MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE: APLICANDO UMA ABORDAGEM QUANTITATIVA

Miguel Afonso Sellitto, MSc. Eng.
Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Av. Unisinos 950, 93022-000, São Leopoldo, RS miguelsv@terra.com.br

Miriam Borchardt, MSc. Eng.
Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Av. Unisinos 950, 93022-000, São Leopoldo, RS miriamb@euler.unisinos.br

Daniel Ribeiro Campos de Araújo, Eng. Mecânico
Cia Carris Porto-alegrense
Rua Albion 385, 91530-010, Porto Alegre, RS daniel@carris.com.br

ABSTRACTS

This paper describes a methodology based in the Reliability Centered Maintenance (RCM) technique and its application in a service organization. The RCM is an approach for the problem of risks in operations, identifying, predicting and avoiding damages and shortages in physical assets, which should lead to productions losses due to plant or equipments shutdowns. The methodology was developed and validated theoretically and then applied to a real case: clutches in bus cars from a passengers transport company. The methodology begins with an analysis of failure hierarchy by the Failure Tree Analysis (FTA), continues with a FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), which focuses the fragile component and, finally, by a Weibull Analysis, determines a Probability Distribution Function (PDF) that, in a given significance level, describes the time to failure of the item. The second part of the method establishes the MTBF and optimum time interval between repairs, minimizing the relationship concerning shutdown costs, due to operation interruption and repair costs, due to maintenance procedures. When the PDF follows a Weibull distribution, the appropriate equations are presented. Based in the probabilities of shutdown, the risk of the operation is calculated. A further overall discussion is made, with suggestions and conclusions.

Key Words: Reliability in Services, Weibull Analysis in Services, Maintenance Management in Services

1 Introdução

No atual cenário de negócios, a gestão da manutenção tem se mostrado um fator relevante na busca da competitividade empresarial. O setor de serviços também tem ganhado competitividade e, a medida que aumentam as exigências dos seus clientes, tem lançado mão de técnicas originadas na fabricação, inclusive na gestão da manutenção. A gestão da manutenção se desenvolveu inicialmente em ambiente fabril, principalmente após a segunda guerra mundial. Já em serviços, até recentemente, não se havia percebido sua real importância estratégica, criando-se uma defasagem tecnológica em relação à fabricação.
Define-se a PAE (Produção Autorizada de Estoque) como a abordagem gerencial na qual se autoriza a antecipação da produção e a PEZ (Produção com Estoque Zero) como sua oposição (SHINGO, 1996). No ambiente PAE, uma estratégia de manutenção é a chamada

Manutenção por Oportunidade, ou seja, a manutenção é uma estrutura separada da fabricação, que se prepara durante a etapa de produção para, havendo uma oportunidade, fazer a maior intervenção possível e cabível. Como a próxima oportunidade pode ser distante no tempo, gera-se uma tendência à correção de problemas reais e prevenção de problemas potenciais, que podem ou não ocorrer. Ainda assim, como há antecipação da produção, uma quebra inesperada pode não resultar em perda de resultado de entregas. No ambiente PEZ não se antecipa a produção: é mais provável que as quebras inesperadas gerem perda de entregas. Portanto, há necessidade de uma estratégia que não apenas previna problemas potenciais, mas que prediga a ocorrência dos problemas reais.
Uma estratégia de manutenção é a *CBM* (*Conditioned based Maintenance*), que condiciona uma ação de manutenção a um diagnóstico que, com uma dada probabilidade, prediga o momento de uma falha. Este diagnóstico resulta de inspeção visual ou instrumental local, inspeção ou ensaio instrumental remoto ou monitoração contínua de variáveis associadas ao modo de falha, como vibração, teores de gases e contaminantes ou temperatura. Outra estratégia de manutenção é a *RCM* (*Reliability centered Maintenance*), na qual se estudam e classificam os modos de falha, suas severidades, seus efeitos e possibilidades de ocorrência e, com apoio de modelos probabilísticos, determina-se o risco da operação sob certas circunstâncias. Define-se Risco de uma operação como:

Risco ($) = probabilidade de falha X exposição X conseqüências. **(Eq. 1)**

A probabilidade de falha e a exposição (local da falha: para equipamentos é máxima) variam de 0 a 1 e a conseqüência é o dano econômico causado pela falha. Conhecendo-se o risco, podem-se tomar decisões tais como: continuar ou abandonar a operação, agregar proteções e/ou redundâncias ou intervir nos componentes de risco (MOBLEY *in* HIGGINS, 1995; BARRINGER, 1997; IRESON, *apud* BARRINGER, 1997).
O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia desenvolvida teoricamente, baseada na *RCM* e apoiada na análise de Weibull para o modelo probabilístico, e que pode ser usada para gerenciamento do risco. Objetiva-se também descrever um caso de aplicação da metodologia em empresa de serviços de transportes urbanos de passageiros.

2 Revisão Bibliográfica

A manutenção se desenvolveu durante e após a segunda guerra mundial pela constatação de perdas em vidas e equipamentos sofridas, devidas principalmente a falhas materiais. Estas falhas se originavam da baixa confiabilidade dos projetos básicos mas poderiam ter sido evitadas por rotinas de verificação. Os avanços da manutenção se deram em três linhas de ação principais (NIPON STEEL CORPORATION, 1988):

- Métodos de gerenciamento;
- Aumento da confiabilidade de equipamentos e sistemas;
- Desenvolvimento de alternativas tecnológicas para os equipamentos existentes.

Como o objetivo atual é analisar o gerenciamento de risco, entende-se que, para este trabalho, a segunda linha é mais relevante. Inicia-se tipificando algumas intervenções de manutenção (MOBLEY *in* HIGGINS, 1995; NIPON STEEL CORPORATION, 1988):

- Emergência: há perda total no resultado gerado pelo equipamento;
- Corretiva: há perda de alguma característica de qualidade, total ou parcial, mas ainda sem perda total no resultado gerado pelo equipamento;
- Preventiva: há um plano prévio, corrigido por corretivas ou emergências;
- Preditiva, disparada por indicadores de risco do equipamento;
- Confiabilidade, baseada em modelos teóricos construídos em base empírica.

É possível definir confiabilidade de diversos modos. Se para um item o reparo não for possível, confiabilidade é, com uma dada probabilidade, a duração de desempenho isento

de falhas sob certas condições. Se o reparo do item é possível, confiabilidade é a probabilidade de desempenho isento de falhas durante um intervalo de tempo sob certas condições (OMDAHL, *apud* BARRINGER, 1997). Portanto, confiabilidade é uma função probabilidade (0 a 1) que varia ao longo do tempo de operação.

Algumas técnicas podem auxiliar na análise da função confiabilidade (HORÁCIO, 1995):

- Análise por Árvore de Falhas (*FTA*): Estrutura as falhas de modo hierárquico, onde uma falha primária, ou evento de topo, pode ser causada por diversas falhas secundárias, que por sua vez são conseqüência de possíveis falhas terciárias e assim por diante, até que se atinja o último nível significativo de falha. A cada modo de falha é associada uma probabilidade, geralmente obtida em base empírica.
- Análise de Efeitos e Modos de Falha (*FMEA*): Método de análise de produto (equipamento) ou processo, usado para identificar os possíveis modos de falha e determinar seu efeito sobre o desempenho do objeto. Para que se calcule o risco (probabilidade de falha X severidade dos efeitos X probabilidade de detecção da falha), e se hierarquizem os modos de falhas, investigam-se:
    - Os modos potenciais de falhas;
    - Os efeitos e os danos causados pelas falhas;
    - A severidade do efeito (pontuar de 1 a 10, sendo 10 o mais severo);
    - O mecanismo ou causa da falha?
    - A probabilidade de se dar a falha (1, pouco provável, 10, muito provável);
    - É possível detectar a falha antes do efeito gerar suas conseqüências (1, muito provável, a 10, quase impossível)?
    - Como eliminar ou ao menos reduzir o efeito da falha?
- Análise de Weibull: técnica concebida por Waloddi Weibull, físico sueco, em 1937, e publicada no Journal of Applied Mechanics da American Society of Mechanical Engineering, em 1951, usualmente com o seguinte formato (BARRINGER, 1997):
    - Coleta de amostras de tempos até a falha do objeto;
    - Plotagem dos tempos em papel de probabilidade ou uso de software estatístico para verificação de aderência à distribuição de Weibull e estimativa de seus parâmetros. Havendo curvaturas ou r^2 (coeficiente de determinação) distante de 1, tem-se mistura de modos de falha, (dados provêm de mais de uma população) ou outra distribuição deve ser tentada;
    - Uso dos parâmetros da distribuição para previsão de falhas;
    - Uso de cálculos econômicos pertinentes envolvendo custos e riscos para gerar ações corretivas como políticas de inspeção, reparos ou trocas.

Para modelagem dos dados pela distribuição de Weibull se têm (ELSAYED, 1992; HAHN & SHAPIRO, 1967):

- Função acumulada de falhas de um item, no tempo "t" de operação: $F(t) = 1 - e^{-(\frac{t-t_0}{\theta})^{\gamma}}$; **(Eq. 2)**
- *MTBF* (tempo médio entre falhas): $MTBF = t_0 + \theta.\Gamma(1+\frac{1}{\gamma})$; **(Eq. 3)**
- Variância: $\sigma^2 = (\Gamma(1+\frac{2}{\gamma}) - [\Gamma(1+\frac{1}{\gamma})]^2)$, onde: **(Eq. 4)**
    - t_0 = parâmetro de localização (tempo inicial isento de falhas);
    - θ = parâmetro de escala (intervalo de tempo a partir de t_0 no qual ocorrem 63,2% das falhas);
    - γ = fator de forma (aponta o modo de falha):
        - $\gamma < 1$: mortalidade infantil do item;

- $\gamma = 1$: falhas aleatórias, zona de vida útil do item;
- $\gamma > 1$: falhas por fadiga ou mortalidade senil do item.

Calculam-se os parâmetros da distribuição de Weibull por diversos métodos. Um método é a regressão linear da reta obtida ao se linearizar a eq. 2:

- $\ln(-\ln(1-F(t))) = \gamma \ln(t-t_0) - \gamma \ln\theta$;
- Y = aX + b;
- $a = \gamma = \dfrac{n\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - \sum_{i=1}^{n} x_i \sum_{i=1}^{n} y_i}{n\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} x_i)^2}$; **(Eq. 5)**
- $b = -\gamma \ln\theta = \dfrac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} - a\dfrac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$. **(Eq. 6)**

Também se podem calcular os parâmetros pelo método da Máxima Verossimilhança. Resolve-se a primeira equação iterativamente e se aplica o resultado na segunda. A estimativa de γ é tendenciosa, devendo ser corrigida (RIBEIRO *apud* VACCARO, 1998):

- $\dfrac{\sum_{i=1}^{r} t_i^{\hat{\gamma}} \ln t_i + (n-r).t_i^{\hat{\gamma}}.\ln t_r}{\sum_{i=1}^{r} t_i^{\hat{\gamma}} + (n-r).t_i^{\hat{\gamma}}} - \dfrac{1}{\hat{\gamma}} - \dfrac{1}{r}\sum_{i=1}^{r} \ln t_i = 0$ **(Eq. 7)**
- $\hat{\theta} = \left[\dfrac{\sum_{i=1}^{r} t_i^{\hat{\gamma}} + (n-r).t_i^{\hat{\gamma}}}{r}\right]^{1/\hat{\lambda}}$; **(Eq. 8)**
- $\hat{\gamma}_{unbiased} \cong G_n.\hat{\gamma}; \qquad G_n \cong 1{,}0 - \dfrac{1{,}346}{n} - \dfrac{0{,}8334}{n^2}$ **(Eq. 9)**

Para t_0 em uma primeira abordagem se pode adotar o tempo da primeira falha (t_1) ou o seguinte algoritmo, mais preciso (RIBEIRO *apud* VACCARO, 1998):

- Calcular dt = (t_n-t_1)/(n-1) ;
- Calcular ($\hat{l} = t_i - dt$) e ajustar o modelo para $x_i = t_i - \hat{l}$;
- Calcular $k_1 = 0{,}0919.n^{0{,}643}.\gamma^{1{,}768}$ e $k_2 = 0{,}1762.n^{0{,}630}.\gamma^{1{,}533}$;
- Calcular $t_a = (t_1 - k_1.dt) + (t_2 - k_2.dt)$, Se $t_a < 0$, usar $\hat{l} = 0$, do contrário usar $\hat{l} = \max(0, \min(\frac{t_a}{2}, t_1 - \frac{dt}{2}))$;
- Voltar ao passo 2 e fazer novo ajuste do modelo, até atingir a precisão requerida.

MONCHY (1989) propõe o seguinte cálculo econômico: no recurso crítico identifica-se o item frágil, modela-se o tempo até a falha, calculam-se os custos das intervenções de emergência e preventiva. Respondem-se a duas perguntas:

- Existe um tempo t no qual seja viável programar uma intervenção preventiva?
- Caso exista, qual é este tempo t?

A seguir apresentam-se os passos do modelo:

- Custo da Emergência = custo do item + perda na operação = Ce+Cpp = Cem;
- Custo da Preventiva = custo do item = Ce;

- Custo da estratégia 1: trabalhar até a emergência = C1 = Cem/MTBF, onde MTBF é o MTBF do item;
- Custo da estratégia 2: trabalhar até o tempo Tp e realizar uma preventiva = C2 = $C_2 = \frac{(C_e + C_{pp}(1 - R(Tp))}{MTBF\,|_{Tp}}$; $MTBF|_{Tp}$ considera troca do item em Tp; **(Eq. 10)**
- Se não existir Tp tal que C2 (Tp) / C1 < 1, a estratégia 1 prevalece;
- Se existir Tp tal que C2 (Tp) / C1 < 1 a estratégia 2 prevalece;
- Deriva-se a (eq.10) em relação ao tempo e iguala-se a zero. Se o modelo para o tempo até a falha for a distribuição de Weibull, com os parâmetros t_o, θ e γ, usam-se ábacos ou as equações (MONCHY, 1989; QUALyTEC, 2001):
  - Se $\frac{C1}{C2} < \frac{1}{2}\left[1 - \left(\frac{\sigma}{MTBF - to}\right)^2\right]$, existe Tp, calculado por: **(Eq. 11)**
  - $Tp = to + \theta\left[\frac{C2}{C1}\left(\frac{1}{\gamma - 1}\right)\right]^{\frac{1}{\gamma}}$. **(Eq. 12)**

3 Metodologia proposta para o trabalho

Após análise teórica, estabeleceu-se a seguinte metodologia:

1. Definir o objeto em análise (processo ou equipamento produtivo);
2. Definir a *FTA* e as probabilidades de falhas nos recursos que compõem o processo;
3. Para o recurso crítico, fazer o *FMEA* e definir o item frágil;
4. Para o item frágil levantar os tempos até a falha, no caso, quilômetros até a falha;
5. Fazer o papel de probabilidade de Weibull e o histograma para os dados levantados, testar a aderência e se não há mistura de famílias e testar outras distribuições;
6. Estimar os parâmetros da distribuição por diversos métodos (regressão linear, máxima verossimilhança, software estatístico) e calcular *MTBF* e grandezas de interesse como t_{10} e t_{50} (tempos até a falha para 10 e 50% dos indivíduos);
7. Comparar os resultados entre si e com referências pertinentes, concluindo a estimativa;
8. Verificar se existe um Tp tal que justifique a preventiva. Se existir, montar uma tabela de tempos até a intervenção para diversos C1/C2 e riscos.

4 Aplicação da metodologia e discussão dos resultados

A aplicação do modelo gerou os seguintes resultados:

1. Objeto em análise: ônibus urbano;
2. *FTA*: evento de topo: socorros e recolhimentos anormais de veículos em serviço;
   Eventos secundários: sistema de arrefecimento: 20%, motor: 25%, sistema de transmissão de potência, mais relevante: 30%, sistema de ar e utilidades: 25%;
3. O *FMEA* para o sistema de transmissão apontou como item frágil as embreagens;
4. Quilômetros até a falha para o item frágil: obtidos 74 valores, apresentados na tabela 1;
5. Papel de probabilidade de Weibull: nas figuras 1 e 2 se têm a curva e o histograma para a amostra completa (n=74). A aplicação do algoritmo de Ribeiro produziu $t_0 = 0$;
6. Usou-se o ProConf 98 para teste de ajuste a distribuições, confirmando a adequação do modelo de Weibull. Usaram-se dois métodos para a estimativa dos parâmetros e o cálculo das grandezas de interesse (tabela 2);
7. Como os resultados coincidiram entre si e o valor de referência para embreagens mecânicas γ = 1,4 (BARRINGER, 2000) pertence ao intervalo de confiança de 95%,

adota-se γ = 1,526, θ = 55.613 e *MTBF* = 50.104. Na figura 3 se tem a função taxa de risco, h(t), cuja característica quase linear, típica de componentes mecânicos, confirma a expectativa;

8. A preventiva é viável para um custo de corretiva ≥ 3,7 vezes o custo de preventiva. Neste caso, o intervalo ótimo de intervenção é de 36.090 km. Na tabela 4 se têm diversos intervalos ótimos para algumas relações de custos corretiva/preventiva e os riscos associados pela distribuição teórica a diversas quilometragens (eq. 1).

1.375	18.924	30.017	36.204	43.682	53.308	69.983	86.645	128.679
1.383	21.494	30.914	37.301	48.765	54.549	71.523	88.134	130.823
1.597	21.994	31.236	37.926	49.404	59.551	72.075	94.288	
3.104	25.205	31.317	38.040	51.050	59.602	75.061	97.396	
4.034	26.009	31.553	38.588	51.459	62.072	75.886	98.942	
4.602	26.242	33.236	38.729	51.594	64.105	75.924	99.405	
7.258	26.484	33.871	39.371	51.664	66.901	78.724	100.106	
8.555	27.910	34.243	39.453	52.252	69.382	82.235	110.713	
16.729	28.569	35.748	40.772	52.861	69.621	82.631	114.224	

Tabela 1: Quilometragens até a falha

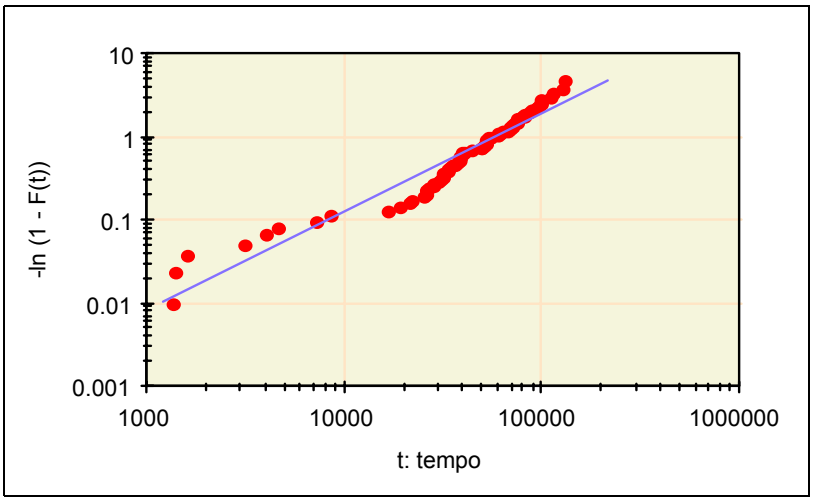

Figura 1: Papel de probabilidade de Weibull para a amostra (Fonte: ProConf 98)

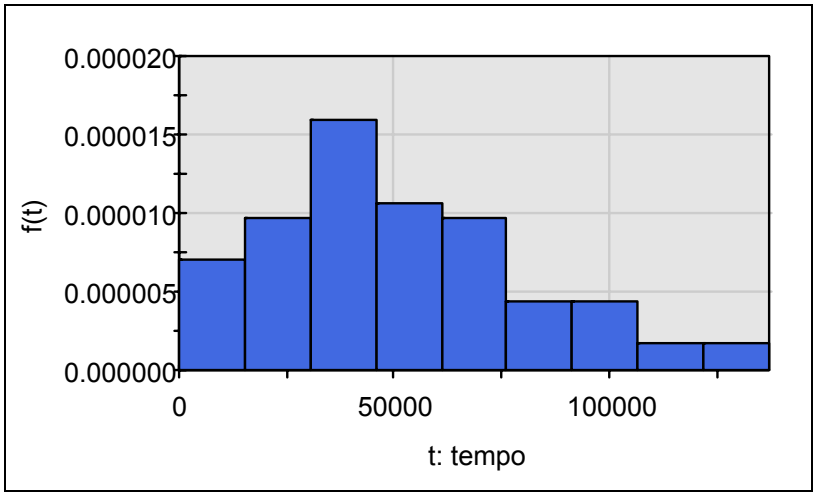

Figura 2: Histograma para a amostra (Fonte: ProConf 98)

distribuição	Teste χ^2 6df	Teste KS	decisão
Lognormal	n. s. = 0,00	n. s. = 0,000	Rejeitar
Normal	n. s. = 0,42	n. s. = 0,000	Rejeitar
Exponencial Negativa	n. s. = 0,00	n. s. = 0,000	Rejeitar
Gamma	n. s. = 0,27	n. s. = 0,000	Rejeitar
Weibull	n. s. = 0,74	n. s. = 0,087	Não rejeitar

Método de cálculo	t_0	γ	Δ confiança	θ	*MTBF*	t_{10} e t_{50}
Máxima verossimilhança manual	0	1,526		55.854	50.321	
ProConf 98	0	1,526	$1,24<\gamma<1,78$	55.613	50.104	12.727 e 43.739

Tabela 2: Ajuste a distribuições e cálculo dos parâmetros de Weibull (Fonte: ProConf 98)

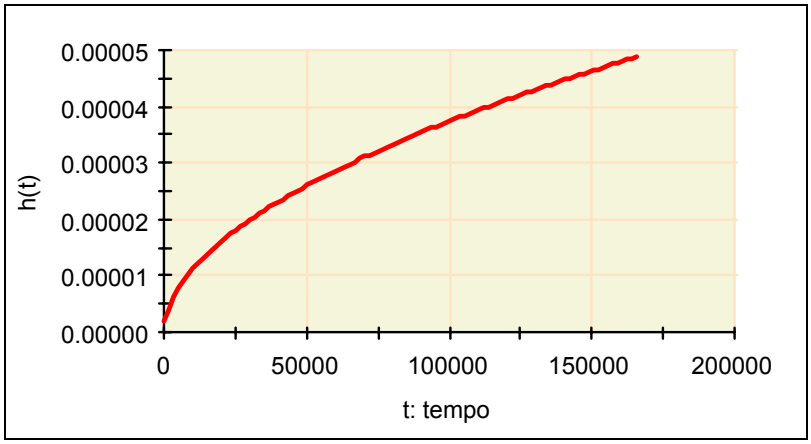

Figura 3: Função h(t), *hazard rate*, taxa de risco (Fonte: ProConf 98)

Relação de custos corretiva/preventiva	Intervalo ótimo de intervenção	Quilome-tragem	Risco ($)
< 3,7	Inviável	10.000	7,03% * dano econ.
3,7	36.110	20.000	18,9% * dano econ.
4	34.133	30.000	32,3% * dano econ.
5	29.643	40.000	45,4% * dano econ.
6	26.304	50.000	57,3% * dano econ.
7,5	22.726	75.000	79,4% * dano econ.
10	18.821	100.000	91,4% * dano econ.

Tabela 3: Intervalos ótimos de intervenção e riscos associados às quilometragens

5 Discussão do processo e resultados e alternativas para continuidade do trabalho

A seguir se discutem aspectos relevantes observados no decorrer do processo.
Foi possível focalizar o problema rapidamente. Abordagens estruturadas são bem recebidas na empresa-alvo, experiente em Qualidade Total. As análises de árvore de falhas e de modo de falha não representaram sensível contribuição à empresa, portanto não se dedicou uma grande parte da pesquisa a este ponto. Já a modelagem quantitativa baseada na análise de Weibull representou um avanço no conhecimento interno, principalmente por se associar a idéias do Pensamento Enxuto, um dos objetivos estratégicos atuais da empresa. Uma dificuldade foi percebida na obtenção dos dados para a modelagem. Nas bases existentes na empresa, para objetivos de modelagem, há alguma mistura de dados, resultando menores aderências a modelos teóricos. Apesar de se ter chegado a um modelo coerente (os parâmetros γ e θ ficaram próximos à base comparativa e à prática da empresa,

respectivamente), uma base dedicada talvez gerasse um modelo mais acurado. As concavidades na reta regressora de Weibull indicam que, embora satisfatória, a amostra poderia ser mais pura. A verificação de ajuste para outras distribuições se mostrou relevante por descartar distribuições como a normal, permitindo que se comprove o risco que se corre ao gerenciar o item pela média das incidências.
Ao fim, a abordagem ofereceu um indicador de risco estratégico: aumentando o risco, aloca-se o equipamento a operações de menor potencial de dano econômico. Para novos trabalhos se sugere o cálculo do risco para todo o veículo: um modelo possível consiste nos quatro sub-sistemas em série. Pelas distribuições de probabilidade de falhas de cada sub-sistema é possível calcular os indicadores de risco do veículo.

6 Conclusões

Apesar de as técnicas de Confiabilidade serem conhecidas e empregadas em projeto de produtos, o mesmo não ocorre, ao menos na mesma intensidade, na manutenção industrial. O rigorismo dos modelos, de certa forma, desestimula os profissionais de manutenção, habituados principalmente a ações de campo de curto prazo. Na verdade, as empresas, talvez por influência das práticas exigidas na produção em massa, esperam da manutenção ações rápidas e certeiras, que recomponham a capacidade produtiva tão logo esta se mostre ameaçada. Não faz parte do cenário de muitas empresas o uso de modelos de longa maturação para o planejamento da manutenção, sendo a organização das bases de dados voltada para os objetivos vigentes. Para o uso de modelagem, o melhor seria antes se definir o modelo e após a base de dados que o sustentará ao longo do tempo, escrutinando-se os fatores que influenciam a alocação dos indivíduos em populações específicas.
O cenário atual incentiva a pesquisa de metodologias baseadas em Confiabilidade, extensíveis à manutenção industrial, pois as aplicações já verificadas têm introduzido nas empresas ao menos duas práticas desejáveis: a integração da operação e da manutenção, necessária para a correta modelagem, e o uso da manutenção como alternativa estratégica, ao aumentar a capacidade de oferecer serviços e produtos diferenciados ao mesmo tempo em que reduz custos de mão-de-obra e materiais pela otimização das intervenções.

7 Referências Bibliográficas

BARRINGER, P.: Pipe Wall Thickness Decisions Using Weibull Analysis, in *Equipment Inspection For Mechanical Integrity*, McNeese State University, Lake Charles, LA, 1997, www.barringer1.com, visitado em março de 2002

BARRINGER, P.: *Weibull Database*, http://www.barringer1.com, visitado em abril/2002

ELSAYED, E.: *System Reliability Engineering,* Department of Industrial Engineering, Rutgers University, 1992

HAHN, G. & SHAPIRO, S.: *Statistical Models in Engineering*, John Wiley & Sons, New York, 1967

HIGGINS, R.: *Maintenance Engineering Handbook*, McGraw Hill, New York, 1995

HORÁCIO, H.: *Análise de Falhas*, F. Cristiano Otoni, Belo Horizonte, 1995

MONCHY, F.: *A Função Manutenção*, Editora Durban, São Paulo, 1989

NIPPON STEEL CORPORATION: *Notas de Conferência*, Muroran, Japão, 1988

QUALyTEC: *Weibull: Cálculo Matemático,* http://www.qualytek.com.br, visitado em setembro de 2001

SHINGO, S.: *Sistemas de Produção com Estoque Zero*, Bookman, P. Alegre, 1996

VACCARO, G.: *Modelagem e Análise da Confiabilidade de Sistemas,*Dissertação de Mestrado, PPGEP-UFRGS, P. Alegre, 1997