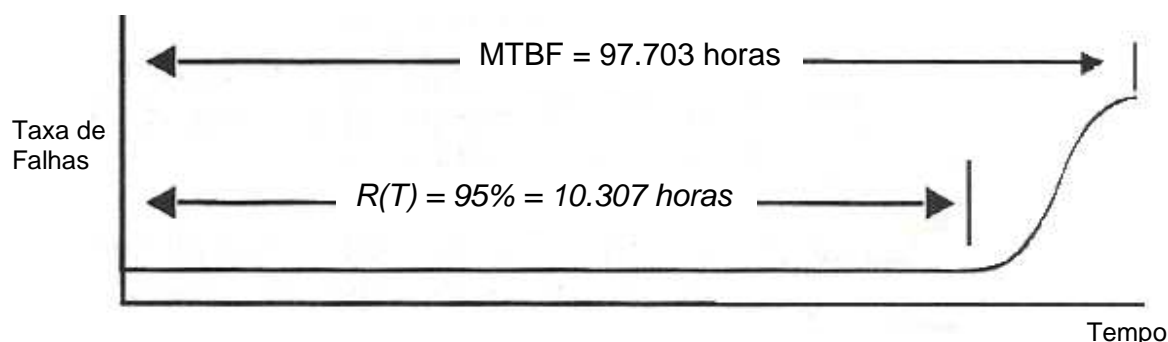


Figura 4.22 – Comparação entre MTBF e “Vida útil” para motores quatro-tempos

Da mesma forma que para os motores dois-tempos, com o objetivo de determinar o intervalo adequado para o monitoramento do equipamento através de análise de óleo, determinaram-se como tempo para a falha o tempo correspondente a vida útil estipulada na figura 4.22. A partir dessa definição, de acordo com ALADON (1999), o intervalo entre monitoramentos deve ser de no máximo um terço do período entre a detecção da falha e a ocorrência da mesma.

Considerando este aspecto, o intervalo entre amostragens do lubrificante para acompanhamento não deverá ser superior a 3.434 horas de operação. Neste caso, o lubrificante provavelmente não atingirá essa vida útil, e nos casos onde a substituição do lubrificante ocorre em função do tempo, o acompanhamento dos níveis de desgaste do motor através da análise deve ser realizado observando esta condição. A Figura 4.23 apresenta de maneira qualitativa esta condição, através do diagrama P-F.



Figura 4.23 – Diagrama P-F para motores dois-tempos

Para empresas que monitoram a vida do lubrificante através da análise do mesmo, os intervalos de amostragem poderão ser utilizados para o acompanhamento dos níveis de desgaste dos motores, desde que sejam menores que o intervalo acima exposto.

Devido ao fato de que a Parte Baixa destes motores estarem em fase de vida útil com taxa de falhas praticamente constante, a ocorrência de falhas aleatórias exige que o monitoramento seja realizado em intervalos curtos, o que implica em maiores despesas no que tange ao monitoramento do equipamento, em comparação ao motor

dois-tempos.

Quando evidenciado, através da análise, desgastes anormais no motor, da mesma forma que para os motores dois-tempos, a medida sugerida é a realização da inspeção interna do equipamento através de Videoscopia, visando identificar a origem do desgaste internamente ao equipamento, e assim poder planejar a parada do equipamento para a intervenção de maneira precisa.

Para esta concepção de motor, devido à aleatoriedade na ocorrência das falhas, não se torna viável a adoção de estratégia de manutenção preventiva sistemática.

5. CONCLUSÕES

O estudo comparativo dos motores diesel marítimos dois-tempos e quatro-tempos, utilizando resultados da ferramenta preditiva de análises de lubrificantes usados e Engenharia de Confiabilidade permitiu obter algumas conclusões importantes sob os pontos de vista de manutenibilidade e vida útil destes equipamentos, podendo estas serem aplicadas na prática, ajustando os dados existentes em cada caso ao modelo proposto.

Primeiramente, efetuou-se o estudo e tratamento dos resultados das análises dos lubrificantes em uso nos motores, classificando-os de acordo com o comportamento, origem e nível de desgaste dos mesmos, e assim obtendo as distribuições de probabilidade dos tempos de falhas para cada concepção de motor (ciclos dois-tempos ou quatro-tempos), ajustadas ao modelo de Distribuição de valores extremos de Weibull.

Após esta etapa, realizou-se a modelagem dos motores em função de seus principais componentes, utilizando a técnica de Diagrama de Blocos, determinando o comportamento dos tempos de falhas de cada subsistema (Parte Alta e Parte Baixa), e posteriormente, dos equipamentos, obtendo-se os correspondentes parâmetros das distribuições. De posse dessas informações, foram determinados os intervalos de tempo correspondentes a um nível requerido de confiabilidade e os tempos médios entre falhas, determinando as estratégias de manutenção e intervalos ótimos para intervenções de manutenção preventiva e preditiva para ambas as concepções de motores.

Considerando o aspecto durabilidade e tempo médio entre falhas, foi possível constatar que os motores quatro-tempos apresentam maior vida útil que os motores dois-tempos. Esta constatação pode estar sustentada a diferença de projeto dos componentes mecânicos.

O fato dos motores dois-tempos estarem expostos a condições mais severas que

os quatro-tempos no que tange ao nº de explosões por revolução, promovem aos motores dois-tempos maiores potências mecânicas que os motores quatro-tempos, considerando motores de dimensões semelhantes, o que pode ser uma vantagem apreciável para os projetistas de embarcações. Por outro lado, deve ser considerado ainda o impacto dos custos com combustíveis e lubrificantes, visto que é sabido que motores dois-tempos apresentam maiores consumos destes insumos, em comparação aos motores quatro-tempos de potências semelhantes, o que implica em maior custo operacional.

É possível concluir também que não existem diferenças significativas entre vida útil dos componentes do motor dois-tempos, ou seja, tanto a Parte Alta quanto a Parte Baixa apresentam o mesmo comportamento mecânico, o que não ocorre com o motor quatro-tempos, o qual apresenta a Parte Alta e Parte Baixa com comportamentos distintos.

Analisando sob o ponto de vista de manutenibilidade, devido ao fato de que a Parte Baixa dos motores quatro-tempos se encontram próximas ao final da fase de vida útil, com taxa de falhas praticamente constante, a ocorrência de falhas aleatórias exige que o monitoramento seja realizado em intervalos curtos, o que implica em maiores despesas no que tange ao monitoramento do equipamento, em comparação ao motor dois-tempos.

Um aspecto importante que deve ser considerado está relacionado ao comportamento das taxas de falhas dos motores. Para os motores dois-tempos, a taxa de falhas tende a aumentar após determinado período de tempo, permanecendo próximo de zero para tempos próximos a 25.000 horas de uso, o que implica que para esta concepção de motores, a ocorrência de falhas por desgaste mecânico no começo de vida é praticamente nula. Por outro lado, para este mesmo período de tempo de operação, a taxa de falhas para os motores quatro-tempos é substancialmente superior, o que confirma o fato de que a previsibilidade de falhas dos motores dois-tempos é superior em comparação a dos motores quatro-tempos.

O mesmo comportamento descrito no parágrafo anterior pode ser evidenciado através da confiabilidade em função da vida útil. Enquanto os motores dois-tempos apresentam elevada confiabilidade durante o início de vida útil, os motores quatro-tempos demonstram a queda gradativa da confiabilidade desde o início de operação, conforme evidenciado através da Figura 4.12. Este aspecto, sob o ponto de vista de manutenção, é muito importante, visto a grande necessidade de confiabilidade dos equipamentos em operação, o que permite concluir que, sob este aspecto, o motor dois-tempos é a melhor opção, principalmente na ausência de estratégias de manutenção preditiva.

Algumas ações podem ser tomadas no intuito minimizar a ocorrência de falhas aleatórias, dentre estas ações, podem-se destacar as seguintes:

- Utilização de Metodologias de Análise e Bloqueio de Falhas, tais como PDCA, 5 Porquês, Árvore de Falhas, Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA), etc., visando evitar a reincidência das falhas ocorridas;
- Implantação de melhorias no equipamento oriundas de problemas de projeto do mesmo;
- Padronização de procedimentos operacionais, no intuito de reduzir possibilidades de falhas aleatórias por erro humano;
- Elaboração de Planos de Manutenção e Lubrificação considerando os modos de falhas dos subsistemas, utilizando ferramentas de confiabilidade (Manutenção Centrada em Confiabilidade – RCM e Lubrificação Centrada em Confiabilidade – RCL).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALADON, LTD. Maintenance Management. Lutterworth, 1999.
2. ALHO, A. Sistemas Navais e Offshore, Pós Graduação em Engenharia de Máquinas Navais e offshore. Notas de Aula. Rio de Janeiro, 2008.
3. ARTANA, K.B.; ISHIDA, K. Spreadsheet modeling of optimal maintenance schedule for components in wear-out phase. Reliability Engineering and System Safety. Japan, 2008.
4. ASTM D5185. Standard Test Method for Determination of Additive Elements, Wear Metals, and Contaminants in Used Lubricating Oils and Determination of Selected Elements in Base Oils by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES). Disponível em <http://www.astm.org/Standards/D5185.htm>. Acesso em: 09 jun. 2010.
5. BOCCHETTI, D.; e tal. A competing risk model for the reliability of cylinder liners in marine Diesel engines. Reliability Engineering and System Safety. Italy, 2007.
6. BRAIN, M. Como funcionam os motores diesel. Disponível em <http://carros.hsw.uol.com.br/diesel-2-tempos1.htm>. Acesso em 05 mai 2010.
7. CAMARGO, Y.B.L; RIBEIRO, E. O uso de ferramentas de confiabilidade para influenciar os requisitos técnicos aplicáveis às especificações dos equipamentos da Marinha do Brasil. Simpósio Internacional de Confiabilidade. São Paulo, 2010.
8. CATERPILLAR, Marine Engine Selection Guide, London, 2008.
9. CONSULTANT, I.S. An Introduction to Reliability-Centered Spares. Lechlade, 2001.
10. Descobertas na Bacia de Campos e aumento da Produção. Disponível em

- <http://www.blogspetrobras.com.br/fatosedados/?page_id=23888>. Acesso em: 04 mai. 2010.
11. GOBBO, J.A. Classificação da Pesquisa. São Paulo, 05 jul. 2008. Disponível em <<http://www.feb.unesp.br/dep/mestrado>> Acesso em: 05 jul. 2009.
 12. Grande Produção de Petróleo offshore no Brasil. Disponível em <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/exploracao-petroleo-mar9.htm>>. Acesso em: 04 abr. 2010.
 13. JARDINE, A.K.S.; LIN, D.; BANJEVIC, D. A review on machinery diagnostics implementing condition-based maintenance. Mechanicals System and Signal Processing. Canada, 2005.
 14. JONES, R.B. Risk-based management: a reliability-centered approach. Houston. Gulf Publishing Company. USA, 1995.
 15. KODALI, P.; HOW, P.; MCNULTY, W.D. Methods proving cylinder liner wear. Proceedings of the SAE 2000 World Congress, Detroit, 2000.
 16. LAFRAIA, J.R.B. Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade. Rio de Janeiro, Qualitymark, 2001.
 17. LAMARIS, V.T.; HOUNTALAS, D.T. A general purpose diagnostic technique for marine diesel engines – Application on the main propulsion and auxiliary diesel units of a marine vessel. Energy Conversion and Management. Greece, 2009.
 18. LI, S.C.; SONTOS, A.A.; GABLE, B.M. Wear in Cummins M-11/EGR test engine. Proceeding the SAE international fuels & lubricants meeting & exhibition, Reno, 2002.
 19. LOUIT, D.M.; PASCUAL, R.; JARDINE, A.K.S. A practical procedure for selection of time-to-failure models based on the assessment of trends in maintenance data. Reliability Engineering and System Safety. Chile, 2008.

20. LU, C.J.; MEEKER, W.Q. Using degradation measures to estimate a time-to-failure distribution. *Technometrics*, 1993.
21. LUGTIGHEID, D.; BANJEVIC, D.; JARDINE, A.K.S. System repairs: When to perform and what to do?. *Reliability Engineering and System Safety*. Canada, 2005.
22. MILKIE, C.M.; PERAKIS, A.N. Statistical method for planning Diesel Engine overhauls in the U.S. Coast Guard. *Naval Engineering Journal*. USA, 2004.
23. MOKASHI, A.J.; WANG, J.; VERMAR, A.K. A study of reliability-centred maintenance in marine operations. *Marine Policy*. India, 2002.
24. MOKASHI, A.J. Viability of RCM in the maritime context. M.Sc. dissertation, School of Engineering, Liverpool John Moores University, 2001.
25. MOUBRAY, J. Maintenance management - a new paradigm. TWI Press, Inc. USA, 2000.
26. NETO, J.B.O.; COSTA, A.J.D. A Petrobrás e a exploração de petróleo offshore no Brasil: um approach evolucionário. *Revista Brasileira de Economia*. Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0034-71402007000100006&script=sci_arttext>. Acesso em 04 mai 2010.
27. NOGUEIRA, O.C; CERBAM, C.G. Geração de Valor através da Associação de Técnicas Preditivas. Seminário de Lubrificação Industrial. Abramam. São Paulo, 2008.
28. NOGUEIRA, O.C; Lubrificação Centrada em Confiabilidade (RCL). Simpósio Internacional de Confiabilidade. Salvador, 2006.
29. Portal Brasil. Consumo Ameaça a auto-suficiência. Disponível em <http://www.portalbrasil.net/2008/colunas/petroleo/boletim257.htm>. Acesso em 04 mai 2010.

30. PRIEST M., DOWSON, D. TAYLOR, C.M. Predictive wear modelling of lubricated piston rings in a diesel engine. Wear 231. USA, 1999.
31. RELIASOFT BlockSim User's Guide. Arizona, Reliasoft Publishing, 2006 a.
32. RELIASOFT Life Data Analysis Reference. Arizona, Reliasoft Publishing, 2006 b.
33. RELIASOFT System Analysis Reference – Reliability, Availability and Optimization. Arizona, Reliasoft Publishing, 2006 c.
34. RELIASOFT Weibull ++ User's Guide. Arizona, Reliasoft Publishing, 2006 d.
35. SHELL, Treinamento de Lubrificação Automotiva, Rio de Janeiro, 2008.
36. SILVEIRA, M.M. Introdução ao Apoio Marítimo, Rio de Janeiro, 2002.
37. SMITH, A.M. Reliability-centred maintenance. McGraw-Hill, Inc. New York, 1993.
38. VALOR ECONÔMICO. Petrobras terá de captar US\$ 58 bilhões para plano de investimentos. Disponível em http://www.valoronline.com.br/?online/petroleo_e_gas/203/6331806. Acesso em 04 mai 2010.
39. VAZ, L. Motores de Combustão – Propulsão de Navios, Pós Graduação em Engenharia de Máquinas Navais e offshore. Notas de Aula. Rio de Janeiro, 2008.

7. ANEXOS

ANEXO A – FICHAS TÉCNICAS DOS LUBRIFICANTES

ANEXO B – PLANILHA DE DADOS MICROSOFT EXCEL