



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

Versão 1.0
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO - VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

APLICAÇÃO COMBINADA DE MODELOS DE RISCO DE FALHA DE SISTEMAS REPARÁVEIS E NÃO REPARÁVEIS PARA CÁLCULO DA CONFIABILIDADE DE EQUIPAMENTOS

Ricardo Cunha da Fonte *
Luis Adriano M. C. Domingues
Carlos Kleber C. Arruda

CEPEL

Hélio P. Amorim Jr.
Pablo A. Lisboa

Lídio Francisco A. Nascimento
Sérgio Luis Zaghetto

ELETRONORTE

RESUMO

A busca por maior disponibilidade das instalações de um sistema de potência requer a utilização de métodos estatísticos de gestão da manutenção que avaliem, a cada instante, a confiabilidade não só de cada equipamento como também de toda a instalação. Este informe técnico apresenta uma ferramenta para avaliação da confiabilidade de um equipamento, ou família de equipamentos, reparáveis ou não-reparáveis, em uma subestação, com base em Processos de Poisson Homogêneo e Não-Homogêneos, para itens reparáveis, e na Lei de Weibull, para itens não-reparáveis. Tal ferramenta, desenvolvida considerando-se as especificidades dos equipamentos utilizados em uma subestação, foi aplicada a dados reais de falhas e/ou reparos, confirmando sua eficácia, usabilidade e importância no auxílio à gestão de ativos.

PALAVRAS-CHAVE

Subestação, Confiabilidade, Manutenção, Falha, Software

1.0 - INTRODUÇÃO

1.1 Visão Geral e Objetivo

A moderna gestão da manutenção de sistemas elétricos exige, para a correta tomada de decisão, a utilização de métodos estatísticos de avaliação da confiabilidade, e conseqüentemente da disponibilidade, de cada equipamento que compõe o sistema, de conjuntos funcionais específicos (transmissão, geração etc.) ou mesmo da instalação como um todo.

Como a grande maioria dos trabalhos publicados na literatura internacional, na área de energia elétrica, faz uso de valores típicos de taxas de falhas e/ou reparos, verifica-se a necessidade de uma ferramenta que permita a obtenção de parâmetros de confiabilidade que melhor descrevam um equipamento ou instalação em particular, de modo a levar em conta as condições locais e operacionais dos sistemas.

Segundo conceitos da Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM), qualquer equipamento de uma subestação pode ser subdividido em subsistemas e estes em componentes, de modo a facilitar a identificação dos modos de falha, com vistas à análise qualitativa da confiabilidade. Quando o objetivo é a análise quantitativa da confiabilidade de um equipamento, deve-se separar os sistemas, subsistemas e componentes que sejam reparáveis, vale dizer, aqueles que, tendo falhado, podem ser repostos em uma condição de operação satisfatória

por qualquer ação corretiva, dos não-reparáveis, ou seja, aqueles em que os itens individuais que falham são removidos permanentemente da instalação ou totalmente substituídos.

A utilização indiscriminada da Lei de Weibull para modelar estatisticamente a confiabilidade de qualquer sistema sujeito a falhas, sem levar em consideração as duas categorias mencionadas, pode conduzir a resultados bastante imprecisos e, conseqüentemente, pouco úteis ao processo decisório dos gestores da manutenção.

O objetivo deste trabalho é a apresentação de uma ferramenta para avaliação da confiabilidade de um equipamento, ou família de equipamentos, de uma subestação com base em Processos de Poisson Homogêneo e Não-Homogêneos, e na Lei de Weibull, sendo os primeiros aplicáveis a itens reparáveis e o segundo a itens não-reparáveis.

São obtidos parâmetros caracterizadores do modelo estatístico mais adequado à categoria do item sob análise, seja ele reparável ou não, além de outras métricas úteis à análise da confiabilidade de um equipamento. O modelo obtido a partir dos parâmetros fornecidos pelo programa será posteriormente aplicado na avaliação da confiabilidade global e do índice de robustez da subestação. Permite, ainda, mensurar o crescimento da confiabilidade após a implementação de ações de melhoria nos processos e rotinas da manutenção.

Tem-se, como vantagem, o fato de tal ferramenta estar sendo desenvolvida levando-se em consideração as especificidades dos equipamentos utilizados em uma subestação, que podem incluir tanto itens reparáveis quanto não-reparáveis.

A aplicação da ferramenta a dados reais de falhas e/ou reparos obtidos junto à Subestação de Coxipó, do Sistema Eletronorte, confirmam sua eficácia, usabilidade e importância no auxílio não apenas à gestão da manutenção em particular, como também à gestão de ativos da concessionária, em uma abordagem mais geral.

1.2 Sistemas Reparáveis e Não-reparáveis

Em uma subestação, a maioria dos equipamentos pode ser submetida a atividades de manutenção, preditiva, preventiva e/ou corretiva, nas quais componentes defeituosos podem eventualmente ser substituídos. Por outro lado, há equipamentos que, por sua própria natureza, são integralmente substituídos quando apresentam falhas. Daí surgem os conceitos de *sistemas reparáveis* e *sistemas não-reparáveis*.

Um *sistema reparável* é aquele que, tendo falhado, pode ser repostado em uma condição de operação satisfatória por qualquer ação corretiva, incluindo substituições de componentes ou subsistemas, ou alterações em seus ajustes. Ao ser reparado, o sistema pode retornar ao mesmo estado em que se encontrava antes da falha (reparo mínimo), ficar ainda pior ou mesmo tão bom quanto novo (manutenção perfeita). A freqüência dos reparos pode ser crescente, decrescente, ou permanecer em uma taxa aproximadamente constante.

Já um *sistema não-reparável* é aquele que, ao falhar, é removido permanentemente da população (frota). Embora a população, vista como um conjunto de sistemas, possa ser “reparada” substituindo-se as unidades falhadas por outras similares ou mesmo diferentes, os membros da população original vão minguando ao longo do tempo até que todos eventualmente falhem.

1.3 Análise Qualitativa da Confiabilidade: RCM

Antes de se proceder a uma análise *quantitativa* da confiabilidade, faz-se necessário empreender uma análise *qualitativa* da confiabilidade, de modo a permitir: (I) a definição, tão precisa quanto possível, do que é uma falha e/ou defeito para um dado sistema; (II) a identificação dos mecanismos e processos físicos e/ou químicos que contribuem para a falha/defeito; (III) a sucessiva subdivisão analítica dos sistemas em partes cada vez menos complexas, quando e se aplicável, visando facilitar as duas etapas anteriormente descritas; e (IV) a identificação dos impactos que as falhas causam sobre a instalação, em seus aspectos operacionais, não-operacionais, de segurança pessoal, patrimonial e ambiental.

Pelo fato de abordar adequadamente essas questões, o processo RCM (*Reliability-Centred Maintenance*), atualmente bastante utilizado como ferramenta para gerenciamento de manutenção, foi utilizado neste projeto. Tal técnica define a *falha funcional* como a incapacidade de qualquer ativo em cumprir uma função para um padrão de desempenho aceitável pelo usuário. A RCM também define o *modo de falha* como qualquer evento que causa uma falha funcional. A identificação dos modos de falha, bem como das conseqüências da falha, para cada falha funcional é realizada de forma sistemática por meio da *análise de efeitos e modos de falha* (FMEA). A subdivisão dos sistemas em subsistemas, e destes em componentes, é pré-requisito lógico posto pela RCM para a consecução da FMEA.

Justifica-se tal abordagem pelo fato de: (I) ser importante discriminar que sistemas (ou subsistemas ou componentes) são reparáveis (Poisson) ou não-reparáveis (Weibull); (II) a formulação de Weibull, utilizada na modelagem da confiabilidade de sistemas não-reparáveis, pressupor que a análise seja feita para cada modo de

falha, sob pena de introdução de distorções e conseqüentes prejuízos no resultado; (III) ser necessário subdividir o sistema em subsistemas e componentes visando à construção de seu diagrama de blocos de confiabilidade (RDB), de modo a permitir que a confiabilidade do sistema possa ser avaliada em função (ou a partir) da confiabilidade de cada um daqueles sub-sistemas e/ou componentes.

2.0 - BASE TEÓRICA – MODELOS

2.1 Sistemas Não-reparáveis – O Modelo de Weibull

Um modelo matemático bastante difundido para descrever o comportamento estatístico da confiabilidade de um sistema não-reparável é a distribuição de Weibull, sendo particularmente adequado nos casos em que o histórico de falhas envolve um número de ocorrências bem pequeno (1), situação comum no Setor Elétrico. As equações abaixo resumem a distribuição de Weibull a dois parâmetros e representam respectivamente: a função densidade de probabilidade (*PDF*), função distribuição acumulativa (*CDF*), confiabilidade (*R*) e tempo médio para falha (*MTTF*).

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad MTTF = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

Os dois parâmetros básicos são: o parâmetro de forma (β), que indica o formato da curva e o parâmetro de escala ou vida característica (η), que representa o fator de escala da curva. Tais parâmetros podem ser estimados, a partir de históricos de dados de falhas, por meio de métodos gráficos combinados com regressão linear, ou por estimadores de máxima verossimilhança.

No modelo de Weibull, a taxa de falhas (instantânea) de um sistema não-reparável é dada por:

$$h(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$$

2.2 Sistemas Reparáveis – O Processo de Poisson

Seja $N(t)$ seja uma função de contagem que descreva o número acumulado de falhas que um dado sistema apresente no período que vai do instante zero ao instante T . $N(t)$ é uma função discreta que “salta” em uma unidade toda vez que uma falha ocorre e permanece no respectivo nível até a falha seguinte. Se observarmos as curvas de $N(t)$ para um grande número sistemas similares e “calcularmos a média” destas curvas, teremos uma estimativa de $M(t)$, o número esperado (número médio) de falhas acumuladas até o instante t para estes sistemas. A derivada de $M(t)$, denominada de $m(t)$, é definida como Taxa de Reparo ou Taxa de Ocorrência de Falhas no Tempo t ou ROCOF (do inglês rate of occurrence of failures at time t), ou ainda Função Intensidade.

O modelo útil mais simples para $M(t)$ é $M(t)=\lambda t$ e a taxa de reparo (ou ROCOF) é a constante $m(t)=\lambda$. Este modelo ocorre quando os tempos entre falhas são independentes e identicamente distribuídos de acordo com a distribuição exponencial, com parâmetro λ . Tal modelo básico é também conhecido como um Processo de Poisson Homogêneo (PPH) e, apesar de simples, é bastante utilizado na indústria. A justificativa para isto vem, em parte, da forma da curva (empírica) da banheira. A maioria dos sistemas (ou equipamentos complexos) passa a maior parte de sua “vida” operando na parte linear da curva da banheira, onde a taxa de reparo permanece constante. O PPH é o único modelo que se aplica a essa parcela da curva, tornando-o o bastante popular para a avaliação da confiabilidade de sistemas reparáveis.

Um modelo mais flexível e adequado a muitas aplicações é o Processo de Poisson Não-Homogêneo (PPNH), que tem função intensidade dependente do tempo (2). Como antes descrito, o modelo de PPH tem taxa de reparo constante $m(t)=\lambda$. Se nós substituirmos λ por uma função arbitrária do tempo, teremos um PPNH com função de intensidade $\lambda(t)$.

Dentre as formas paramétricas da função intensidade, a mais utilizada é a Lei de Potência, adequada a uma política de manutenção em que prevaleça o reparo mínimo. Para o número esperado de falhas nas primeiras t horas, $M(t)$, tem-se:

$$M(t) = \alpha t^\beta, \text{ para } \alpha, \beta > 0$$

A função intensidade ou taxa de reparo (ROCOF) para este modelo é:

$$\frac{d}{dt}M(t) = m(t) = \lambda(t) = \alpha\beta t^{\beta-1}, \text{ para } \alpha, \beta > 0$$

Uma forma interessante da função intensidade, substituindo-se α por $1/\theta^\beta$, é:

$$\lambda(t) = \left(\frac{\beta}{\theta}\right)\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1}$$

Note-se a semelhança entre essa expressão e aquela da taxa de falhas de um sistema não-reparável.

É possível, assim, modelar tanto taxas de reparos crescentes ($\beta > 1$) quanto decrescentes ($0 < \beta < 1$). Quando $\beta = 1$, o modelo se reduz ao PPH com taxa de reparo constante.

A probabilidade de que um sistema experimente n falhas em t unidades de tempo, para o modelo de PPNH, tem a seguinte expressão:

$$P\{N(t) = n\} = \frac{\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta}}{n!}, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Outros nomes para o modelo da Lei de Potência são: modelo de Duane e modelo de AMSAA (Army Materials System Analysis Activity).

O tempo até a primeira falha para um processo que segue a Lei de Potência apresenta uma distribuição de Weibull. Por esta razão, o modelo de Lei de Potência é chamado, às vezes, de um processo de Weibull, o que conduz a certa confusão entre um modelo de distribuição de probabilidade aplicável à vida de uma população não-reparável com um modelo para os tempos entre falhas de uma população reparável.

Para estimar os dois parâmetros do modelo pode-se utilizar estimadores de máxima verossimilhança, o que conduz às seguintes expressões (3):

$$\hat{\theta} = \left[\frac{\sum_{i=1}^k (T_i^{\hat{\beta}} - S_i^{\hat{\beta}})}{\sum_{i=1}^k n_i} \right]^{\frac{1}{\hat{\beta}}}$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{\hat{\theta}^{-\hat{\beta}} \sum_{i=1}^k (T_i^{\hat{\beta}} \ln T_i - S_i^{\hat{\beta}} \ln S_i) - \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} \ln t_{ij}}$$

onde temos k sistemas, S e T são os tempos de início e fim das observações, n_i é o número total de falhas do sistema i e t_{ij} é a idade do sistema i quando da ocorrência de sua j -ésima falha. Essas equações não podem ser resolvidas analiticamente, requerendo um processo iterativo ou software especial para sua solução.

2.3 Distinção Necessária Entre Taxa de Falhas e Taxa de Reparos

Em um sistema não-reparável, a vida útil é uma variável aleatória, descrita como o tempo transcorrido até a primeira e única falha necessária e suficiente para retirar o sistema da população (ou frota). Para um grupo de

sistemas, as vidas úteis são assumidas como sendo *independentes e identicamente distribuídas*, ou seja, provenientes de uma mesma população, sob o ponto de vista estatístico. A *taxa de falhas* é a *probabilidade condicional* de que um sistema falhe em um pequeno intervalo de tempo, dado que sobreviveu desde o tempo zero até o início do intervalo. É, portanto, uma *taxa relativa (condicionada) de falhas* de um sistema que sobreviveu até o instante considerado.

Para um sistema reparável, a vida útil é a sua idade e corresponde ao total de horas em operação. As variáveis aleatórias de interesse são os tempos entre falhas e o número de falhas em uma época em particular. Nesse caso, a "taxa de falhas" é a taxa de ocorrência de falhas, sendo uma propriedade de uma sequência de tempos de falhas. Os tempos entre falhas *não são independentes e identicamente distribuídos*. A taxa de ocorrência de falhas (ROCOF) é a probabilidade de que uma falha (não necessariamente a primeira) ocorra em um pequeno intervalo de tempo. É, portanto, uma *taxa absoluta de ocorrência de falhas*.

Tanto a taxa de falhas (função de risco) quanto a taxa de reparos (função intensidade) podem apresentar, conforme seus parâmetros caracterizadores, formatos que seguem, em parte, a curva da banheira, embora as interpretações dadas a cada parte da curva para uma e outra função sejam distintas (Figura 1 (a) e (b)).

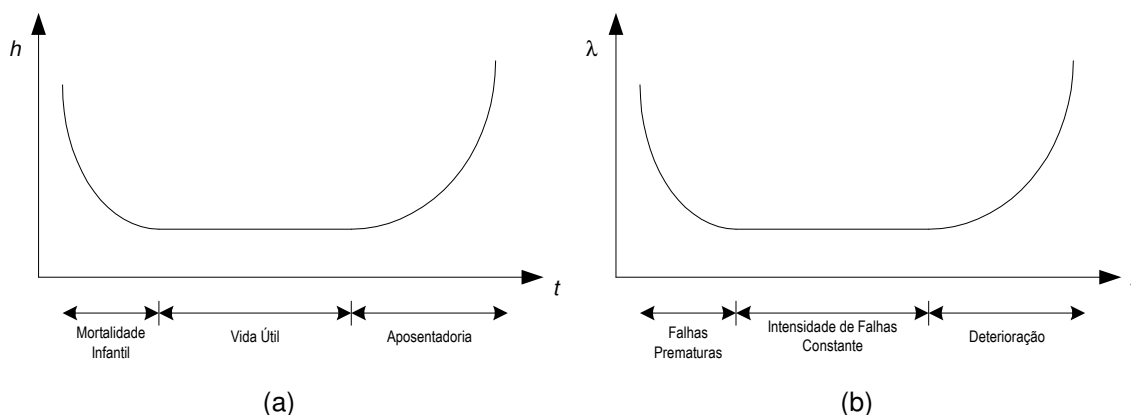


FIGURA 1 – Curvas da Banheira para a taxa de falhas e taxa de reparos.

2.4 Tempo Médio para a Falha (MTTF) e Tempo Médio entre Falhas (MTBF)

Dois conceitos freqüentemente confundidos e utilizados de maneira equivocada são o *Tempo Médio para a Falha* (MTTF) e o *Tempo Médio entre Falhas* (MTBF). O MTTF, também conhecido como *vida média*, é largamente utilizado como uma medida de confiabilidade e desempenho de um produto, sendo normalmente calculado dividindo-se o tempo total de operação de um conjunto de unidades observadas pelo número total de falhas encontradas. Sua aplicação, entretanto, restringe-se ao caso de sistemas não-reparáveis e na assunção de que a distribuição probabilística de falhas segue a lei exponencial, ou seja, a taxa de falhas instantânea é constante, independentemente da idade do sistema.

O MTBF também é muito utilizado como critério para avaliação da confiabilidade de sistemas, sendo aplicável somente a sistemas reparáveis. Para um sistema (ou conjunto de sistemas), o MTBF é o tempo médio decorrido entre falhas consecutivas do sistema. Esta média exclui o tempo de espera para início do reparo, o tempo gasto no próprio reparo, o tempo necessário para recolocação em serviço, etc. Pretende-se medir, portanto, somente o tempo no qual um sistema está disponível e operante. O MTBF pode ser definido também como o recíproco da função intensidade, sendo constante para Processo de Poisson Homogêneo e variável no tempo para Processo de Poisson Não-Homogêneo.

O MTTF é algumas vezes denominado *mean time before failure*, que também tem a sigla MTBF, o que contribui para a confusão entre os dois conceitos.

3.0 - IMPLEMENTAÇÃO – SOFTWARE DE ANÁLISE

3.1 Programa ConWeib

O programa desenvolvido pelo Cepel, denominado CONWEIB, permite a estimativa dos parâmetros das principais distribuições estatísticas relacionadas tanto a sistemas reparáveis (PPH, PPNH-Lei de Potência) quanto a sistemas não-reparáveis (Weibull, Log-normal, Normal), utilizando-se de dados em forma de lista de ocorrências ou de intervalos e das definições de cálculo. O programa também traça os gráficos correspondentes às

distribuições sob análise. Os parâmetros obtidos são então utilizados como entradas para o programa ANSE VISUAL, também em desenvolvimento pelo Cepel, que fornece o Índice de Robustez ou confiabilidade global da subestação (Figura 2).

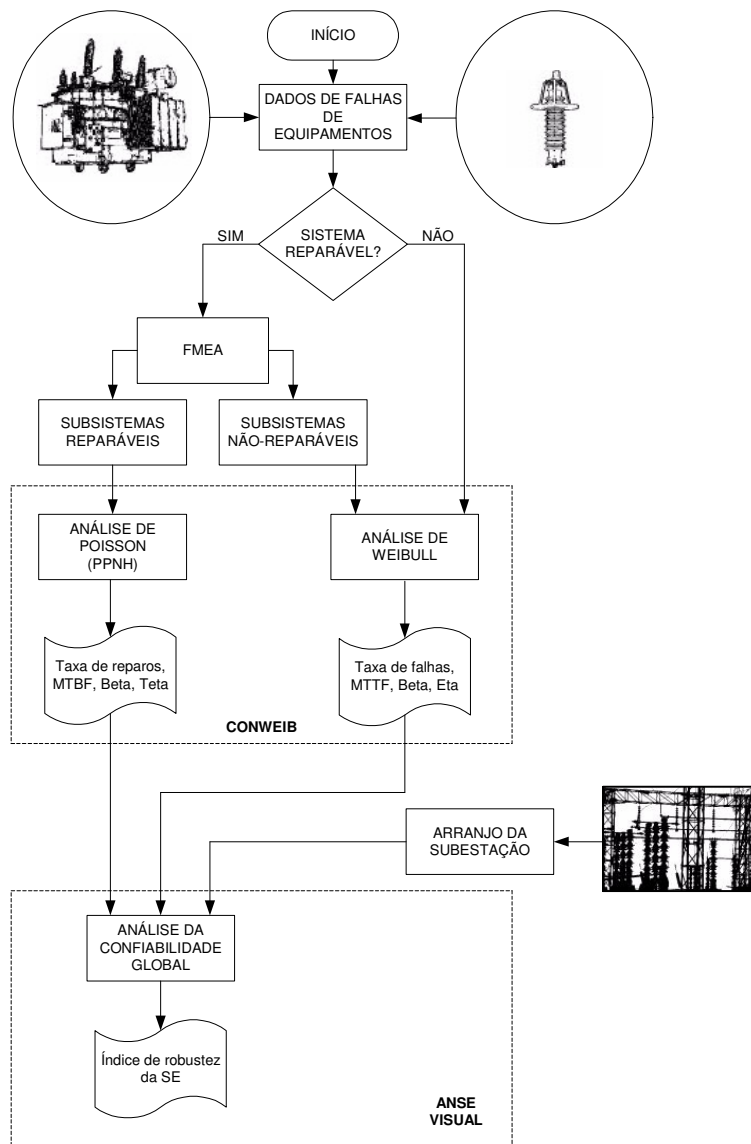


FIGURA 2 – Fluxograma de análise de dados de falhas de subestações.

4.0 - VALIDAÇÃO

4.1 Casos de teste

A metodologia foi aplicada a dados reais de falhas de vários equipamentos instalados na Subestação de Coxipó, do Sistema Eletronorte, com bons resultados. Para efeito deste IT, destacamos um conjunto de 44 seccionadoras de 138 kV cujo histórico de ocorrências abrange 25 anos de operação. O grupo escolhido é formado por seccionadoras de um só fabricante e que possuem as mesmas características construtivas (modelo, tipo construtivo, sistema de acionamento, valores nominais, etc.). Nem todas entraram em operação ao mesmo tempo, acompanhando as etapas de ampliação da subestação. Havia registros de 22 falhas, como pode ser verificado no diagrama de falhas por sistema no tempo – “time dot plot” (Figura 3).

Numa primeira abordagem, o conjunto de seccionadoras foi tratado, sob o ponto de vista da confiabilidade, como sendo uma população não-reparável, no sentido de que cada falha ocorrida era reparada de tal forma que o componente ou subsistema, correspondente ao respectivo modo de falha, fosse totalmente substituído ou renovado, com o que se agregava um novo equipamento ao grupo. O modelo de Weibull, portanto, foi aplicado

neste caso, primeiramente considerando todas as falhas agrupadas e, em seguida, separando-se as falhas por seus respectivos modos de falha.

Na sequência, o grupo foi analisado como sendo formado por um conjunto de sistemas reparáveis, cujo comportamento, em termos de confiabilidade, foi assumido como um Processo de Poisson Não-Homogêneo - Lei de Potência (PPNH Power Law), enfoque mais aderente à realidade de uma política de manutenção sob reparo mínimo. Os resultados estão resumidos na Tabela 1.

4.2 Resultados

Analisando-se os resultados, é possível verificar uma grande discrepância entre os parâmetros obtidos com abordagem por Weibull e os parâmetros resultantes da abordagem por PPNH. Embora tenham sido indicadas as taxas de falhas para os dois modos de falha predominantes, já que o modelo de Weibull requer, a rigor, que se analise cada modo de falha separadamente, a base de comparação deve ser a taxa de falhas para a combinação de modos de falha, dado que engloba todas as ocorrências, o que sempre é considerado no modelo PPNH.

O valor da taxa de reparos, que é a medida da probabilidade instantânea de ocorrência de uma falha no conjunto de sistemas reparáveis em questão, é bem menor que o valor da taxa de falhas (quase um terço), que também é uma medida da probabilidade instantânea de ocorrência de uma falha no mesmo conjunto de equipamentos, quando assumidos como não-reparáveis.

O modelo PPNH - Lei de Potência pode ser visto como uma extensão da distribuição de Weibull, fazendo-se a ressalva de que esta governa a primeira falha, e aquele governa cada uma das falhas subsequentes, sob condição de reparo mínimo. Assim, se cada uma das falhas que sucedem a primeira for considerada no modelo de Weibull, todas serão tratadas, equivocadamente, como primeiras (e únicas) falhas da frota, fazendo com que a taxa de falhas aumente muito, trazendo uma falsa informação do estado da confiabilidade do conjunto. Isto pode ser confirmado pelo gráfico da Figura 4, na qual se percebe que a taxa de falhas e a taxa de reparos se aproximam bastante em uma idade do conjunto na qual havia predominância de primeiras falhas, e se afastam mais quando se passa a ter recorrências de falhas no grupo.

Tabela 1 – Resultados obtidos

Modo de falha	Weibull				PPNH			
	β	η	Taxa de falhas	MTTF	β	θ	Taxa de reparos	MTBF
Combinação dos modos de falha	4,89799	7976,41	0,000966	7314,96	3,3119	9231,99	0,000335	2985,07
Ponto quente em contato / terminal	4,37602	8902,07	0,000502	8110,64				
Defeito no sistema de acionamento	5,18048	9614,29	0,000401	8845,61				

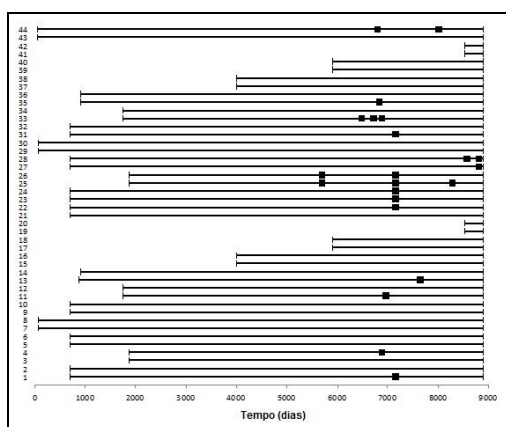


FIGURA 3 – Time dot plot

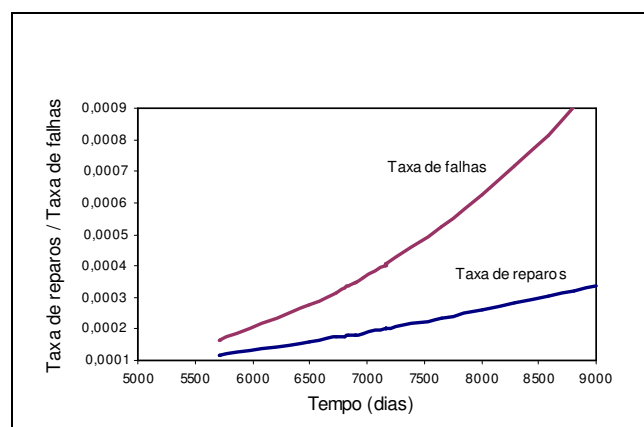


FIGURA 4 – Taxa de falhas e taxa de reparos

5.0 - CONCLUSÃO

A aplicação do software de análise de confiabilidade CONWEIB, desenvolvido no Cepel, a dados reais de falhas observados em um conjunto significativo de seccionadoras da SE de Coxipó, Eletronorte, mostrou a utilidade da ferramenta no auxílio não apenas à gestão da manutenção, como também dos ativos da concessionária.

A assunção da distribuição de Weibull na análise da confiabilidade de equipamentos reparáveis, comum na prática, dada a difusão daquele modelo, pode conduzir a resultados bastante díspares e muito mais severos que os obtidos com o modelo PPNH, mais aderente à realidade das instalações de um sistema de potência.

O modelo de Weibull, contudo, pode e deve ser aplicado ao estudo da confiabilidade daqueles itens da instalação que, por sua natureza ou pela política de manutenção adotada pela concessionária, sejam considerados como não-reparáveis, ou seja, são retirados definitivamente de operação após a primeira (e única) falha verificada.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ABERNETHY, R. B. The New Weibull Handbook, 4th ed., 2000.
- (2) RIGDON, S. E., BASU, A. P., "Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems", John Wiley & Sons, New York, 2000;
- (3) MISRA, K. B. "Handbook of Performability Engineering", Springer, 2008;
- (4) "Reliability Engineering and Weibull Analysis Resources", <http://www.weibull.com> .
- (5) RELIASOFT, Weibull++ 7 Life Data Analysis Reference, Reliasoft Publishing, 2005.
- (6) MARQUART, T. A. "Comparison of Methods for Interval Data Using Monte Carlo Simulations"
- (7) CAMARGO, C. C. B. Confiabilidade Aplicada a Sistemas de Potência Elétrica, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1981.
- (8) ARRUDA, C. K., et al. "Metodologia para cálculo do Índice de Robustez de Subestações – Projeto Piloto, Subestação Marabá (PA), XIX SNPTEE, Rio de Janeiro, outubro 2007.
- (9) DOMINGUES, L. A., et al. "Avaliação de Confiabilidade de Subestações", 4^o Simpósio Internacional de Confiabilidade, Salvador, BA, 2006.
- (10) AMORIM, H. P., et al. "Modelagem do Risco de Falha de Equipamentos Elétricos de Subestações", XIX SNPTEE, Rio de Janeiro, outubro 2007.
- (11) AMORIM, H. P., DOMINGUES, L. A., LISBOA, E. F. Avaliação da Confiabilidade de Subestações, Relatório Técnico DPP/TEQ – 1588.
- (12) DOMINGUES, L. A., et al. "Determinação do Índice de Robustez de Subestações", XX SNPTEE, Recife, novembro 2009.
- (13) An Internal Survey on Failures in Large Power Transformers in Service, Electra n^o 88, maio, 1983.
- (14) BILLINTON, R., BHAVARAJU, M. P., "Transmission Planning Using A Reliability Criterion - Part II - Transmission Planning", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 90, 1971, pp. 70-78;
- (15) BILLINTON, R., RINGLEE, R. J., WOOD, A. J. Power-System Reliability Calculations, MIT Press, 1973.
- (16) Power System Reliability Analysis Application Guide, CIGRÈ, 38.03, Paris, 1987
- (17) Comissão Mista GCOI/ ONS/ ELETROBRÁS/ CEPEL para Avaliação do Sistema Interligado S/SE/CO, Relatório Técnico 2 - Proposições para Redução do Nível de Risco das Subestações Críticas do Sistema Interligado, Rio de Janeiro, 1999.
- (18) BILLINTON, R., ALLAN, R. N., Reliability Evaluation of Engineering Systems, Plenum Press, New York, 1984.