

# UMA APLICAÇÃO DE MANUTENÇÃO BASEADA EM CONFIABILIDADE

**Newton José Ferro**

Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Núcleo de Logística Integrada e Sistemas (LOGIS)  
Rua Passo da Pátria nº 156, sala 440, Bloco E, S. Domingos, Niterói - RJ  
[newtonferro@yahoo.com.br](mailto:newtonferro@yahoo.com.br)

**Eduardo Siqueira Brick**

Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Núcleo de Logística Integrada e Sistemas (LOGIS)  
Rua Passo da Pátria nº 156, sala 440, Bloco E, S. Domingos, Niterói - RJ  
[brick@producao.uff.br](mailto:brick@producao.uff.br)

## Resumo

A frequência e o tipo de manutenção a ser aplicada dependem em grande parte do custo, assim como das implicações de segurança, no caso de falha no sistema. O desafio a ser enfrentado relaciona-se com a possibilidade de espaços para melhoria nos processos empregados para o desenvolvimento das ações de manutenção.

O presente trabalho apresenta, de forma resumida, a aplicação de metodologia que emprega métodos paramétricos, para servir de ferramenta de apoio à decisão que possibilite implementar uma estratégia de redução dos custos de manutenção.

**Palavras-Chaves:** Logística de Manutenção, Confiabilidade, Manutenibilidade

## Abstract

The amount and type of maintenance that is applied depends strongly on cost considerations, as well as the safety implications of a system failure. The challenge to be confronted is related with the opportunity of improvements in the processes used to develop maintenance actions.

This paper presents, in resumed form, the application of parametric statistical methods, supporting decision process to introduce a cost reduction maintenance strategy.

**Keywords:** Maintenance Logistics, Reliability, Maintainability;

## 1. INTRODUÇÃO

Todas as organizações que utilizam ativos físicos para desenvolver suas atividades, vêm se defrontando com severas restrições orçamentárias para aplicação na manutenção desses ativos. Isto tem sido particularmente importante para o setor governamental brasileiro. O montante de recursos financeiros alocados aos projetos de atividade destinados à obtenção de sobressalentes e contratação de serviços de manutenção e reparo do material vem sendo reduzido a cada orçamento aprovado.

Em particular, tal fato repercute na execução da manutenção das viaturas operativas (VtrOp) e equipamentos de engenharia de combate do Corpo de Fuzileiros Navais (CFN) da Marinha do Brasil (MB), comprometendo a capacidade de execução do Programa Geral de Manutenção (PROGEM), denominação dada à programação que coordena os meios operativos que executarão, a cada quatro anos, uma revisão geral de caráter preventivo, acarretando a redução do número de VtrOp e equipamentos que efetivamente realizam anualmente esse tipo de revisão.

O Corpo de Fuzileiros Navais (CFN) estabeleceu em 2004, medidas para o

aprimoramento de seu Sistema de Manutenção Planejada (SMP), com ênfase na redução de custos, cuja implementação passou a ocorrer no corrente ano.

O presente trabalho insere-se nesse contexto, ao se propor a analisar o SMP, utilizando ferramentas de Engenharia de Confiabilidade e Manutenibilidade (Reliability and Maintainability Engineering – R&M).

## 2. SISTEMA DE MANUTENÇÃO PLANEJADA DO CORPO DE FUZILEIROS NAVAIS

### 2.1. SITUAÇÃO PRETÉRITA DO SISTEMA DE MANUTENÇÃO DO CORPO DE FUZILEIROS NAVAIS

Em termos de manutenção preventiva o SMP utilizava até 2004 as seguintes rotinas de manutenção:

- *Ficha de Serviço* – corresponde a uma rotina de primeiro escalão executada pelo motorista ou guarnição imediatamente antes da saída de uma viatura.
- *Manutenção pós-Exercício* - também executada pelo motorista ou guarnição da viatura. Generaliza os cuidados a serem tomados posteriormente aos exercícios, independentemente deste ter sido realizado em situações de diferentes naturezas (desembarque em água salgada; tráfego em área alagada ou lamacenta; emprego em tempo seco em região com muita poeira; emprego somente em estrada asfaltada, etc.), as quais recomendam procedimentos diferenciados;
- *Manutenção Semestral* - corresponde a uma rotina de primeiro escalão executada pela seção de manutenção da respectiva Organização Militar (OM). É executada, compulsoriamente, a cada seis meses, não dependendo da quilometragem rodada no período execução; e
- *Programa Geral de Manutenção (PROGEM)* – corresponde a uma manutenção de terceiro escalão, inserida nesse contexto como uma manutenção “complementar”, de forma a orientar a utilização de recursos financeiros durante o ciclo de vida útil de uma determinada viatura.

A tabela I consolida a periodicidade da execução das rotinas de manutenção da situação pretérita do CFN, considerando-se as seguintes características de periodicidade:

- *Tempo regulada* – manutenção efetuada segundo um padrão temporal;
- *Uso-regulada* – manutenção efetuada conforme o emprego real do meio, medida em quilômetros ou hora; e
- *Evento-regulada* – manutenção relacionada a um evento com a efetiva utilização do meio.

| TIPOS DE ROTINAS DE MANUTENÇÃO        | 2.1.1.1.1.1. PERIODICIDADE          |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Ficha de Serviços                     | Evento-regulada                     |
| Pós Exercício                         | Evento-regulada                     |
| Semestral                             | Tempo-regulada                      |
| PROGEM (Programa Geral de Manutenção) | Tempo-regulada (a cada quatro anos) |

Tabela I – Periodicidade de execução das rotinas de manutenção preventiva na situação pretérita do CFN

### 2.2. SITUAÇÃO ATUAL DO SISTEMA DE MANUTENÇÃO DO CORPO DE FUZILEIROS NAVAIS

Ao estudar a situação pretérita do CFN constatou-se o seguinte:

- A manutenção tempo-regulada apresenta-se como inerentemente de mais fácil controle do que a uso-regulada, pois a segunda exige um controle de quilometragem e/ou horas de funcionamento que depende de registros e controles confiáveis;
- A manutenção uso-regulada tende a reduzir os seus custos devido à utilização de toda a vida útil do sistema considerado; e
- A manutenção evento-regulada não pode ser considerada como uma opção em relação às anteriormente descritas, e sim como um complemento, em face de sua natureza.

Um dos problemas observados é o fato de que, apesar de as viaturas operativas do CFN possuírem uma baixa quilometragem de rodagem anual, elas requerem cuidados especiais, por serem submetidas a uma forma “agressiva” de emprego operativo. Constatou-se, também, que esta possibilidade recomenda que as manutenções considerem, além do seu uso efetivo, parâmetros de tempo para as ações de manutenção, considerando-se o que ocorrer primeiro.

Como consequência desses estudos, o CFN passou a estabelecer, a partir do segundo semestre de 2004, as seguintes rotinas de manutenção, consolidadas na tabela II, com as respectivas equivalências da situação pretérita:

| ROTINAS              | EQUIVALÊNCIA     | PERIODICIDADE      |
|----------------------|------------------|--------------------|
| Pré-evento           | Ficha de Serviço | Evento-regulada    |
| Pós-evento           | Pós-Exercício    | Evento-regulada    |
| Preservação          | xxx              | xxx                |
| Básica de Sistemas   | Semestral        | Uso/tempo-regulada |
| Verificação          | xxx              | Tempo-regulada     |
| Avançada de Sistemas | PROGEM           | Uso-regulada       |
| Revitalização        | xxx              | Tempo-regulada     |

**Tabela II – Rotinas da situação presente do CFN, com as equivalências da situação pretérita do Sistema de Manutenção Planejada e as respectivas periodicidades.**

As rotinas da situação presente do Sistema de Manutenção Planejada do CFN foram estabelecidas por um Grupo de Trabalho (GT) que estudou o assunto, de acordo com os seguintes parâmetros:

- *Rotinas pré-evento e pós-evento* - são, respectivamente, constituídas pelas ações de manutenção necessárias à preparação da viatura para seu o efetivo emprego e, posteriormente a este, para a sua guarda ou interrupção de uso temporária;
- *Rotinas de preservação* - ações de manutenção destinadas à preparação do material, temporariamente não empregado, ou colocado em situação de preservação, considerando-se as características de cada meio e o período de estacionamento pretendido. Suas atividades técnicas e administrativas devem ser aplicadas às viaturas que ficarão estacionadas, segundo dois tipos de processo: Preservação tipo I (até noventa dias) e preservação tipo II (acima de noventa dias), bem como quando do seu retorno às atividades normais (desprocessamento);
- *Rotinas de verificação* - periodicidade inicial bi-anual. São integradas por ações de verificações diversas em todos os sistemas da viatura. Estas visarão possibilitar o controle das demais rotinas, levantar informações necessárias ao gerenciamento do sistema de manutenção do CFN e verificar a adequabilidade da realização da Rotina de Revitalização no meio considerado. Nas rotinas de verificação não serão realizadas ações de efetiva manutenção, sendo as necessidades de ações de manutenções registradas para posterior execução;
- *Rotina básica de sistemas* - seu propósito é estabelecer as atividades de manutenção que devem ser desenvolvidas pelas Organizações Militares usuárias, visando manter a viatura operando com o mínimo de interrupções possíveis. Possui periodicidade mista, devendo ser executada segundo o emprego real do meio (uso-regulada) ou conforme o padrão temporal estabelecido (tempo-regulada), o que ocorrer primeiro. Sua utilização foi adotada para dar maior confiabilidade ao sistema de manutenção e depende de registros e controles confiáveis de quilometragem e/ou horas de funcionamento (uso-regulada), assim como das datas de sua efetiva execução (tempo-regulada);
- *Rotina avançada de sistemas* – é constituída pelas atividades de manutenção de terceiro escalão, substituindo as rotinas realizadas com a periodicidade do atual PROGEM. Este tipo de manutenção, a ser realizada no Centro de Reparos e Suprimentos Especiais do CFN (CRepSupEspCFN), possui uma periodicidade uso-regulada e corresponderá às

rotinas a serem realizadas de acordo com a quilometragem ou horas de emprego real do meio, prevista no manual do fabricante, a cada dez mil quilômetros ou horas de trabalho correspondentes. O padrão temporal não foi estabelecido, uma vez que, no oitavo ano, a viatura passará por uma rotina de verificação para avaliação da necessidade de execução da rotina de revitalização, ou destinação de excesso no décimo ano; e

- *Rotina de revitalização* - visa possibilitar a extensão da vida útil do material ao término de um ciclo de atividades, inicialmente considerado como dez anos. São executadas caso a rotina de verificação anterior ao término de sua vida útil indique a sua adequabilidade, considerando-se o seu custo-benefício. Caso contrário, o material deve ser destinado ao excesso. Esta rotina caracteriza-se por um profundo nível de desmontagem, verificação, tratamento ou substituição de componentes, sendo normalmente de grande duração.

As sugestões do GT foram ratificadas pelo Comando-Geral do CFN e, no segundo semestre de 2004, foram modificadas as documentações normativas relativas à manutenção dos meios operativos do CFN.

### 3. ANÁLISE DAS NECESSIDADES PARA IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE MANUTENÇÃO PROPOSTO UTILIZANDO AS FERRAMENTAS DE R&M

#### 3.1. ANÁLISE INICIAL DO ATUAL SISTEMA DE MANUTENÇÃO DO CFN

Existem duas alternativas fundamentais para a execução da manutenção:

- a substituição ou reparo realizado após a falha (corretiva); e
- a substituição, inspeção ou reparo realizado antes que as falhas ocorram ou atinjam determinadas proporções (preventiva).

A partir dessas alternativas, as possíveis estratégias básicas a serem empregadas, considerando-se os diversos fatores existentes, são:

- *Estratégia A*: Realização somente de manutenção corretiva;
- *Estratégia B*: Substituição de componentes nos tempos  $t_b, 2t_b, \dots$ , independentemente da sua utilização. Ao ocorrer uma falha o componente é substituído;
- *Estratégia C*: Substituição planejada do componente de acordo com o seu uso, medido em milhas percorridas. Ao ocorrer uma falha o componente é substituído.

Analisando-se o sistema de manutenção do CFN, apresentado anteriormente, verifica-se que sua situação pretérita correspondia à estratégia B, passando para uma situação composta das estratégias B e C (reduzida, por considerar somente o tempo de utilização), o que ocorrer primeiro.

Cabe ressaltar, que a atual estratégia utilizada pelo CFN, está de acordo com aquela utilizada pelos fabricantes de veículos e “carros de passeio”, em que a periodicidade da revisão é estabelecida segundo os padrões temporais e de utilização, o que ocorrer primeiro.

A questão principal, para a redução de custos, relaciona-se com a determinação da periodicidade das rotinas de manutenção, pois devido à utilização dos meios operativos do CFN, em terrenos variados e agressivos, as orientações dos fabricantes devem ser avaliadas sob o enfoque da confiabilidade, possibilitando uma retro-alimentação do processo.

#### 3.2. COMENTÁRIOS RELEVANTES RELACIONADOS COM AS ESTRATÉGIAS DE GERENCIAMENTO DA MANUTENÇÃO

Das alternativas fundamentais, derivam diversas estratégias para o gerenciamento da manutenção, sendo mais conhecidas as seguintes estratégias:

- manutenção corretiva;
- manutenção preventiva;
- manutenção preditiva;
- manutenção centrada na confiabilidade (RCM); e
- manutenção produtiva total (TPM).

A frequência e o tipo de manutenção a ser aplicada depende em grande parte do

custo, assim como das implicações de segurança, no caso de falha no sistema. Na identificação dos recursos financeiros a serem economizados, devem ser considerados os custos do reparo ou substituição do componente, assim como da perda de produção durante o período de indisponibilidade. É importante considerar-se, também, que um sistema pode ter diversos modos de falha, correspondendo a taxas de falha crescentes e decrescentes. Nesse caso, deve-se escolher o intervalo de manutenção para o qual o efeito positivo sobre o desgaste seja maior do que o negativo.

O critério normalmente utilizado para o estabelecimento do efeito desejado da manutenção corretiva, é o da disponibilidade do sistema, que pode ser resumido como a probabilidade do sistema estar operacional quando necessário.

Quanto à manutenção preventiva, o que se pretende é aumentar a confiabilidade do sistema, reduzindo os efeitos do desgaste, corrosão, fadiga e outros aspectos relacionados. Este tipo de manutenção só surtirá efeito quando o modo de falha corresponder ao período de desgaste na “curva da banheira”.

A utilização da técnica da RCM possibilita as seguintes alternativas para manutenção:

- realização em intervalos preestabelecidos (preventiva);
- realização de acordo com as condições do sistema (preditiva);
- não realização de nenhuma ação e escolha de reparação após a falha (corretiva); ou
- determinação de que nenhuma ação de manutenção seja realizada para reduzir a probabilidade de falha e optar por redundância ou reprojeto.

### 3.3. METODOLOGIA EMPREGADA

A seqüência de procedimentos adotados encontra-se disposto na Figura 1.

### 3.4. OBSERVAÇÃO E COLETA DE DADOS

As falhas operacionais ocorrem sob condições verdadeiras de uso e emprego e, portanto, provêm informações preciosas. Por exemplo, falhas induzidas pela manutenção, ações de manutenção em que nenhum problema é encontrado e erros do operador, que não são normalmente observados durante o teste de confiabilidade.

Lewis (1994, p.291) ressalta a importância do fator humano, justificando que esta é uma das principais razões pelas quais os dados de laboratório freqüentemente não são representativos para os dados de campo. Na situação operacional, por vezes, a qualidade da manutenção preventiva é menor do que a necessária. Por outro lado, o reparo realizado no “campo”, também, por vezes, não atende aos requisitos esperados. Tais situações fazem com que os indicadores quantitativos de manutenção se subordinem demasiadamente à confiabilidade humana, de difícil mensuração. Esses números dependem não somente do estado físico do equipamento, mas também do treinamento, atenção e capacidade de julgamento dos recursos humanos aplicados à manutenção. Esses indicadores estão mais relacionados com a variação dos fatores sociais e psicológicos do que com a probabilidade dos tempos de reparo e são genericamente mais variáveis do que as taxas de falha dos equipamentos.

Deve-se acrescentar o fato de que geralmente é mais difícil obter informações precisas de falhas operacionais do que obter dados sob condições de teste controlado, uma vez que o número de pessoas que participam dessa etapa do processo normalmente é maior e seu foco está voltado para a correção da falha, e não para a coleta de dados. Por essa razão, as pertinências das fontes dos dados e métodos de coleta são primordiais, para se evitar que o tempo utilizado pelos recursos humanos destinados à execução da manutenção seja desviado mais do que o necessário para a coleta de dados.

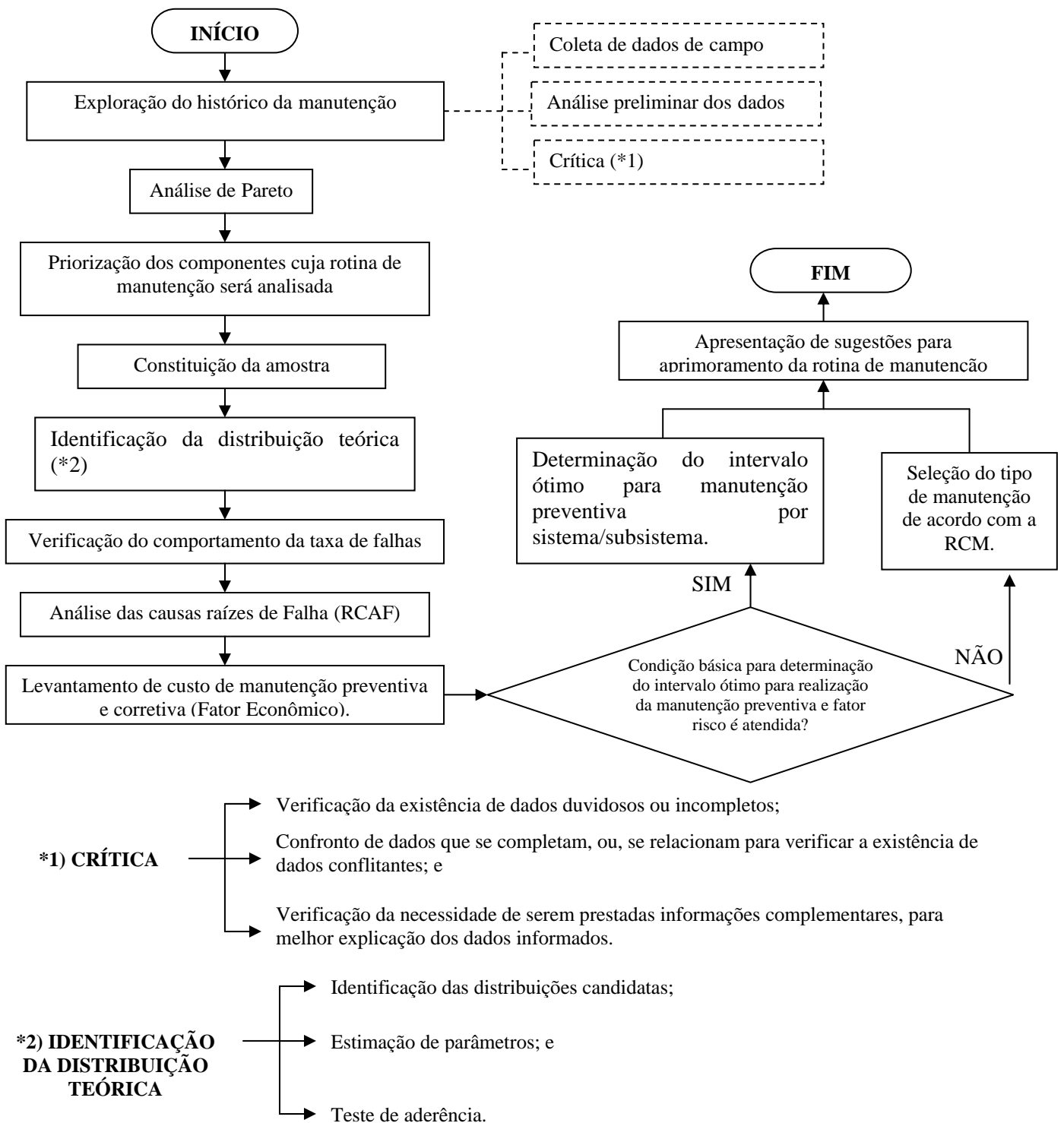


Figura 1: Metodologia de análise usada.

### 3.4.1. Classificação dos dados de falha

A tabela III resume a classificação dos dados de falha, retiradas de Ebeling (2000, p.283 a 284):

| CLASSIFICAÇÃO DOS DADOS DE FALHA  |   |
|-----------------------------------|---|
| Quanto à origem                   | - operacional ou dados de campo; e<br>- falhas geradas em testes. |
| Quanto ao intervalo de ocorrência | - agrupados; e<br>- não-agrupados.                                |
| Quanto ao tamanho da amostra      | - grandes amostras; e<br>- pequenas amostras.                     |
| Quanto à censura                  | - dados completos; e<br>- dados censurados.                       |

Tabela III – Classificação dos dados de falhas

Em relação à censura, a mesma ocorre quando os dados estão incompletos devido à remoção de observação de pelo menos um componente antes da falha, ou porque o teste é encerrado antes que todas as unidades falhem. As unidades removidas da amostra devido a outros modos de falha, também são consideradas censuradas.

A figura 2 apresenta as principais caracterizações de censura encontradas na literatura técnica:

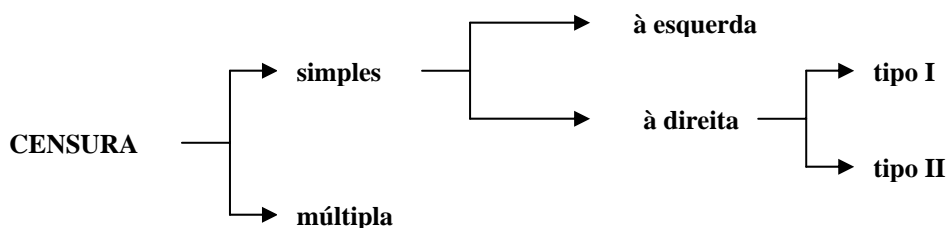


Figura 2 – Principais tipos de censura

Em termos de amplitude, este trabalho abordará a censura simples à direita, tipo I, assim caracterizado:

- *Censura simples.* Todas as unidades têm o mesmo tempo de teste e o teste é concluído antes que todas as unidades tenham falhado. Podem ser de censura à direita ou à esquerda.
- *Censura à direita (suspensão):* Os tempos de falha consideram pelo menos uma unidade censurada à direita, o que implica em que o evento de interesse (tempo de falha) está à direita dos pontos de falha. Isto é, o componente permanece operando e a sua falha ocorrerá posteriormente ao encerramento do período de observação. Pode ser subdividido nos tipos I e II.

*Censura tipo I* – Teste se encerra após a ocorrência de um determinado tempo  $t^*$  previamente fixado.

*Censura tipo II* – Teste se encerra após a ocorrência um número fixo de falhas  $r$ . O tempo de teste da  $r$ -ésima falha será  $t_r$ .

Ebeling (2000, p.286) ressalta que a censura introduz dificuldades adicionais na análise estatística dos tempos de falha, pois, ao se ignorar unidades censuradas na análise, pode ocorrer a eliminação de informações valiosas e a conseqüente alteração do resultado. Cita como exemplo, no teste tipo I, que ao se ignorar as unidades que permaneceriam operando, somente as unidades menos resistentes, que falharão mais cedo, serão tratadas na análise e a confiabilidade do componente poderá ser altamente subestimada.

### 3.4.2. Requisitos dos dados de campo

O tipo dos dados a serem coletados depende dos objetivos a serem alcançados. Ebeling (2000, p. 441) sugere os dados apresentados na tabela IV, como os dados básicos de R&M que devem ser coletados a cada falha. A maneira e o formato no qual os dados serão registrados são específicos de cada sistema.

| CARACTERÍSTICAS DOS DADOS      | DEFINIÇÃO   |
|--------------------------------|---|
| <b>N<sup>o</sup> DA FALHA</b>  | Número seqüencial identificando o registro da falha. (data de calendário e tempo podem ser utilizados).   |
| <b>DATA E TEMPO</b>            | Data de calendário e tempo de quando a falha foi registrada.  |
| <b>IDENTIFICAÇÃO DA PEÇA</b>   | Identificação do componente ou peça que falhou (no menor nível identificado).   |
| <b>TEMPO ATÉ A FALHA</b>       | A idade da peça (em termos de confiabilidade) no tempo da falha (não quando a falha foi descoberta) medida em unidades do tempo até a falha (horas de operação, ciclos, milhas). O tempo deve ser medido a partir de um ponto de referência específico, tais como: o início de um ciclo de operação ou de uma missão. |
| <b>MODO DE FALHA</b>           | A natureza exata da falha (curto-circuito, sobrecarga, fratura por impacto, falha de energia, quebra).  |
| <b>CAUSA DA FALHA</b>          | Um evento ou situação que causou a falha, tal como vibração excessiva, fadiga, corrosão, erro humano, erro induzido pela manutenção, ou desgaste normal.  |
| <b>INÍCIO DO REPARO</b>        | A data e o tempo de início das ações de correção da manutenção (não incluir os tempos de espera de sobressalentes ou de recursos de manutenção).  |
| <b>TÉRMINO DO REPARO</b>       | A data e o tempo quando todas as restaurações foram realizadas, incluindo verificações, validação, e o retorno do sistema para uma situação operacional (ou em reserva "stand by").   |
| <b>AÇÃO REALIZADA</b>          | O tipo de manutenção realizada para corrigir a falha, tais como: remoção e substituição, ajustes menores, calibração e reconstrução.  |
| <b>QUANTIDADE DE MECÂNICOS</b> | O número de pessoas que realizaram a correção (Se o número variar, durante a restauração, utilizar média ponderada).  |

Tabela IV – Características e definições dos elementos dos dados de R&M – Ebeling (2000, p. 441)

### 3.4.3. Distribuições de falha e de reparo

Existem duas formas de aproximação para adequação das distribuições de confiabilidade com os dados de falha (Ebeling 2000, p.283). O método mais utilizado consiste em adequar os dados de falha e de reparo coletados às distribuições teóricas, tais como exponencial, Weibull, normal, ou lognormal. O outro método deriva, diretamente dos dados, uma função empírica de confiabilidade ou de taxa de falhas. Esse segundo método é denominado não paramétrico, ou de distribuição livre, uma vez que não requer a especificação de uma distribuição teórica, enquanto que o primeiro método identifica uma distribuição teórica apropriada, estima os parâmetros e realiza um teste de aderência, também denominado teste de hipóteses.

Ebeling (2000, p. 358) compara o método paramétrico com o não paramétrico (empírico), apresentando as razões pelas quais o modelo paramétrico é preferido. As principais razões podem ser assim sintetizadas:

- Os modelos empíricos não provêm informações além do alcance dos dados da amostra. Este aspecto é desvantajoso uma vez que em engenharia de confiabilidade as informações características das distribuições, que ficam subtendidas, são de maior interesse, e no caso de dados de censura simples, o método paramétrico possibilita a extrapolação dos dados;
- A engenharia de confiabilidade possui interesse em determinar a natureza probabilística que serve como base ao processo de falha. Uma amostra é somente um subconjunto aleatório da população de tempos de falha e se pretende estabelecer a distribuição da população estudada, e não da amostra em si; e
- Pequenas amostras provêm poucas informações a respeito do processo de falhas. Entretanto, se a amostra for consistente com uma distribuição teórica, resultados relevantes baseados na distribuição teórica podem ser obtidos.

Embora não possua as vantagens do método paramétrico, o processo empírico, por



não assumir uma distribuição teórica, possui a vantagem de evitar a ocorrência de possíveis erros, ao se assumir uma determinada distribuição como válida. Por outro lado, os intervalos de confiança associados à análise não paramétrica, são normalmente maiores do que os calculados por intermédio de processos paramétricos. Por essa razão, um procedimento utilizado na prática, relaciona-se com a realização da análise não paramétrica, antes da escolha da distribuição considerada adequada para descrever os dados de falha.

### 3.4.4. Comportamento da taxa de falhas

A tabela V apresenta a relação entre a taxa de falhas e as possíveis distribuições estatísticas.

| TAXA DE FALHA  | DISTRIBUIÇÃO CANDIDATA   |
|--|--|
| $\lambda$ constante (Constant Failure Rate –CFR)     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Exponencial. (Weibull <math>\beta = 1</math>)</li> </ul>    |
| $\lambda$ decrescente (Decreasing Failure Rate- DFR) | <ul style="list-style-type: none"> <li>Weibull.</li> </ul>   |
| $\lambda$ crescente (Increasing Failure Rate –IFR)   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Weibull;</li> <li>Normal; ou</li> <li>Lognormal.</li> </ul> |

Tabela V – Relação entre a taxa de falhas e possíveis distribuições estatística – Ebeling (2000, p. 359 a 362)

Devido à sua flexibilidade, a distribuição Weibull pode ser utilizada para descrever taxas de falha constante, crescentes e decrescentes, sendo uma das mais empregadas em processos de R&M.

### 3.5. DETERMINAÇÃO DO INTERVALO DE MANUTENÇÃO

Um equipamento ou componente, ao ser submetido a um programa de manutenção preventiva, terá ao longo de sua vida útil um número maior de intervenções do que se apenas manutenções corretivas forem executadas.

A determinação da adequabilidade da realização de manutenção preventiva e da sua periodicidade, depende de muitos fatores, sendo o primeiro a forma da função taxa de falhas, associada à função densidade de probabilidade do tempo até falha do item a ser mantido. Este fator será examinado na seção que se segue.

No caso de falhas aleatórias, caracterizadas por uma taxa de falhas constante, a manutenção preventiva não surte efeito. Tal fato pode ser facilmente observado, ao se comparar a expressão de confiabilidade para um período de tempo  $t$ , de um item que não é submetido a manutenções preventivas (dada por  $R(t) = e^{-\lambda t}$ ), com a mesma expressão para o caso de o item sofrer  $N$  manutenções preventivas com periodicidade  $T$  |  $t \geq N.T$  ( $R_M(t)$ ), dada pela Equação 1

$$R_M(t) = (e^{-\lambda T})^N e^{-\lambda(t-NT)} = e^{-N\lambda T} e^{-\lambda(t-NT)} = e^{-\lambda t} \quad (\text{Equação 1})$$

A manutenção preventiva tem efeito quando a idade ou o desgaste do componente torna a taxa de falhas dependente do tempo. Para ilustrar esse efeito, suponha que a confiabilidade possa ser representada por uma distribuição Weibull de dois parâmetros. Nesse caso, para um sistema sem manutenção preventiva, teremos:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right] \quad (\text{Equação 2}).$$

Da Equação 2, resultará, então, para um sistema com  $N$  manutenções preventivas no período de tempo  $t$ :

$$R_M(t) = \exp\left[-N\left(\frac{T}{\theta}\right)^\beta\right] \exp\left[-\left[\frac{t-NT}{\theta}\right]^\beta\right], \quad NT \leq t < (N+1)T, \quad (\text{Equação 3})$$

$$N = 0, 1, 2, \dots$$

Para examinar o efeito da manutenção, deve-se calcular a taxa  $R_M(t)/R(t)$ . Essa

relação é simplificada se for calculada para  $t = NT$ . Nesse caso, tem-se:

$$\frac{R_M(NT)}{R(NT)} = \exp \left[ -N \left( \frac{T}{\theta} \right)^\beta + \left( \frac{NT}{\theta} \right)^\beta \right]. \quad (\text{Equação 4})$$

Deve-se considerar que somente haverá um ganho na confiabilidade de um sistema com manutenção preventiva se o argumento da exponencial for positivo, ou seja:  $\left( \left( \frac{NT}{\theta} \right)^\beta > N \left( \frac{T}{\theta} \right)^\beta \right)$ , ou, equivalentemente,  $N^{\beta-1} - 1 > 0$ . (Equação 5).

A condição reduzida implica que, para ocorrer efeito positivo na confiabilidade do sistema ou componente, como resultado da manutenção preventiva, o valor do parâmetro de forma deverá ser maior do que a unidade ( $\beta > 1$ ), o que corresponde a uma taxa de falhas crescente com o decorrer do tempo de utilização.

No caso de  $\beta < 1$ , a manutenção preventiva decresce a confiabilidade. Essa situação corresponde à taxa de falhas que decresce com o tempo de utilização, proveniente de falhas precoces.

Cox (1962, p. 119), ao analisar a questão, assume as condições a seguir e propõe a *inequação 1*, como condição a ser atendida, em relação à estratégia B, para que haja um intervalo de tempo “T” finito em que seja vantajosa a realização da manutenção preventiva, em relação à corretiva.

Condições:

- Os componentes do sistema são substituídos ao falharem, não sendo consideradas graduais deteriorações do rendimento, ou acréscimos graduais dos custos de manutenção;
- As falhas estão relacionadas a um modo de falha específico;
- Quando um processo de renovação ocorre, um novo componente é instalado, ou o componente anterior é reparado, de tal forma que a sua função densidade de probabilidade (FDP) pode ser considerada como a de um componente novo; e
- A FDP do tempo de falha  $f(t)$  é conhecida.

$$\frac{C_p}{C_c} < \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\sigma^2}{\mu^2} \right) \quad (\text{inequação 1}), \text{ onde, para a distribuição Weibull:}$$

$$\mu = MTTF = t_0 + \theta \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right); \text{ e } \sigma^2 = \theta^2 \left\{ \Gamma \left( 1 + \frac{2}{\beta} \right) - \left[ \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) \right]^2 \right\}, \text{ sendo:}$$

$C_p$  = custo da intervenção preventiva;

$C_c$  = custo da intervenção corretiva;

$\sigma$  = variância da distribuição; e

$\mu$  = média da distribuição.

**3.5.1. Nesse caso, a relação  $\frac{\sigma^2}{\mu^2}$  se transformará, conforme Seixas (2000, seção 7.4), em:**

$$\frac{\sigma^2}{\mu^2} = \frac{\Gamma(1 + 2\beta^{-1})}{\Gamma^2(1 + \beta^{-1})} - 1$$

**3.5.2. Determinação do intervalo de tempo “T”**

O modelo de distribuição a ser utilizado será o da distribuição Weibull. Pretende-se, como efeito desejado, minimizar os custos de manutenção com determinado componente, mantendo-se a disponibilidade adequada para o atendimento das necessidades da Força de Fuzileiros da Esquadra.

A primeira condição a ser atendida, por ocasião do estabelecimento de estratégias para a substituição de componentes, considerando-se apenas o fator custo, deve ser a de que os custos de manutenção preventiva ( $C_p$ ) sejam menores do que os da corretiva ( $C_c$ ).

Seixas (2002, seção 7.5), em relação à estratégia B, apresenta as seguintes

considerações a respeito da determinação do período padrão “ $T$ ”, e propõe a Equação 6 para a determinação do intervalo “ $T$ ” que minimize os custos com a realização da manutenção preventiva:

- A amostra pode ser representada pela distribuição Weibull com parâmetro de forma maior do que um ( $\beta > 1$ );
- A condição da inequação 1 é atendida.

$$T = t_0 + \theta \left( \frac{C_p}{C_c} \frac{1}{\beta - 1} \right)^{1/\beta} \text{ para } \beta = 1 \text{ (Equação 6), onde:}$$

$t_0$  = vida mínima ou confiabilidade intrínseca;  $\mu$  = tempo médio para falhar, tempo médio entre falhas, ou vida útil do item;

$\beta$  = parâmetro de forma; e

$\theta$  = parâmetro de escala (vida característica).

### 3.5.3. Considerações sobre o intervalo de tempo “ $T$ ”

Na prática, a inclusão da relação de custo  $C_p/C_c$ , aumenta consideravelmente o grau de dificuldade para a determinação do intervalo de tempo “ $T$ ”, pois acrescenta valores subjetivos à expressão, uma vez que a estimativa do custo da manutenção corretiva é de difícil mensuração, pois, para um mesmo modo de falha, a abrangência dos danos a serem causados, poderá variar consideravelmente.

A tabela VI apresenta subsídios para a análise do lado direito da inequação 1.

| $\beta$ | $\sigma^2/\mu^2$ | $[(1-\sigma^2/\mu^2)]^{1/2}$ | $\beta$  | $\sigma^2/\mu^2$ | $[(1-\sigma^2/\mu^2)]^{1/2}$ |
|---------|------------------|------------------------------|----------|------------------|------------------------------|
| 1,05    | 0,92             | 0,04                         | 1,40     | 0,52             | 0,24                         |
| 1,10    | 0,83             | 0,08                         | 2,20     | 0,23             | 0,38                         |
| 1,20    | 0,70             | 0,15                         | 10,0     | 0,01             | 0,49                         |
| 1,25    | 0,65             | 0,17                         | $\infty$ | 0                | 0,50                         |

Tabela VI – Dados relativos ao lado direito da inequação 1

Dos dados apresentados, pode-se observar que, quanto mais o fator de forma se aproxima de 1, mais o valor de  $C_p$  terá que ser menor do que  $C_c$ . No caso de  $\beta=1,2$ , por exemplo, o valor de  $C_p$  deverá ser menor do que 15% do valor de  $C_c$  e, para valores em que  $C_p$  corresponda ou esteja acima de 50% de  $C_c$ , a condição não estará satisfeita nem para  $\beta \rightarrow \infty$ .

## 4. ESTUDO DE CASO

Com o propósito de fundamentar o contexto teórico apresentado nas seções anteriores, foi desenvolvido um estudo de caso com componentes de uma viatura tipo, existente no acervo do CFN. A viatura escolhida denomina-se Carro de Lagarta Anfíbio (CLAnf).

A metodologia sugere a utilização do método de Pareto, a fim de possibilitar a seleção dos processos de falha a serem analisados. Alguns critérios adequados para selecionar os componentes mais importantes seriam, por exemplo, o custo de aquisição ou de reparo do componente, sua influência na disponibilidade do meio operativo e a frequência de falhas.

No presente estudo de caso, não houve a necessidade da utilização da análise de Pareto, partindo-se diretamente para a seleção do conjunto de força, formado pelos componentes: motor (MOTOR), conjunto de tomada de força (PTO), unidade de direção hidrostática (HSU) e transmissão (TRANSMISSÃO), e dos componentes bomba elétrica de combustível (BOMBA) e transdutor de temperatura (TRANSDUCER), uma vez que o próprio fabricante informa, em manual técnico, que os mesmos são os itens mais críticos entre todos os componentes do CLAnf.

A partir dos itens selecionados, os dados foram organizados por modos de falhas, de forma a serem analisados por processo empírico, além de serem utilizados na obtenção da distribuição teórica julgada apropriada para a descrição do processo de falha do componente, característica do método paramétrico.

Em complemento foi realizada uma análise das causas raízes de falha para o modo de falha apresentado.

As seguintes premissas foram utilizadas para fundamentar a análise dos modos de falha:

- No caso do sistema para o qual não se tenha todos os dados de falha, desde o início de sua vida útil, o fato dos componentes serem substituídos quando falharem, nos permite utilizar a hipótese de que o tempo de vida de cada um se reinicia quando o mesmo é substituído; e
- No caso do sistema para o qual se tenha todos os dados de falha, desde a data inicial de utilização, a hipótese anterior não é necessária, podendo-se analisar os dados dos componentes que não são substituídos, apenas reparados.

#### 4.1. MÉTODO UTILIZADO PARA ESCOLHA DA DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA

O método utilizado para escolha da distribuição estatística foi o dos mínimos quadrados, que é melhor utilizado com dados completos. Como o presente estudo de caso utiliza pequenas amostras com censura tipo I, procurou-se, sempre que possível, utilizar a distribuição Weibull para análise paramétrica, verificando sua aderência pelo teste de Mann, adequado para a distribuição Weibull de dois parâmetros. A razão desta escolha foi o fato de que a distribuição Weibull permite correlacionar dados específicos de falha com uma distribuição particular, podendo indicar se a falha é um evento prematuro (mortalidade infantil), aleatório ou ocasionado por desgaste (final de vida econômica), além do teste de Mann poder ser utilizado tanto com dados completos quanto com censura simples.

#### 4.2. PROCESSO DA ANÁLISE DAS CAUSAS RAÍZES DE FALHA

Ao se procurar identificar as causas de um determinado processo de falhas, deve-se sempre ter em mente que o processo pode nem sempre ser tão simples quanto parece, inicialmente, e podem estar ocorrendo causas secundárias (imediatas), cuja eliminação não solucionará o problema, sendo necessária a identificação da causa principal (raiz).

Para auxiliar a procura da causa raiz, Robert e Kenneth Latino (1999, p. 6) descrevem o processo de análise de causas raízes de falha (Root Cause Analysis Failure – RCAF), em que uma análise estruturada auxilia na identificação da causa primária de um problema e das ações necessárias para eliminá-las.

##### 4.2.1. Síntese do Processo

Robert e Kenneth Latino (1999, p. 5 e 6) descrevem que o processo iterativo de desenvolvimento de hipóteses que auxiliem na identificação das causas raízes de falha deve ser fundamentado na experimentação, sendo parte vital em qualquer processo investigativo ou analítico. O processo desenvolvido apresenta os seguintes fundamentos:

##### 4.2.1.1. Método PROACT

O método PROACT, é um processo mnemônico, que procura identificar as causas raízes de falha, cuja sigla representa:

- **P**Reserve os dados de falha;
- **O**rganize a equipe de;
- **A**nalise os dados de falha;
- **C**omunique as recomendações para evitar novas ocorrências; e
- **T**race os resultados a serem alcançados.

##### 4.2.1.2. Origem das Causas Raízes

As causas raízes podem se originar de uma das seguintes origens:

- *Problemas físicos*: elementos tangíveis (observados e mensuráveis);
- *Problemas humanos*: erros humanos (omissão ou procedimento inadequado); e
- *Causas latentes*: conseqüências adversas que ficam adormecidas por muito tempo, somente tornando-se evidentes quando se combinam com outros fatores para quebrar a defesa de um sistema.

#### 4.2.1.3. O Conceito dos 5 “P”

Robert e Kenneth Latino (1999, p. 57 a 64) apresentam a seguinte conceituação dos “5 P” a ser utilizada, por ocasião da preservação dos dados de falha no PROACT:

- *Peças* – As peças e componentes representam um estado físico ou tangível, sendo relevante para o processo a identificação dos itens que falharam;
- *Posição* – A posição dos componentes é auto-explicativa, e deve ser considerada como um dos mais importantes tipos de dados.
- *Pessoas* – A categoria das pessoas é a mais fácil de ser definida. Resume-se na identificação das pessoas que devem ser ouvidas para se obter informações a respeito do evento. As primeiras pessoas a serem ouvidas devem ser aquelas que presenciaram o evento. Deve ser realizado um esforço para que possam ser ouvidas, o mais breve possível, de forma a se evitar perdas na observação direta, provocadas pelo transcorrer do tempo em relação ao evento.
- *Papéis* – Relacionam-se com os documentos existentes, tais como: relatórios, especificações, normas e procedimentos operacionais e de manutenção, e histórico de falhas; e
- *Paradigmas* – Os paradigmas devem ser entendidos como os fundamentos necessários ao entendimento dos processos que podem afetar a capacidade individual de solucionar os problemas. Corresponde, basicamente, a como o indivíduo vê o mundo, sua reação e suas respostas às situações encontradas. São aspectos inerentes à maneira utilizada para solução dos problemas e são, em última análise, os maiores responsáveis pelo sucesso ou fracasso da análise realizada.

### 4.3. ANÁLISE DE DADOS

Dentre os componentes selecionados para análise, apenas os relacionados na Tabela VII apresentaram dados suficientes para uma análise estatística.

#### 4.3.1. Motor (MOTOR)

A análise não paramétrica das três falhas observadas apresentou um comportamento de taxa de falhas crescente e monotônico, porém pouco confiável, devido ao pequeno tamanho da amostra. O fator de forma encontrado pelo método paramétrico ( $\beta = 1,13$ ) também representa uma taxa de falhas crescente. A análise das causas raízes de falha demonstrou a necessidade de alteração no projeto relativo ao sistema de arrefecimento, mais especificamente, no resfriador de contato do casco que, durante a navegação, propiciava a perda súbita do líquido de arrefecimento do motor.

#### 4.3.2. Conjunto de Tomada de Força (PTO)

A análise não paramétrica das oito falhas observadas apresentou um comportamento de taxa de falhas crescente, porém não monotônico. O fator de forma encontrado pelo método paramétrico ( $\beta = 7,75$ ) também representa uma taxa de falhas crescente, porém corresponde a um valor demasiadamente elevado, uma vez que a literatura técnica pesquisada descreve as propriedades do fator de forma até  $3 \leq \beta \leq 4$ , que corresponderia a uma taxa de falhas crescente e aproximadamente simétrica (distribuição normal). A vida característica ( $\theta$ ) de 3188 milhas, para o conjunto de tomada de força indicou um valor relativamente baixo, que não pôde ser comparado com os dados do fabricante por não estarem disponíveis. Por essa razão, a análise paramétrica foi considerada inconclusiva.

A análise das causas raízes de falha, ainda em processo de avaliação, levantou a questão da possibilidade de alteração na rotina de manutenção ou de operação poder aumentar a vida útil do PTO Foi também observado que o modo de falha apresentado está diretamente relacionado com a unidade de propulsão na água, o que poderia ter reflexos negativos em outros componentes.

| COMPONENTE                                | MOTOR                    | PTO                      | HSU                      | BOMBA                    | TRANSDUCER               |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Tamanho da amostra                        | 12                       | 26                       | 26                       | 52                       | 26                       |
| Quantidade de falhas                      | 3                        | 8                        | 7                        | 13                       | 21                       |
| Coef de correlação ( $r$ )                | 0,9994                   | 0,9859                   | 0,9806                   | 0,9941                   | 0,9751                   |
| Coef de determinação ( $r^2$ )            | 0,9988                   | 0,9720                   | 0,9616                   | 0,9882                   | 0,9508                   |
| $\beta$ (MLE)                             | 1,13                     | 7,75                     | 1,25                     | 1,01                     | 2,14                     |
| Intervalo de confiança (90%) ( $\beta$ )  | Mín = 1,06<br>Max = 1,20 | Mín = 7,46<br>Max = 8,05 | Mín = 1,20<br>Max = 1,30 | Mín = 0,98<br>Max = 1,04 | Mín = 2,10<br>Max = 2,19 |
| $\theta$ (MLE)                            | 8194                     | 3188                     | 6918                     | 7785                     | 2423                     |
| Intervalo de confiança (90%) ( $\theta$ ) | Mín = 7497<br>Max = 9026 | Mín = 3165<br>Max = 3213 | Mín = 6751<br>Max = 7304 | Mín = 7410<br>Max = 8196 | Mín = 2395<br>Max = 2451 |
| Teste Mann's                              | $H_0$ aceita (*)         | $H_0$ aceita (*)         | $H_0$ aceita (*)         | $H_0$ aceita (*)         | $H_0$ aceita (*)         |

Tabela VII – Resultados da análise dos dados.

## 5. (\*) $H_0$ = OS TEMPOS DE FALHA POSSUEM DISTRIBUIÇÃO WEIBULL COM DOIS PARÂMETROS.

### 5.1. UNIDADE DE DIREÇÃO HIDROSTÁTICA (HSU)

A análise não paramétrica das sete falhas observadas apresentou um comportamento de taxa de falhas crescente e não monotônico, devido apenas à incidência de uma falha. O fator de forma encontrado pelo método paramétrico ( $\beta = 1,25$ ) também representa uma taxa de falhas crescente.

A análise das causas raízes de falha demonstrou que o modo de falhas (direção errática) causada pela vibração excessiva, estava relacionado com a alteração na regulagem do conjunto de direção reversa, estando sendo estudada a periodicidade da inserção de uma regulagem do sistema, como rotina de manutenção preventiva.

#### 5.1.1. Bomba elétrica de combustível (BOMBA)

A análise não paramétrica das treze falhas observadas apresentou um comportamento de taxa de falhas não monotônico, não se podendo descartar a possibilidade de taxa de falha constante. O fator de forma encontrado pelo método paramétrico ( $\beta = 1,01$ ), representa uma taxa de falhas aproximadamente constante.

A análise das causas raízes de falha demonstrou que, das treze falhas observadas, duas eram das bombas instaladas a vante do tanque de combustível, e onze a ré. Foi encontrada uma relação direta da preponderância do modo de falha nas bombas de ré, devido as mesmas girarem intermitentemente sem combustível, quando o reservatório estiver abaixo da metade de sua capacidade, por situarem-se num ponto mais alto em relação às de vante. Foi determinada uma alteração na periodicidade de abastecimento, de forma a evitar a utilização dos CLAnf abaixo da metade da capacidade de seu tanque de combustível, enquanto se estuda a possibilidade de alteração do projeto.

#### 5.1.2. Transdutor de temperatura (TRANSDUCER)

A análise não paramétrica das vinte e uma falhas observadas apresentou um comportamento de taxa de falhas não monotônico, não se podendo descartar a possibilidade de taxa de falha crescente. O fator de forma encontrado pelo método paramétrico ( $\beta = 2,14$ ), representa uma taxa de falhas crescente.

A análise das causas raízes de falha, ainda encontra-se em processo inicial de avaliação.

## 5.2. EXEMPLO DE ESTIMATIVA DE PERIODICIDADE DO INTERVALO “T”

No caso da unidade de direção hidrostática (HSU), em que está sendo estudada a periodicidade da inserção de uma regulagem do sistema, como rotina de manutenção preventiva, assumindo-se que a relação  $\frac{C_p}{C_c}$  correspondesse a 0,14 (para atender à condição da *inequação 1*, para  $\beta = 1,25$ ), teríamos:

$T_0 = \text{zero}$ ;  $\beta = 1,25$ ;  $\theta = 6918$  milhas, e obteríamos pela *equação 1*, o intervalo  $T = 4350$  milhas.

## 6. CONCLUSÕES

São diversos os fatores que podem conduzir a uma estratégia de manutenção adequada. Dentre os mesmos pode-se citar: a importância do equipamento, os custos associados, os aspectos de segurança e a confiabilidade mínima aceitável do equipamento.

Para o estabelecimento de intervenções preventivas baseadas em parâmetros de utilização, faz-se necessário o acompanhamento dos modos de falha, de forma a se procurar estabelecer intervalos que propiciem os maiores efeitos positivos sobre o desgaste. Nesse caso, a pertinência das fontes dos dados de campo e métodos de coleta são primordiais para a análise a ser realizada.

A distribuição Weibull, devido à sua flexibilidade, mostra ser uma ferramenta valiosa, ao possibilitar o estabelecimento de critérios que identifiquem e quantifiquem esse intervalo.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] EBELING, C. E. An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering.. Estados Unidos da América. McGraw-Hill Book Co. 1a Edição 2000. 486p.
- [2] LEWIS, Elmer Eugene. Introduction to Reliability Engineering. Estados Unidos da América. John Wiley&Sons, Inc. 2a edição 1994. 435p.
- [3] COX, D. R. Renewal Theory. Inglaterra. Methuen & Co Ltd, 1962. 142p.
- [4] SEIXAS, Eduardo de Santana. Confiabilidade Aplicada na Manutenção. Rio de Janeiro, 2002. CD-ROM.
- [5] LATINO, Robert J. e Kenneth C. ROOT CAUSE ANALYSIS Improving Performance for Bottom Line Results. Estados Unidos da América. CRC PRESS, 1999. 186p.