
Política Ótima de Manutenção Preventiva de Sistemas Reparáveis Baseada em Confiabilidade

Paulo Renato Alves Firmino
Márcio José das Chagas Moura
Andrea Pontual de Oliveira
Isis Didier Lins
Enrique Andrés López Droguett

XX Congresso Pan-Americano de Engenharia Naval,
Transporte Marítimo e Engenharia Portuária
São Paulo, outubro/2007

Introdução

- Desafio na definição de políticas de manutenção preventiva:
 - Conciliar a minimização de custos com a satisfação de índices mínimos de confiabilidade.
 - Em geral: custo da política de manutenção é diretamente proporcional ao número de intervenções.

- Eficácia de uma ação de manutenção: qualidade do reparo e capacidade de recuperar um sistema falho.

- Processos de Renovação Generalizados (PRG):
 - Definição da função confiabilidade do sistema em função da eficácia das manutenções.
 - *Dégradé* entre políticas de reparo perfeito e reparo mínimo.
 - Reparo imperfeito.

Introdução

- Estimação dos parâmetros do PRG:
 - Parâmetros da distribuição de probabilidade dos tempos entre falhas.
 - Parâmetro de rejuvenescimento q .
 - Estimadores de Máxima Verossimilhança (EMV).
 - Otimização via Nuvens de Partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO): maior eficiência na análise e maior precisão dos resultados.
- Política ótima de manutenção preventiva obtida analiticamente por meio da função inversa da confiabilidade do sistema condicionada aos reparos realizados.

Processos de Renovação Generalizados

- Sistema reparável: após falha retorna à condição operacional por procedimento que não seja sua completa substituição.
- Modelos probabilísticos comumente usados para tratar ações de reparo:
 - Processos de Renovação (PR): sistema retorna à condição de “tão bom quanto novo”.
 - Processo Não-Homogêneo de Poisson (PNHP): sistema retorna à condição de “tão ruim quanto antes”.
 - Ambos são processos estocásticos pontuais e os tempos de reparo são considerados desprezíveis.
- Em geral: sistemas submetidos a reparos imperfeitos.
- PRG: classificação do reparo de acordo com o grau de redução que proporcionam à idade real do sistema.

Processos de Renovação Generalizados

- PRG é uma generalização do PR e do PNHP e também possibilita a representação do reparo melhor e do reparo pior.
- Idade real (s_n): $\sum_{i=1}^n t_i$, em que t_i é o i -ésimo tempo entre falhas, $s_0 = 0$.
- Idade virtual (v_n): $v_i = qs_i$, $i = 0, 1, \dots, n$. É a idade do sistema calculada a partir da idade real após a n -ésima ação de reparo.

Parâmetro q e os tipos de reparo

Valor do parâmetro	$q < 0$	$q = 0$	$0 < q < 1$	$q = 1$	$q > 1$
Tipo de reparo	Melhor	Perfeito	Imperfeito	Mínimo	Pior

Processos de Renovação Generalizados

- Supondo que os tempos entre falhas $\mathbf{T} = \{t_1, t_2, \dots, t_{n(t)}\}$ aderem a uma distribuição condicional de Weibull com parâmetros α (de escala) e β (de forma) e introduzindo o conceito de idade virtual, a função de confiabilidade condicional é:

$$R(t_i) = P(T \geq v_{i-1} + t_i | T > v_{i-1}) = \exp \left[\left(\frac{v_{i-1}}{\alpha} \right)^\beta - \left(\frac{v_{i-1} + t_i}{\alpha} \right)^\beta \right]$$

- A função de verossimilhança para o PRG subjacente a \mathbf{T} é dada por:

$$L = \prod_{i=1}^n \frac{\beta}{\alpha^\beta} (v_{i-1} + t_i)^{\beta-1} \exp \left[\left(\frac{v_{i-1}}{\alpha} \right)^\beta - \left(\frac{v_{i-1} + t_i}{\alpha} \right)^\beta \right], v_0 = 0$$

- Os estimadores de máxima verossimilhança para α , β e q são, respectivamente, obtidos das expressões:

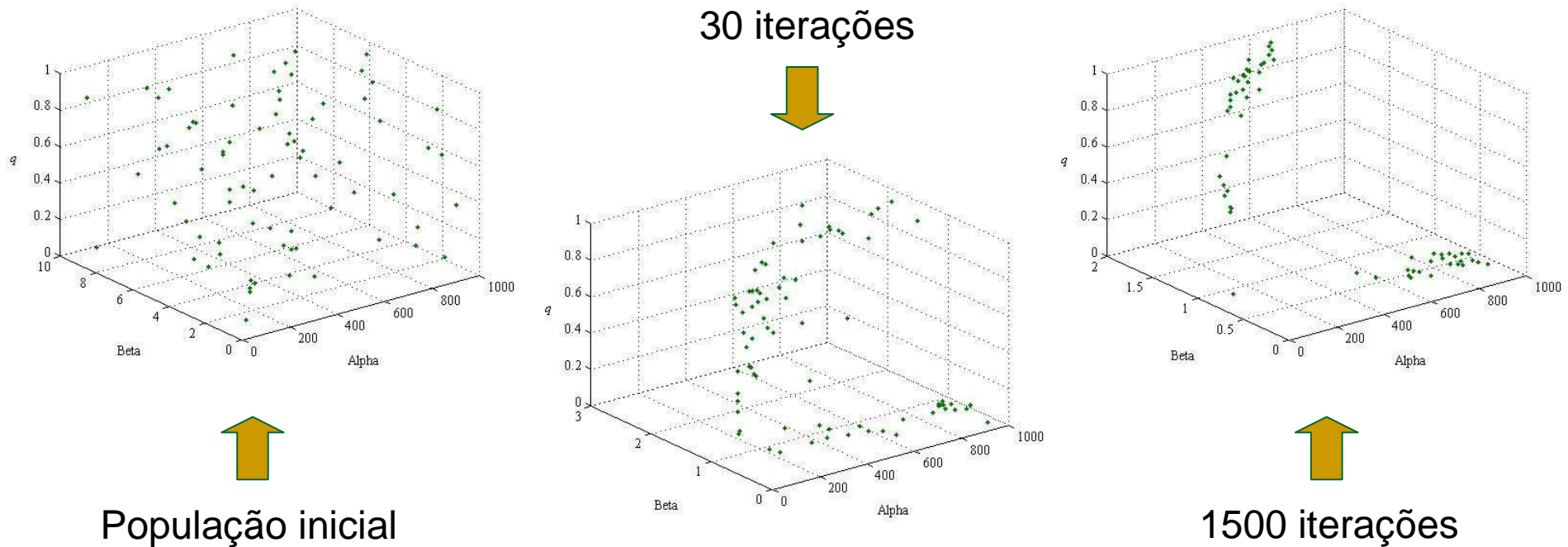
$$\frac{\partial \ln(L)}{\partial \alpha} = 0, \frac{\partial \ln(L)}{\partial \beta} = 0, \frac{\partial \ln(L)}{\partial q} = 0$$

Otimização via Nuvens de Partículas no Problema de Estimadores de Máxima Verossimilhança

- PSO: paradigma de computação evolucionária inspirado no comportamento coletivo em busca de adaptação ao meio ambiente.
- A comunidade (população) é representada por uma nuvem de partículas na qual cada ponto (indivíduo) é uma solução potencial do problema.
- A adaptação (ajuste) do indivíduo é medida por meio de uma função matemática. Quanto maior o valor dessa função (no caso de problemas de maximização), mais apto é o indivíduo.
- Dada uma população inicial, a nuvem de partículas movimenta-se para uma posição, a princípio, coletivamente melhor que a anterior. Repete-se o procedimento até que um critério de parada seja atingido.

Otimização via Nuvens de Partículas no Problema de Estimadores de Máxima Verossimilhança

- A introdução de PSO ao problema de EMV pode elevar a precisão das estimativas e a eficiência do processo de busca, se comparado ao método utilizado por Yañes *et al.*, (2002).



Modelo de Otimização

Minimizar $f(t_1, t_2, \dots, t_{n(t)}) = n(t)$

Sujeito a $R(t_i) \geq \gamma, \gamma \in [0, 1]$ e $i = 1, 2, \dots, n(t),$

em que

t - Tempo de missão avaliado

$n(t)$ - Número de manutenções preventivas realizadas até t

t_i - Tempo decorrido entre a $(i - 1)$ -ésima e a i -ésima manutenção preventiva

$R(t_i)$ - Função de confiabilidade em um instante qualquer após $(i - 1)$ manutenções preventivas

γ - Índice mínimo tolerável para a confiabilidade do sistema condicionada às manutenções realizadas

- Quanto maior γ , menor a probabilidade de ocorrência de falhas no período t .

Modelo de Otimização

- Os tempos $\{t_1, t_2, \dots, t_{n(t)}\}$ representam política de manutenção na qual se realiza o menor número possível de intervenções preventivas de acordo com γ .
- Suposição: manutenções preventivas e corretivas levam o sistema a condições operacionais semelhantes. Possibilidade do uso de dados de falha na modelagem do PRG.
- Definem-se os tempos de manutenção diretamente da função da confiabilidade condicional, a restrição do modelo é satisfeita se:

$$t_i = \alpha \left[\left(\frac{v_{i-1}}{\alpha} \right)^\beta - \ln(\gamma) \right]^{\frac{1}{\beta}} - v_{i-1}, i = 1, 2, \dots, n(t)$$

- Número de manutenções em t : $n(t) = \max\{i \in [0, \infty) | s_i \leq t\}$
- Se o sucesso de uma política de manutenção é a não realização de reparos corretivos no sistema durante o tempo de missão t , a probabilidade de sucesso da política ótima é: $R(t - s_{n(t)}) \cdot \gamma^{n(t)}$

Exemplo

- Dados de um exemplo apresentado em Ascher & Feingold (1984).
- Encontrar a política ótima de manutenção preventiva para um motor de propulsão. Tempo de missão: 1440 horas.

Tempos entre falhas de um motor de propulsão (em horas)

Número da falha	Tempo entre falhas	Número da falha	Tempo entre falhas	Número da falha	Tempo entre falhas
1	860	9	344	17	855
2	1608	10	1054	18	280
3	1134	11	680	19	490
4	2703	12	405	20	945
5	645	13	367	21	105
6	95	14	2758	22	127
7	1278	15	355	23	61
8	605	16	1084	24	326

Exemplo

- Cada partícula foi composta por valores para β e q . O parâmetro α foi definido pela expressão (dados truncados por falha):

$$\frac{\partial \ln(L)}{\partial \alpha} = 0 \Rightarrow \alpha = \left(\frac{\sum_{i=1}^n [(v_{i-1} + t_i)^\beta - (v_{i-1})^\beta]}{n} \right)^{\frac{1}{\beta}}$$

- Executou-se PSO e o método usado por Yañes *et al.*, (2002) 30 vezes.
- Experimentos foram realizados em um computador com capacidade de processamento de 3,06GHz.

Valores dos parâmetros e das derivadas parciais de $\ln(L)$ em relação a cada um deles

Parâmetro	PSO		Método de Yañes <i>et al.</i> , (2002)	
	Valor	Derivadas Parciais	Valor	Derivadas Parciais
α	1873,32 h	$-5.88 \cdot 10^{-9}$	1873,16 h	$4,91 \cdot 10^{-8}$
β	2,054690	$3,88 \cdot 10^{-6}$	2,055116	$-1,62 \cdot 10^{-3}$
q	0,157585	$2,70 \cdot 10^{-5}$	0,157476	$8,25 \cdot 10^{-3}$

Exemplo

Resultados obtidos via PSO e pelo método usado por Yañes *et al.*, (2002) para o problema EMV

	PSO		Método de Yañes <i>et al.</i> , (2002)	
	ln(L)	Tempo (seg.)	ln(L)	Tempo (seg.)
Melhor	-181,2294574	0,063	-181,2294580	0,344
Pior	-181,2294917	0,313	-181,2297520	18,485
Média	-181,2294586	0,159	-181,2295642	6,253666667
Moda	-181,2294574	-	-181,2294990	-
Mediana	-181,2294574	0,157	-181,2295310	4,7815
Desvio-padrão	0,0000063	0,0504644	0,0000918	5,1022319
Intervalo de confiança 2,5%	-181,2294709	0,060089776	-181,2297441	0
Intervalo de confiança 97,5%	-181,2294463	0,257910224	-181,2293842	16,25404119

Exemplo

Considerando-se $\gamma = 0,99$, a política ótima de manutenção preventiva indicou 12 intervenções no intervalo de tempo de 1440 horas.

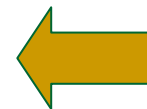
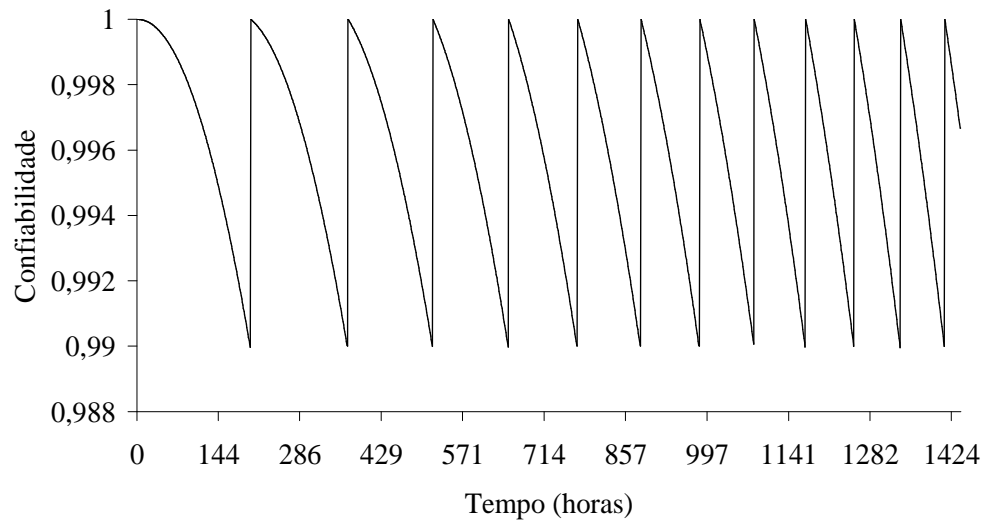
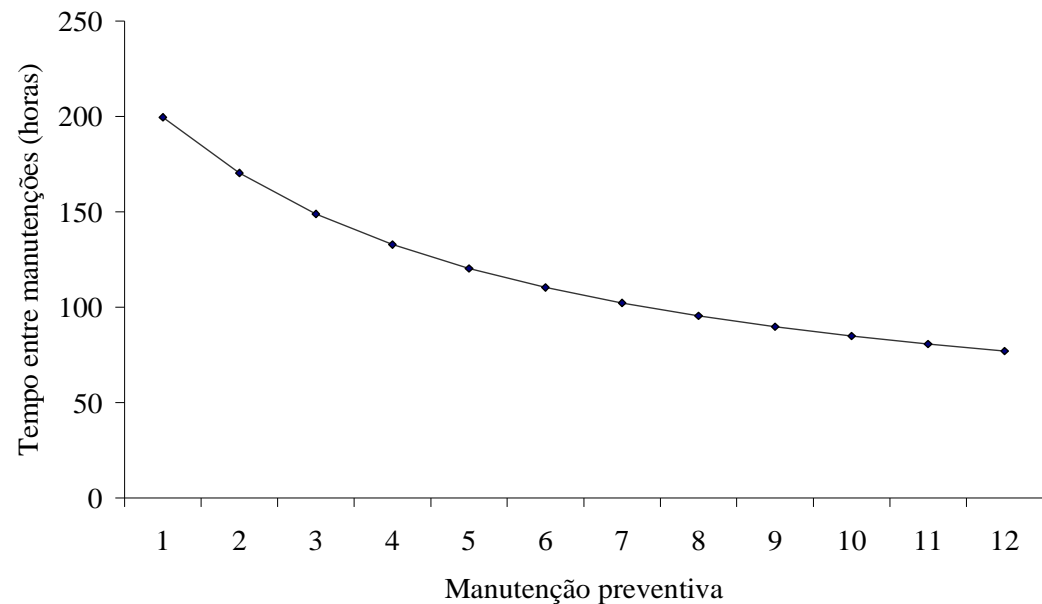
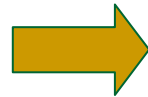
Instantes de manutenção e tempos entre intervenções (em horas)

Intervenção	Instante	Tempo entre manutenções	Intervenção	Instante	Tempo entre manutenções
1	199,6598685	199,6598685	7	984,649576	102,2230418
2	370,0250135	170,365145	8	1080,13168	95,4821033
3	518,9704566	148,9454431	9	1169,92139	89,7897145
4	651,7848805	132,8144239	10	1254,83535	84,9139539
5	772,0873845	120,302504	11	1335,52153	80,6861839
6	882,4265344	110,3391499	12	1412,50265	76,98112

$P(\text{sucesso da política de manutenção}) = 88,34\%$

Exemplo

Tempos entre manutenções propostos para o motor de propulsão (1440 horas)



Confiabilidade para o motor de propulsão condicionada à política ótima de manutenção preventiva proposta

Conclusões

- Identificação de políticas de manutenção considerando o nível de propensão (ou aversão) ao risco dos gestores: $(1 - \gamma)$.
- Modelo programação matemática de minimização do número de intervenções restrito a níveis mínimos de confiabilidade.
- Redução do número de intervenções: custos associados às paradas na produção devido à manutenção são os menores possíveis.
- Introdução de PRG: análise mais realista do sistema.
- Problema do EMV resolvido via PSO: resultados com maior precisão e redução considerável do tempo de simulação.