

## **Modelos econômicos para decisões na metodologia “manutenção centrada em confiabilidade” (RCM): estudos de caso na geração hidrelétrica**

Celso L. Figueirôa, Alberto M. Teodoro. Filho, Gabriel A. Costa Lima, Rafael Smith

### **1. INTRODUÇÃO**

Quando se decide adotar a metodologia RCM<sup>1</sup> o objetivo primário é aumentar a confiabilidade do sistema uma vez que é uma variável de desempenho importante na área de aviação devido a critérios de segurança. No entanto, em modelos tradicionais de RCM [Heap e Nowlan (1978), Moubray (1995), Smith (1993)] há uma série de limitações tais como (1) os aspectos quantitativos são pouco explorados, (2) não se faz uma análise dos aspectos econômicos, (3) não se estuda os trade-offs (objetivos conflitantes) que são muito importantes em sistemas de produção e menos importantes em aviação. Mas, esta metodologia também se adequa a outros objetivos tais como (a) minimizar a média do custo de manutenção ou (b) aumentar a média da disponibilidade.

Cerca de 30 anos depois, Jardine e Tsang (2006) desenvolvem modelos econômicos pontuais em nível de equipamentos (não de sistemas) e, por isso, pouco é tratado quanto aos trade-off que aparecem frequentemente nas discussões em problemas de indústria. Estes focam na busca pela eliminação de ações de manutenção que não sejam estritamente necessárias, mas garantindo um nível aceitável de confiabilidade em nível de elemento substituível.

No entanto, o problema real é que diferentes estratégias de manutenção podem ter objetivos finais antagônicos e por isso, deve-se analisar os prós e contras de cada alternativa. Este é um processo evolutivo e não se limita à análise de previsão de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade inicial no desenvolvimento de projeto do sistema, pois este carece ainda mais atenção da literatura aplicada aos problemas de gerenciamento científico dos ativos.

A metodologia faz uso de simulação de Monte Carlo em Diagramas de Blocos de Confiabilidade para entender o impacto de cada estratégia de manutenção em indicadores como custo médio de manutenção e disponibilidade média. Para realizar estas análises, um estudo de caso foi construído com o auxílio do software AWB (Availability Workbench) da Isograph. Os dados usados são de experiências reais de indústrias metalúrgicas, energia elétrica e mineração obtidos pelos trabalhos desenvolvidos pelos autores. São simuladas as situações em que tarefas diferentes para um mesmo sistema podem ser agrupadas aproveitando a parada do sistema.

Desta forma, nota-se que o caminho para os engenheiros de confiabilidade manterem análises coerentes requer empregar técnicas de simulação para a tomada de decisões uma vez que esta é a única maneira de entender os impactos de cada atividade de manutenção em relação ao sistema. Consequentemente, para escolher a melhor estratégia de manutenção é essencial fazer a simulação dos indicadores de desempenho do sistema como um todo e não apenas no nível de componente junto à combinação de agrupamento de tarefas pré-definidas ao longo de um determinado ciclo de vida.

Dentre os resultados verifica-se que: *(1) os trade-offs existentes entre os objetivos conflitantes (como minimizar o custo de manutenção e maximizar a disponibilidade), (2) o custo adicional de manutenção (investimento) para se obter ganhos de disponibilidade pode gerar taxas de retorno abaixo de custo de oportunidade do capital da empresa (em alguns casos), (3) se torna relevante a definição na empresa da sua Matriz de Risco para uma escolha multicritério com a ponderação apropriada.*

---

<sup>1</sup> O termo RCM (Reliability Centered Maintenance) é muito usado em língua portuguesa como Manutenção Centrada na Confiabilidade.

## 2. OBJETIVOS

Os principais objetivos deste trabalho envolvendo uma revisão e relaxamento de premissas dos modelos tradicionais de RCM são:

- Revisitar a metodologia de RCM e inserir os modelos econômicos na tomada de decisão em sistemas de produção
- Levar em consideração aspectos como as características de tempo até a falha, tipo de configuração do sistema, horizonte de planejamento, etc
- Fazer uma análise de trade-off entre variáveis de performance como custo de operação e manutenção *versus* disponibilidade, custos totais *versus* confiabilidade.

Além destes objetivos, um outro consiste no desenvolvimento de algoritmos para realizar as simulações de modo a gerar os resultados.

## 3. SIMULAÇÃO DE PLANOS DE MANUTENÇÃO NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O setor de energia elétrica é regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e, dentre diversos requisitos, há aqueles associados à disponibilidade e confiabilidade dos sistemas. Consideremos o caso de um sistema de geração de energia elétrica como o que é mostrado na Figura 1.

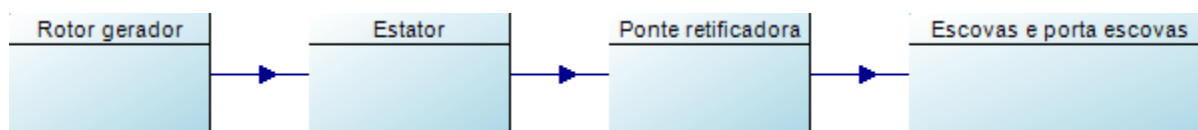


Figura 1: Diagrama de blocos de confiabilidade simplificado para o sistema de um gerador de energia elétrica

Na Figura 1 encontra-se a representação probabilística de um gerador composto pelos elementos rotor gerador, estator, ponte retificadora e escovas/porta escovas.

Com o modelo tradicional de RCM faz-se uma análise das tarefas de manutenção de forma qualitativa sem se preocupar com os aspectos quantitativos para estabelecer as frequências de preventivas. Uma vez que esta abordagem é muito conhecida na comunidade de manutenção, ela não será abordada aqui neste artigo e mais espaço será alocado no desenvolvimento da análise quantitativa de economia dos planos de manutenção.

Na Tabela 1 mostram-se informações sobre vida de elementos do sistema gerador, duração de manutenção preventiva, duração de manutenção corretiva, custo de manutenção corretiva e custo de manutenção preventiva.

Tabela 1: Informações sobre vida, duração de manutenções e custos de manutenções de elemento de um gerador

Elementos	Distribuição Weibull	Duração da	Custo da	Duração da	Custo da
-----------	----------------------	------------	----------	------------	----------

	Eta (horas)	Beta	Gama (horas)	corretiva (horas)	corretiva (R\$)	preventiva (horas)	preventiva (R\$)
Rotor gerador	4.000	4	0	24	R\$ 2.000	24	R\$ 1.000
Estator	2.000	3	500	48	R\$ 4.000	12	R\$ 3.200
Ponte retificadora	3.100	3,5	200	48	R\$ 5.000	36	R\$ 1.000
Escovas e porta escovas	1.000	4,5	0	24	R\$ 600	6	R\$ 500

Os parâmetros mostrados na Tabela 1 foram obtidos a partir de dados históricos encontrados na prática dos relatórios de manutenção do gerador. Para a variável tempo de vida dos elementos do gerador utilizou-se a distribuição Weibull. Por exemplo, a vida do estator é modelada por meio de uma distribuição Weibull com parâmetro igual a 3,0, parâmetro de escala igual a 2.000,00 horas e parâmetro de localização igual a 500,00 horas. Para a duração de tempo de manutenção corretiva e manutenção preventiva assume-se que seja determinística. O mesmo ocorre para o custo das manutenções mostrados na sexta coluna e oitava coluna.

Além das informações de vida, duração de manutenções e custos, faz-se necessário informar as políticas de manutenção a serem aplicadas ao sistema. Na Tabela 2 mostram-se os intervalos de manutenção preventiva com base em três possíveis estratégias podem ser encontrados.

Tabela 2: Políticas ótimas de manutenção preventiva de um gerador

Item	Minimizar o custo (em horas)	Maximizar a disponibilidade (em horas)	Tempo operacional (h) onde o risco é 20% (em horas)
Rotor gerador	3.000	-	2.749,2
Estator	-	1.400	1.713,1
Ponte retificadora	1.750	-	2.219,5
Escovas e porta escovas	-	600	716,5

As políticas ótimas de manutenção preventiva mostradas na Tabela 2 foram determinadas empregando-se o software RCMcost da Isograph. Por exemplo, o intervalo de manutenção preventiva para minimizar o custo do rotor gerador é 3.000 horas. No caso do estator, a política de substituição é estabelecida em 1.400 horas com foco para maximizar a disponibilidade.

Para se determinar o intervalo ótimo de manutenção preventiva para minimizar a soma do custo unitário de manutenção preventiva e corretiva emprega-se a seguinte equação:

$$CT(T_p) = \frac{C_p * R(T_p) + C_c * (1 - R(T_p))}{\int_0^{T_p} R(t) dt} \quad (1)$$

Onde CT é o custo total de preventiva e corretiva,  $T_p$  é o intervalo ótimo de manutenção preventiva a ser encontrado, R é a probabilidade de sobrevivência,  $C_c$  é o custo da manutenção corretiva e  $C_p$  é o custo da manutenção preventiva.

Para de determinar o intervalo ótimo de manutenção preventiva para se maximizar a disponibilidade operacional emprega-se a seguinte equação:

$$DO(T_p) = \frac{\int_0^{T_p} (1 - F(T)) dT}{\int_0^{T_p} (1 - F(T)) dT + T_1 F(T_p) + T_2 (1 - F(T_p))}, \quad (2)$$

onde DO é a disponibilidade operacional, F é a probabilidade de falha,  $T_p$  é o intervalo ótimo de manutenção preventiva,  $T_1$  é a duração de tempo da manutenção corretiva e  $T_2$  é a duração de tempo da manutenção preventiva.

A partir destas informações, a próxima etapa consiste em realizar uma simulação do comportamento do sistema em termos de suas principais variáveis de performance. Esta simulação é realizada pelo software AvSim da Isograph e os resultados são mostrados na Tabela 3 para um período de 10 anos (87.600 horas).

Tabela 3: Resultados da simulação dos planos de manutenção preventiva do gerador

Política de preventiva	Custo médio simulado	Disponibilidade média simulada	Número de interrupções
Máxima disponibilidade	R\$ 467.317	95,51%	251,6
Mínimo custo	R\$ 308.838	92,70%	198,7
Aceitação de 20% de risco de corretiva	R\$ 350.810	94,94%	240,3
Somente corretivas	R\$ 393,384	93,38%	173,6

Ao se observar os resultados na Tabela 3 nota-se que não há uma grande variação na disponibilidade média do sistema gerador para o período de 10 anos de operação. Mas, o mesmo não ocorre quando se olha o número de interrupções e o custo esperado.

A estratégia de manutenção para maximizar a disponibilidade é a que requer um maior custo, enquanto aquela com menor custo é também a que gera a menor disponibilidade. Na Figura 2 mostra-se os valores encontrados para a relação entre disponibilidade do sistema e o custo e manutenção.

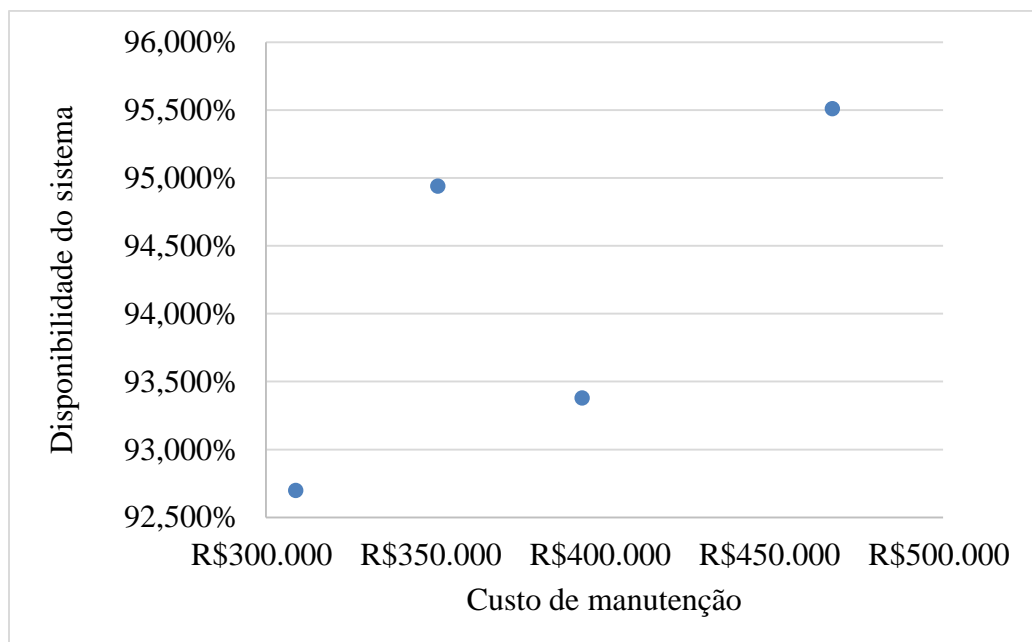


Figura 2: Curva da relação entre disponibilidade média do sistema e o custo total de manutenção

Os resultados mostrados na Figura 2 constituem uma das contribuições deste trabalho onde se pretende mostrar que o modelo de RCM deve ser considerado em termos também econômicos e não somente em confiabilidade como ocorre na aviação.

Um outro elemento importante a ser considerado é que se deve ter uma clara definição da exposição ao risco a ser tolerada pela empresa. Em muitos casos isso não ocorre de forma clara. Não se encontra dentro do escopo deste artigo a definição de uma matriz de riscos, mas sim as consequências das escolhas uma vez que ela já exista. Por exemplo, se o intervalo de preventiva for realizado de modo que exista 20% de probabilidade de falha, então a disponibilidade média do sistema será 94,94% e o custo será R\$ 350.810.

#### 4. SIMULAÇÃO DE PLANOS DE MANUTENÇÃO NA MINERAÇÃO

Além do estudo desenvolvido para o setor elétrico, os autores apresentam também estudos desenvolvidos no setor de mineração. Por razão de confidencialidade, os valores numéricos podem ter sido alterados.

Na Figura 3 mostra-se o diagrama de blocos que representa a lógica de probabilidade de sucesso de funcionamento (confiabilidade) de um sistema de processamento mineral.

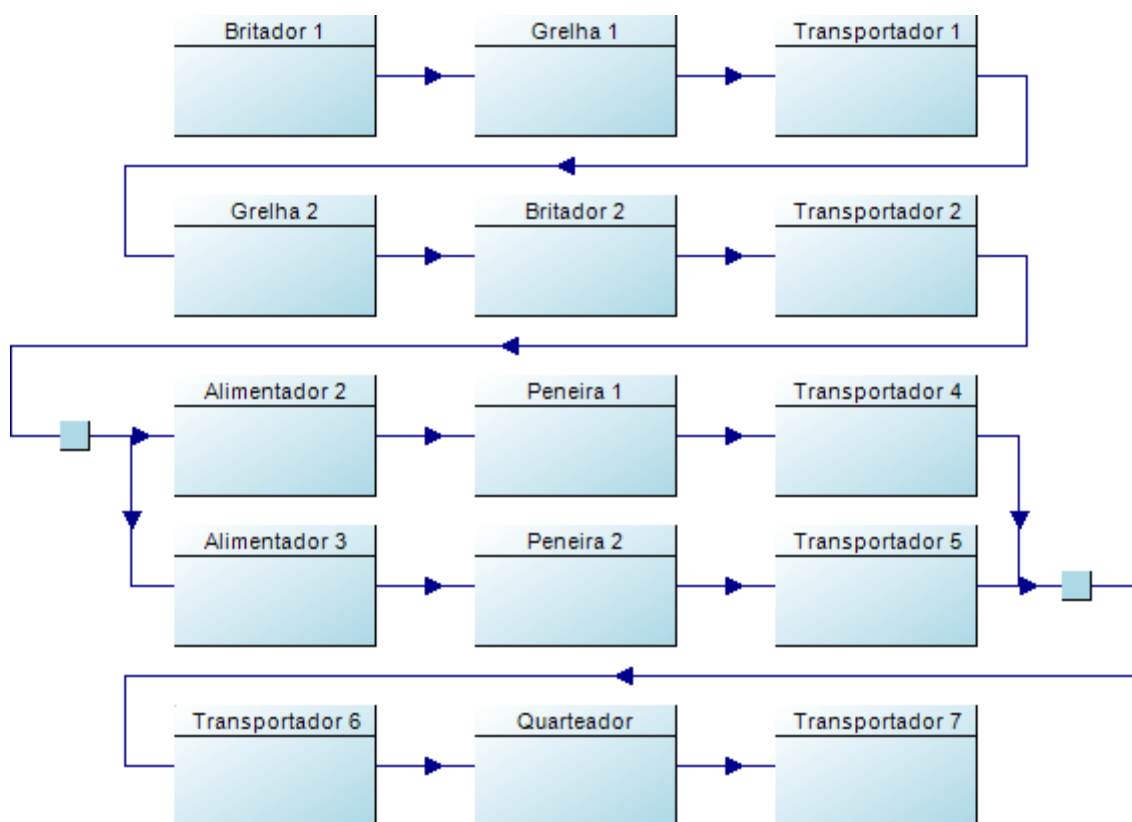


Figura 3: Diagrama de blocos de confiabilidade simplificado de um sistema de mineração

Nota-se na Figura 3 que há elementos na configuração tipo série, tipo paralelo, ou seja, uma configuração chamada de mista. As informações sobre vida dos elementos, duração das manutenções e custos se encontram organizadas na Tabela 3.

Tabela 4: Variáveis básicas para o modelo de um sistema de mineração

Equipamentos	Distribuição Weibull		Duração da corretiva (horas)	Custo da corretiva (R\$)	Duração da preventive (horas)	Custo da preventive (R\$)
	Eta (horas)	Beta				
Alimentador	4.780	2,1	24	R\$ 5.000	24	R\$ 4.900
Britador	3.010	4,2	24	R\$ 20.000	24	R\$ 10.000
Grelha	5.850	3,8	24	R\$ 12.000	24	R\$ 6.000
Peneira	3.910	3,4	48	R\$ 10.200	12	R\$ 9.500
Quarteador	3.490	2,7	48	R\$ 10.000	12	R\$ 9.000

Transportador	10.900	2,6	48	R\$ 5.200	24	R\$ 5.000
---------------	--------	-----	----	-----------	----	-----------

Tanto a escolha da distribuição Weibull como os valores de seus parâmetros são decorrentes dos registros históricos existentes em manutenção. Os detalhes da parte de análise de dados estão fora do escopo deste trabalho, mas o leitor interessado pode consultar Jardine e Tsang (2006).

Na Tabela 5 detalha-se duas políticas de manutenção preventiva que podem ser implementadas a partir da análise de tarefas, sendo uma com foco na redução de custo e outra na maximização de disponibilidade.

Tabela 5: Políticas de manutenção preventiva de um sistema de mineração

Equipamento	Intervalo de preventiva com foco em custo (em horas)	Intervalo de preventiva com foco em disponibilidade (em horas)
Alimentador	-	-
Britador	2.190	-
Grelha	4.380	-
Peneira	-	2.920
Quarteador	-	2.190
Transportador	-	8.760

A partir das informações mostradas nas Tabelas 5, 4 e da Figura 3, realiza-se uma simulação empregando-se o software AvSim para analisar a performance dos seguintes cenários:

1. Minimizar o custo de manutenção do sistema
2. Maximizar a disponibilidade do sistema
3. Ganhos de se fazer um agrupamento da preventiva de britador, peneira e quarteador
4. Resultado com a opção de não se fazer manutenção preventiva

Depois de realizar 10.000 simulações dos quatro cenários (1, 2, 3 e 4) para o período de 10 anos de operação, os resultados são sintetizados na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados da simulação dos planos de manutenção preventiva de um sistema de mineração

Variáveis de desempenho	Cenários simulados			
	1	2	3	4
Custo(em R\$)	2.573.917	3.183.649	3.362.522	2.880.270

Disponibilidade	93,4%	94,8%	95,2%	94,1%
Média do tempo indisponível (em horas)	5.768	4.580	4.213	5.173
Desvio padrão do tempo indisponível (em horas)	181	201	320	176
Média do número de interrupções (em horas)	174	174	139	151
Desvio padrão do número de interrupções (em horas)	6	5	11	5
Média da capacidade	91,3%	93,1%	94,0%	92,0%
Desvio padrão da capacidade	0,2%	0,3%	0,4%	0,2%

Ao se observar os resultados mostrados na Tabela 6, o cenário 1 é aquele com menor custo, mas ao mesmo tempo sua disponibilidade é menor. O mesmo pode ser observado ao se analisar o comportamento da relação entre custo de manutenção e capacidade de produção.

Ao se mudar a estratégia de manutenção, causam-se implicações de custos e lucros no sistema de mineração. Ao se mudar as estratégias 1 (minimizar custo de manutenção) para a 2 (Maximizar a disponibilidade do sistema) o fluxo de caixa resultante é mostrado na Tabela 6.

Tabela 6: Fluxo de caixa do resultado da mudança da estratégia de manutenção 1 para a 2

Anos	Investimento	Fluxo de caixa incremental	Tributação	Fluxo de caixa líquido
0	-609.732			-609.732
1		142.560,00	48.470,40	94.089,60
2		142.560,00	48.470,40	94.089,60
3		142.560,00	48.470,40	94.089,60
4		142.560,00	48.470,40	94.089,60
5		142.560,00	48.470,40	94.089,60
6		142.560,00	48.470,40	94.089,60
7		142.560,00	48.470,40	94.089,60
8		142.560,00	48.470,40	94.089,60
9		142.560,00	48.470,40	94.089,60
10		142.560,00	48.470,40	94.089,60

O investimento a ser realizado é a diferença de custo entre as estratégias. O Ganho médio de horas de disponibilidade é 1.188 em 10 anos, ou seja, uma média anual de 118,8 horas. A margem líquida de



contribuição ao lucro é R\$ 1.200,00 por hora. Além disso, tem-se a tributação de 34% que incidem sobre qualquer incremento de lucro líquido. Portanto, com estas informações, tem-se um valor presente líquido (VPL) igual a R\$ -55.617, uma taxa interna de retorno (TIR) igual a 8,78% e um payback de 7 anos. Logo, claramente nota-se que neste exemplo a mudança de estratégia de manutenção não cobre nem o custo de oportunidade do capital da empresa.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho os autores desenvolveram uma extensão da abordagem tradicional de RCM de modo a incorporar os elementos quantitativos na tomada de decisões. As principais conclusões são:

- O modelo de RCM tradicional em que apenas as tarefas são determinadas de forma mais qualitativa é insuficiente para a tomada de decisão final.
- Ao se alterar um plano de manutenção, os resultados podem ser diferentes objetivos conflitantes como o caso de custo de manutenção *versus* disponibilidade. E mais, para se aumentar a disponibilidade então custo deve subir também.
- A alteração dos planos de manutenção causa implicações sobre custo, produção e entrada de caixa. Por isso, torna-se necessário o emprego de modelos de simulação para prever os novos indicadores de performance do sistema e também a taxa de retorno sobre os investimentos envolvidos.

Por fim, destaca-se que o modelo de RCM desenvolvido para a aviação possui com foco a segurança e não no custo. Mas, em sistemas de produção o tomador de decisões deve considerar a estratégia que minimiza custo e aumenta lucro e, por isso, os modelos clássicos devem ser relaxados como nos exemplos deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e à AES-Tietê pelo financiamento para a realização desta pesquisa.

## 5. REFERÊNCIAS

- [1] JARDINE, A. K. S. & TSANG, A. H. C. Maintenance, replacement, and reliability: Theory and applications. CRC Press, Boca Raton, FL, 2006
- [2] MOUBRAY, J. Reliability-Centered Maintenance. Second edition. Industrial press Inc. New York, NY, 1995
- [3] NOWLAN, F. S. & HEAP, H.F. Reliability-Centered Maintenance. Defense documentation center, defense logistics agency, Alexandria, VA, 1978
- [4] SMITH, A. M. Reliability-centered maintenance. McGraw-Hill, New York, NY, 1993