



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GMI 03
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

**GRUPO XII
GRUPO DE ESTUDO DE ASPECTOS TÉCNICOS E GERENCIAIS DE MANUTENÇÃO EM INSTALAÇÕES
ELÉTRICAS - GMI**

TEMPO ÓTIMO ENTRE MANUTENÇÕES PREVENTIVAS DE EQUIPAMENTOS DE SUBESTAÇÕES

Sergio Brandão da Motta *

Enrico Antônio Colosimo

Wagner Baracho dos Santos

CEMIG

UFMG

CEMIG

RESUMO

O grande desafio dos profissionais que planejam a manutenção é definir quando e que tipo de intervenção fazer em um equipamento reparável, a fim de garantir sua disponibilidade com custos compatíveis. Este informe técnico apresenta um modelo estatístico que, aplicado aos dados de manutenção dos equipamentos, permite responder se uma política de manutenção preventiva sistemática é aplicável a um determinado grupo de equipamentos e, caso positivo, determinar qual o intervalo entre preventivas que minimiza o custo total de manutenção. O modelo considera separadamente os custos dos diferentes tipos de ações de manutenção associados à probabilidade de ocorrência de cada um, para determinar a política ótima de manutenção preventiva que minimiza o custo médio de manutenção por unidade de tempo.

PALAVRAS-CHAVE

Manutenção preventiva, equipamento de subestação, processo de Poisson.

1.0 - INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do modelo tratado neste artigo foi motivado pela necessidade de se determinar políticas de manutenção baseadas em dados relativos aos tempos de falha de equipamentos do sistema de transmissão de energia elétrica da CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais). No atual modelo do setor elétrico brasileiro, as empresas transmissoras de energia elétrica são remuneradas pela disponibilidade de seus equipamentos, sendo as indisponibilidades penalizadas com pesados abatimentos nesta remuneração. Desta forma, ao adotar uma política de manutenção com manutenções preventivas (MP), é fundamental encontrar o tempo ótimo entre MPs que garanta a maior disponibilidade dos ativos da empresa com o mínimo de custos. Atualmente, o grande desafio dos profissionais que planejam a manutenção é definir quando e que tipo de intervenção fazer em um equipamento. Gilardoni e Colosimo (2006) apresentam uma proposta para estimar o tempo ótimo sob uma política de manutenção preventiva periódica, considerando os custos de manutenções preventivas sistemáticas e de manutenções corretivas decorrentes de um tipo de evento aleatório. Entretanto, em alguns casos o estudo torna-se mais preciso quando se separam os eventos aleatórios em grupos com características distintas, e neste caso, teríamos mais de um tipo de evento aleatório. Um caso muito útil é a caracterização dos tipos de eventos aleatórios classificando-os pelas suas causas.

Sabe-se que determinadas causas são de fácil detecção e podem ser tratadas por meio de manutenções preventivas baseadas na condição do equipamento. Neste caso, um reparo ou troca de componente só é realizado se for constatada uma anormalidade. Existe um outro grupo de causas que só podem ser identificadas e tratadas por meio de manutenções preventivas realizadas periodicamente com o equipamento fora de operação. Supõe-se que, no longo prazo, o custo de manutenções preventivas periódicas (baseadas no tempo) sejam

(*) Avenida Barbacena, 1200/13º – ala B2 – Santo Agostinho - CEP 30190-131 Belo Horizonte, MG – Brasil
Tel: (+55 31) 3299-3158 – Fax: (+55 31) 3299-4323 – Email: sergiob@cemig.com.br

maiores do que o custo de manutenções baseadas na condição e menores que o custo de reparos realizados após a falha do equipamento. Tal suposição baseia-se tanto em premissas lógicas como na experiência prática dos profissionais de manutenção de equipamentos e instalações do sistema elétrico brasileiro. Desta forma, quando existe diferença considerável nos custos relacionados aos tipos de eventos, esta deve ser considerada. A não observância desta diferença pode conduzir a resultados bastante distorcidos.

O objetivo deste informe técnico é apresentar uma proposta para estimar o tempo ótimo entre manutenções preventivas que minimiza o custo total com manutenção, tratando de forma separada dois tipos de eventos aleatórios independentes. Esta proposta é facilmente estendida para mais de dois tipos de eventos aleatórios.

O modelo foi inicialmente aplicado a uma amostra de dados de manutenção de chaves seccionadoras do sistema de transmissão da CEMIG, demonstrando ótima sensibilidade tanto aos padrões de falhas dos equipamentos, quanto aos custos de manutenção, especialmente se a estes forem agregadas as perdas de receitas por PVI (Parcela Variável por Indisponibilidade de funções de transmissão). Atualmente está em fase de aplicação efetiva ao total de chaves seccionadoras do sistema de transmissão da empresa, com planos de, posteriormente, ser aplicado a outros equipamentos de subestações.

2.0 - TERMINOLOGIA

No decorrer deste trabalho serão utilizados alguns conceitos básicos relacionados à manutenção de equipamentos. Por isto, será apresentada abaixo uma descrição sucinta de tais conceitos.

Falha: Término da condição (habilidade) ou a impossibilidade de um item para desempenhar sua função requerida. O aparecimento de uma falha leva o item, invariavelmente, ao estado indisponível, por atuação automática da proteção, ou por desligamento da unidade em caráter de emergência.

Defeito: Alteração ou imperfeição do estado de uma instalação/equipamento, não a ponto de causar o término da habilidade em desempenhar a sua função requerida, já que a instalação/equipamento pode operar com restrições. Neste caso, programa-se a realização de uma manutenção preventiva, denominada "manutenção preventiva não sistemática", para evitar que o equipamento chegue a falhar.

Manutenção Corretiva (MC): É a execução de tarefas de manutenção não-planejadas para restaurar as capacidades funcionais de equipamentos ou sistemas falhados. A manutenção corretiva é a forma mais primária e mais cara de manutenção. Apesar disto torna-se impossível eliminá-la completamente, pois não se pode prever o momento exato em que ocorrerá uma falha que obrigará a uma manutenção corretiva.

Manutenção Preventiva (MP): É a execução de tarefas de manutenção previamente planejadas. É desempenhada para manter um item em condições satisfatórias de operação através de inspeções sistemáticas, detecção e prevenção de falhas incipientes. Pode ser baseada no tempo ou na condição. Será baseada no tempo quando as atividades para reter as capacidades funcionais dos equipamentos ou sistemas foram planejadas para serem realizadas em pontos específicos no tempo. Será baseada na condição, quando as tarefas são programadas devido a anormalidades (defeitos) detectadas nos equipamentos em operação. Neste caso, ela é conhecida como manutenção preventiva não sistemática. Se as tarefas originam-se do acompanhamento de parâmetros de condição ou desempenho do equipamento em operação, tem-se o tipo mais refinado de manutenção preventiva, também conhecida como Manutenção Preditiva.

Manutenção Perfeita: É quando no ato da manutenção, além de reparar componentes do equipamento falhados ou com iminência de falha, atua-se também nos com potencialidade de falha. Nestes componentes são realizados testes assegurando o seu funcionamento como um novo, ou providenciando sua substituição. Observa-se neste caso, que ao final da manutenção o equipamento estará tão bom quanto novo ("as good as new") em termos de probabilidade de falha.

Reparo Mínimo: Restaura o equipamento ao estado em que se encontrava imediatamente antes da falha ("as bad as old"). Neste caso atua-se somente na parte defeituosa do equipamento, substituindo-a ou restaurando a sua condição original de funcionamento. O reparo ou substituição do componente defeituoso é realizado conforme critérios técnicos rigorosos, mas, por se tratar de uma intervenção pontual, não introduz melhoria no equipamento, que continua com a mesma probabilidade de falha que tinha antes de falhar.

3.0 - BASE CONCEITUAL: O MODELO DE POISSON

Apresenta-se a seguir um pequeno resumo da base conceitual utilizada no desenvolvimento do modelo estatístico.

3.1 O modelo de Poisson

O Poisson é um processo de contagem de eventos que pode ser definido como sendo uma coleção de variáveis aleatórias independentes $N(t)$, com $t \geq 0$, em que $N(t)$ é o número de eventos no intervalo $(0, t]$. $N(t)$ é caracterizado

por incrementos independentes e pela sua função de intensidade que apresenta a seguinte forma:

$$I(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P[N(t, t + \Delta t) = 1]}{\Delta t}$$

O Processo de Poisson é chamado de Processo de Poisson Homogêneo (PPH), quando a função intensidade $I(t)$ é constante. Pode-se dizer neste caso que o processo possui incrementos estacionários. Quando a função intensidade depende do tempo, tem-se a classe mais geral dos processos de contagem denominada Processo de Poisson Não-Homogêneo (PPNH). Maiores informações sobre o Processo de Poisson podem ser obtidos em Gut (1995).

O Processo de Poisson Não-Homogêneo (PPNH) possui um papel fundamental para modelar a ocorrência de eventos aleatórios sob um reparo mínimo (Ascher e Feingold, 1984). Um PPNH é freqüentemente especificado pela número médio de eventos em $(0, t]$ que é dado por:

$$M(t) = E(N(t)) = \int_0^t I(u) du$$

Várias formas paramétricas para $I(t)$ são utilizadas na literatura, destacando-se a Lei de Potência proposta por Crow (1974) que tem a forma $I(t) = \beta t^{\beta-1} / \alpha^\beta$ e a log-linear que tem a forma $I(t) = \exp(\alpha + \beta t)$. A função de lei de potência é a utilizada neste artigo devido ao seu destaque na área. Os métodos estatísticos são apresentados na Seção 4.

4.0 - FUNÇÃO CUSTO E TEMPO ÓTIMO ENTRE MANUTENÇÕES PREVENTIVAS

4.1 Introdução

A função custo representa o valor médio com manutenção por unidade de tempo, e é composta por uma parte determinística relacionada aos custos com MP periódica e outra aleatória relacionada aos custos dos reparos mínimos.

Considere t_{MP} o intervalo de tempo entre duas MP consecutivas e suponha que:

- i. O tempo de reparo é desprezível quando comparado com os tempos entre eventos.
- ii. A MP é perfeita. Ou seja, ela retorna o sistema a condição de tão bom quanto novo.
- iii. Em caso de falha entre as MPs, é dado um reparo mínimo. Ou seja, este reparo mantém o sistema na condição de tão ruim quanto velho.

O intervalo de tempo $(0, t]$ pode ser decomposto em sub-intervalos da seguinte forma:

$$(0, t] = (0, 1t_{MP}] \cup (1t_{MP}, 2t_{MP}] \cup \dots \cup ((m-1)t_{MP}, mt_{MP}] \cup (mt_{MP}, t],$$

sendo m o maior inteiro menor ou igual a t/t_{MP} . A Figura 1 ilustra a decomposição do intervalo $(0, t]$.

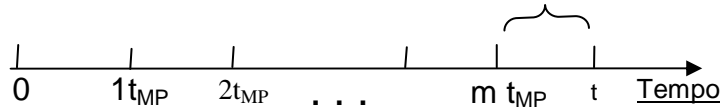


Figura 1 – Decomposição do intervalo de tempo observado $(0, t]$

A seguir o tempo ótimo entre MP para o caso de dois tipos de eventos aleatórios é apresentado na Seção 4.2.

4.2 Tempo ótimo entre MP para o caso de dois tipos de eventos aleatórios

Considera-se que, além de MP, ocorram dois tipos de eventos aleatórios. Os casos em que o reparo mínimo está relacionado a mais de um tipo de eventos aleatórios não são raros. Suponha, por exemplo, o caso de equipamentos em funcionamento que passam por inspeções periódicas e que, se detectado alguma anormalidade, uma manutenção é programada para corrigi-lo. Outros tipos de anormalidades só podem ser detectados com o equipamentos desligado e tendem a possuir custos de reparo maiores do que os citados acima. A seguir é apresentada uma proposta para estimar o tempo ótimo entre manutenções preventivas considerando o custo com MP e os custos com reparo mínimo decorrentes de dois tipos de eventos aleatórios independentes, neste caso, falha e defeito.

Suponha que os reparos mínimos estão relacionados a dois tipos de eventos aleatórios. Algumas anormalidades estão relacionadas a causas que podem ser detectadas por inspeções periódicas realizadas com os equipamentos em operação e outras a causas que só podem ser detectadas meio de manutenções preventivas periódicas feitas com os equipamentos desligados. Supondo-se que o custo de reparo das anormalidades relacionadas ao primeiro tipo de causas é menor que o de reparo dos eventos relacionados ao segundo tipo, apresenta-se a seguir uma proposta para estimar o tempo ótimo entre manutenções preventivas considerando o custo com MP periódica e os custos com reparo mínimo decorrentes dos dois tipos de eventos aleatórios independentes (eventos do tipo 1 e eventos do tipo 2, respectivamente).

Considera-se que os eventos dos tipos 1 e 2 são independentes e ocorrem segundo um Processo de Poisson Não-Homogêneo (PPNH). Sejam:

- C_1 : o custo unitário de cada reparo mínimo devido ao evento do tipo 1;
- $I_1(t_1)$: a intensidade de ocorrência do evento do tipo 1;
- C_2 : o custo unitário de cada reparo mínimo devido ao evento do tipo 2;
- $I_2(t_2)$: a intensidade de ocorrência do evento do tipo 2.
- Os eventos dos tipos 1 e 2 são independentes.

Pode-se demonstrar que a função custo que trata separadamente os custos decorrentes de dois tipos de eventos aleatórios é dada por:

$$H_{(0,t]}(t_{MP}) = \frac{1}{t_{MP}} \left[C_{MP} + C_1 \int_0^{t_{OT}} I_1(u) du + C_2 \int_0^{t_{OT}} I_2(u) du \right].$$

Na equação acima, $H_{(0,t]}(t_{MP})$ representa o custo médio por unidade de tempo. $H_{(0,t]}(t_{MP})$ significa, por exemplo, o custo médio anual com manutenção se t for medido em anos. O problema então se resume em encontrar o mínimo da função custo para um política que determina manutenções preventivas a cada t_{MP} unidades de tempo.

Igualando-se a derivada da função acima a zero, encontra-se o tempo entre manutenções preventivas que minimiza o custo (tempo ótimo). Este valor é a solução da seguinte equação:

$$C_{MP} = C_1 \int_0^{t_{OT}} I'_1(u) du + C_2 \int_0^{t_{OT}} I'_2(u) du.$$

Quando os dois tipos de eventos aleatórios possuem funções de intensidade lei de potência dadas por $I_1(t, \alpha_1, \beta_1)$ e $I_2(t, \alpha_2, \beta_2)$, o tempo ótimo entre manutenções preventivas é o valor de t_{OT} que satisfaz a seguinte equação:

$$C_{MP} = C_1 (\beta_1 - 1) \left(\frac{t_{OT}}{\alpha_1} \right)^{\beta_1} + C_2 (\beta_2 - 1) \left(\frac{t_{OT}}{\alpha_2} \right)^{\beta_2}.$$

No caso de ambas possuírem parâmetros de forma iguais $\beta_1 = \beta_2$, diferenciando-se apenas no parâmetro de escala, o tempo ótimo tem solução analítica dada por:

$$t_{OT} = \left\{ \frac{C_{MP}}{(\beta - 1) \left[C_1 \left(\frac{1}{\alpha_1} \right)^\beta + C_2 \left(\frac{1}{\alpha_2} \right)^\beta \right]} \right\}^{1/\beta}.$$

Em caso contrário, $\beta_1 \neq \beta_2$, a expressão para o tempo ótimo não oferece uma solução analítica. Desta forma é necessário um método numérico, tipo o de Newton-Raphson, para poder encontrar uma solução.

4.3 Metodologia Estatística

O método de máxima verossimilhança (MV) é utilizado a fim de estimar o t_{OT} para um ou mais sistemas idênticos sob uma determinada política de MP com modos de falha segundo um PPNH. Existem duas formas de observar dados de um sistema reparável: (1) truncado por falha, quando se pára de observar o sistema após um número pré-especificado de falhas ou (2) truncado por tempo, quando se pára de observar o sistema em um tempo pré-determinado. As estimativas de máxima verossimilhança para um PPNH (Rigdon e Basu, 2000) baseado em uma amostra de k sistemas em que cada um apresenta n_i falhas e acompanhado por um período $(0, T_i]$ (truncado por tempo) são:

$$\hat{\beta} = \frac{N}{\left(\frac{N}{\sum_{i=1}^k T_i^{\hat{\beta}}} \right) \sum_{i=1}^k T_i^{\hat{\beta}} \log T_i - \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} \log t_{ij}}$$

$$\hat{\alpha} = \left(\frac{\sum_{i=1}^k T_i^{\hat{\beta}}}{N} \right)^{1/\hat{\beta}}$$

5.0 - FUNÇÃO CUSTO E TEMPO ÓTIMO ENTRE MANUTENÇÕES PREVENTIVAS

Os métodos propostos foram aplicados a um conjunto de dados relativos a chaves seccionadoras da área de transmissão da CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais). Os passos do processo de determinação da frequência ótima de manutenções preventivas em função do custo são os seguintes:

- 1) Separação dos subconjuntos de eventos, caso ocorra mais de um tipo de evento aleatório no equipamento para o qual se deseja determinar a frequência de manutenções preventivas;
- 2) verificação da existência de tendência de crescimento ou de diminuição do número de eventos ao longo do tempo, por meio de gráficos da função de média acumulada dos eventos (Meeker e Escobar, 1998);
- 3) estimativa dos parâmetros pelo processo de Lei de Potências;
- 4) cálculo do custo médio da ação de manutenção, para cada tipo de evento aleatório;
- 5) estimativa do tempo ótimo entre manutenções preventivas, utilizando a equação de custo de MP do modelo.

Foram estudadas 468 chaves seccionadoras. Neste período ocorreram 109 eventos sendo 73, manutenções preventivas. Assumindo-se que a MP é perfeita para as causas de eventos consideradas, o equipamento que passa por uma MP antes do final do estudo deve ser contado como um novo equipamento. Por exemplo, um equipamento que falhou no tempo 3 meses, passou por uma MP no tempo 12 meses e foi truncado por tempo no final do período de observação (31,40 meses), foi computado da seguinte forma:

- Equipamento 1 falhou no tempo 3 meses e foi truncado no tempo 12 meses;
- Equipamento 2 foi truncado no tempo 19,40 (31,40 - 12) meses.

Como nenhum equipamento passou por mais de uma MP, na prática foram considerados 541 = 468 + 73 equipamentos distintos. Destes equipamentos, 325 deles foram truncados no tempo sem nenhuma ocorrência. Após cada falha ou defeito constatado nas inspeções periódicas, o equipamento passa por um reparo mínimo que deixa o equipamento, em termos de confiabilidade, na situação em que se encontrava imediatamente antes do evento. O conjunto de dados foi separado em dois subconjuntos considerando-se as causas que originaram os eventos. Os dois subconjuntos foram formados da seguinte forma:

- G1 - Subconjunto de dados com todas as chaves seccionadoras, todas as MP e os eventos relacionados a causas detectáveis por inspeção visual, análise de óleo ou termovisão (MP baseada na condição). Para este grupo de eventos, espera-se um custo médio de reparo mais baixo, uma vez que as anormalidades detectadas podem ser reparadas antes de evoluírem para a falha. Muitos destes reparos podem ser realizados com o equipamento em operação.
- G2 - Subconjunto de dados com todas as chaves seccionadoras, todas as MP e os eventos relacionados a causas detectáveis somente através de uma MP. Neste caso, a única alternativa à MP é o equipamento deteriorar até falhar. O custo médio de reparo relacionado a este tipo de evento geralmente é mais elevado

do que o anterior.

O resumo descritivo dos dados é apresentado na Tabela 1.

TABELA 1: Eventos de Interesse por Conjunto de Dados

Conjunto de Dados	Número de Eventos	Número Médio de Eventos por Chave
G1	90	0,192
G2	19	0,406
Total	109	0,233

A prática de manutenção preventiva periódica só se justifica quando a função de intensidade é crescente. Avaliação da tendência da função de intensidade pode ser feita através do gráfico da Função de Média Acumulada (FMA) (Meeker e Escobar, 1998).

As Figuras 1, 2 e 3 apresentam as FMA para o banco completo, o banco com os eventos de G1 e o banco com os eventos de G2, respectivamente.

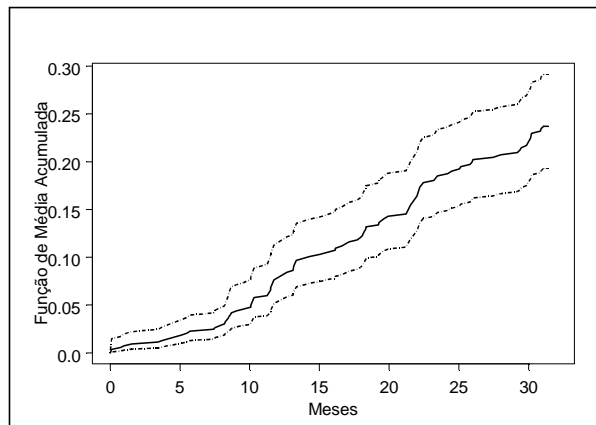


FIGURA 1: FMA – Banco Completo

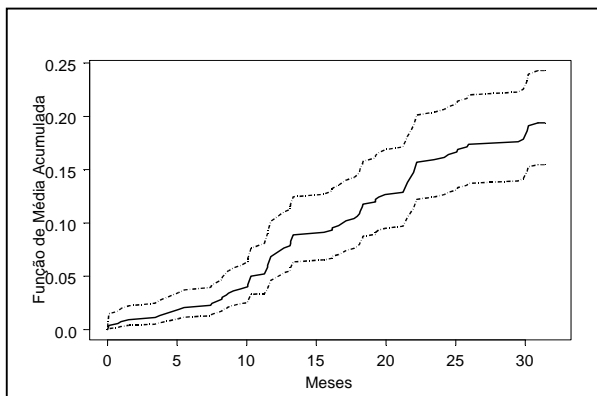


FIGURA 2: FMA – G1

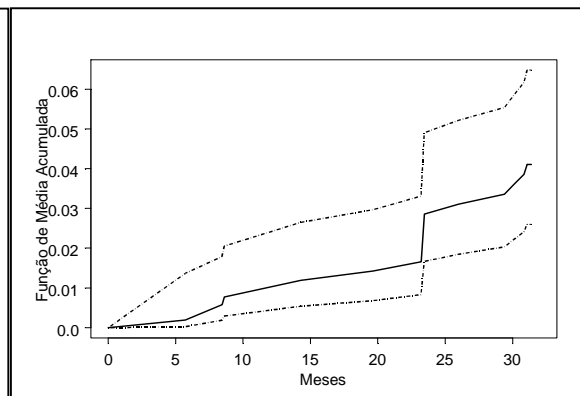


FIGURA 3: FMA – G2

Percebe-se na Figura 1 uma tendência de crescimento da intensidade de recorrências, o que justifica a adoção de uma política de MP. A Figura 2 mostra que o grupo G1 apresenta uma intensidade discretamente crescente enquanto a Figura 3 mostra uma forte tendência de crescimento da intensidade do grupo G2.

Para o conjunto de dados completos, a estimativa para β é 1,2 com IC (95%; β) = (1,02 ; 1,47). Estes valores confirmam a tendência de crescimento da intensidade de recorrência, o que pode justificar a adoção de uma política de manutenção com MPs periódicas. As estimativas dos parâmetros para os grupos G1 e G2 estão apresentadas na Tabela 2.

A Tabela 3, adiante, apresenta os custos médios da ação de manutenção para cada tipo de causa de eventos:

Utilizando-se as estimativas apresentadas na Tabela 2 e os custos apresentados na Tabela 3 obtém-se a estimativa de t_{OT} igual 123 meses, com IC (95%; t_{OT}) = (4 ; 243) meses.

TABELA 2: Estimativas dos Parâmetros

Parâmetros	G1	G2
	α	131,297
β	1,143	2,063
IC (95%; β)	[0,916 ; 1,370]	[1,183 ; 2,944]

TABELA 3: Custos de Manutenção

Manutenção	Valor (Reais)
G1	1000
G2	1500
MP (C_{MP})	1300

Observa-se neste caso, que o valor da estimativa pontual de t_{OT} é bem maior que o intervalo de tempo sob observação (31,40 meses). A escolha do processo de lei de potência para a modelagem dos dados foi baseada na comparação da função da média acumulada empírica com as curvas das intensidades acumuladas. Esta verificação gráfica foi realizada no período de 31,40 meses. Desta forma, a conclusão imediata que se pode tirar deste resultado é que o tempo entre MP tende a ser bem maior que o tempo observado. À medida que mais informações forem sendo incorporadas ao conjunto de dados, novas análises deverão ser feitas para avaliar esta estimativa.

A grande amplitude do intervalo de confiança de t_{OT} reflete a incerteza deste resultado, devido ao pequeno período de acompanhamento e às características dos custos de manutenção das chaves seccionadoras. Estes custos de MP são muito próximos dos custos dos reparos. Isto não é comum quando se trata de outros equipamentos dos sistemas elétricos de potência, tais como os transformadores, reatores e capacitores. Estes equipamentos, além de possuírem custos de reparos significativamente maiores do que os custos de manutenção preventiva, são penalizados com grandes perdas de receitas devido aos tempos de indisponibilidade para reparos. Um estudo de um conjunto de dados relativos aos equipamentos do sistema de transmissão de energia elétrica que são sujeitos a perdas significativas de receitas devido a indisponibilidades não deve negligenciar este acréscimo no custo. Na aplicação efetiva do modelo, para a determinação do tempo ótimo entre manutenções preventivas das chaves seccionadoras do sistema de transmissão da empresa, será incorporado ao custo de manutenção o valor da PVI referente às chaves seccionadoras que indisponibilizam funções de transmissão.

A Tabela 4 apresenta os valores do tempo ótimo para este mesmo conjunto de dados, considerando-se diversos valores para C_{MP} e reparos dos eventos de G1 e G2. Observa-se que a periodicidade de MP diminui à medida que os custos de G1 e G2 crescem em relação ao de MP. Além disto, as amplitudes dos intervalos de confiança decrescem com o aumento dos custos de G1 e G2.

Tabela 4: Outros valores de custos

Custos			Estimativas	
G1	G2	G_{MP}	t_{ot}	I.C.
1	1,5	1	123	(4 ; 243)
5	3	1	67	(20 ; 114)
3	5	1	58	(20 ; 97)
30	15	1	23	(8 ; 40)
15	30	1	22	(14 ; 31)
30	0	1	36	(0 ; 90)
0	30	1	26	(16 ; 38)

6.0 - CONCLUSÕES

A maior parte da literatura sobre Confiabilidade trata de sistemas não-reparáveis, embora a maioria dos sistemas existentes no "mundo real" seja reparável. Asher e Feingold (1984) dizem que "a confiabilidade de sistemas reparáveis tem sido um 'filho adotivo' largamente ignorado no campo da confiabilidade". Existe farto material sobre confiabilidade de produtos, na perspectiva dos fabricantes, mas pouca coisa sobre confiabilidade de itens em operação, na perspectiva da manutenção. Kececioglu (1995) apresenta vários modelos para estimar os tempos entre inspeções e o tempo ótimo para substituição de equipamentos danificados. Mas estes modelos

apresentam alguns inconvenientes, tais como: fundamentam-se na hipótese exponencial e no pressuposto da “curva da banheira” (sem verificar se existe ou não tendência de crescimento da intensidade de falhas ao longo do tempo de vida dos equipamentos) e não utilizam processos de contagem de falhas.

A proposta de estimativa do tempo ótimo entre MP apresentada levou em consideração, além dos aspectos citados acima, a diferença existente entre os custos de manutenção relacionados às causas que originaram o evento. Algumas causas estudadas podiam ser detectadas por meio de inspeções realizadas com o equipamento ligado (G1) e reparadas antes da falha do equipamento. As outras causas tratadas neste estudo (G2) só podiam ser descobertas e reparadas, antes de evoluírem para falha, por intermédio de MP periódica realizada com o equipamento desligado. A MP periódica, relacionada ao G2, é, via de regra, mais onerosa do que as tarefas de manutenção baseadas na condição relativas ao G1.

O modelo é aplicável a qualquer tipo de equipamento industrial reparável que apresente tendência de crescimento da intensidade de falhas ao longo do tempo. Os melhores resultados deverão ser obtidos nos casos de equipamentos cujas indisponibilidades estejam associadas tanto aos custos de reparo, quanto a perdas de produção ou de receitas.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASCHER, H., FEINGOLD, H. (1984). *Repairable Systems Reliability: Modelling, Inference, Misconception and their Causes*. Marcel Dekker, New York.

CORDEIRO, G. M. (1992). *A Teoria da Verossimilhança*. Associação Brasileira de Estatística, Rio de Janeiro, 100 SINAPE.

CROW, L. R. (1974). *Reliability Analysis for Complex Systems*. Reliability and Biometry, F. Proschan and J. Serfling (Eds), 379-410.

FREITAS, M. A., COLOSIMO, E. A. (1997). *Confiabilidade: Análise de Tempo de Falha e Testes de Vida Acelerados*. Fundação Christiano Ottoni, 12, Belo Horizonte.

GILARDONI, G., COLOSIMO, E. A. (2007) – *Optimal Maintenance Time for Repairable Systems*. *Journ. of Quality and Technology* (a parecer).

GUT, A. (1995). *An Intermediate Course in Probability*. Springer-Verlag, New York.

KECECIOGLU, D. (1995). *Maintainability, Availability and Operational Readness Engineering*. Prentice Hall. New Jersey.

MEEKER, W. Q., ESCOBAR, L. A. (1998). *Statistical Methods for Reliability Data*. John Wiley & Sons, New York.

RIGDON, S. E., BASU, A. P. (2000). *Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems*. John Wiley & Sons, New York.