



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

GSE 28
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS - GSE

MODELAGEM DE RISCO DE FALHA DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS DE SUBESTAÇÕES

Hélio P. Amorim Jr. *
Luis Adriano M. C. Domingues
Ricardo C. Fonte

Carlos K. C. Arruda
Pablo A. Lisboa

Lídio Francisco A. Nascimento
Sérgio Luis Zagheto

CEPEL

ELETRONORTE

RESUMO

O objetivo deste IT é apresentar uma metodologia para a modelagem de risco de falha de equipamentos elétricos de subestações, aplicando a técnica de Weibull. Um projeto piloto, que está em fase de execução, adotou a subestação (SE) de Coxipó (MT) como protótipo e os dados referentes a falhas e defeitos estão sendo levantados junto ao corpo técnico da Eletronorte. A classe de tensão da SE estudada é de 138/230 kV e a mesma possui mais de uma centena de equipamentos, entre eles transformadores de potência, de potencial e de corrente, disjuntores, chaves seccionadoras, pára-raios e barramentos. A análise envolve também a aplicação das técnicas de RCM (Reliability Centered Maintenance), tanto pela necessidade de se identificar com clareza os modos de falha, quanto pela conveniência de se analisar cada equipamento em termos de seus subsistemas e componentes.

PALAVRAS-CHAVE

Subestação, Confiabilidade, Risco de falha.

1.0 - INTRODUÇÃO

1.1 Importância da determinação do risco de falha de equipamentos

A grande maioria dos trabalhos sobre confiabilidade, publicados na área de energia elétrica, faz uso de valores de taxas de falhas pré-estabelecidos na literatura internacional, sem levar em conta as condições locais e operacionais dos sistemas. Esse fato coloca em questionamento o uso da avaliação de confiabilidade, visto que os resultados obtidos são geralmente acadêmicos e, portanto, com reduzida validade prática. Além disso, ao longo de sua vida útil, a maioria dos equipamentos modifica suas características de falha num processo ilustrado pela "curva da banheira", (figura 1). Este processo implica, em termos práticos, uma variação da taxa de falha ao longo do ciclo de vida do equipamento, o que torna crítica a determinação do período em que este está operando.

Na modelagem de risco de falhas em sistemas de elevada confiabilidade, como na aeronáutica, usinas nucleares, SE's, a principal distribuição probabilística usada no tratamento estatístico dos dados é a distribuição de Weibull. Essa, além de ser um caso geral de diversas outras distribuições, como, por exemplo, a exponencial, pode gerar modelos consistentes com um número reduzido de ocorrências na amostra (1).

A manutenção é, na prática, gerenciada em nível de modo de falha, entendido este como qualquer evento que causa uma falha funcional, sendo o elemento definidor tanto do trecho da curva da banheira a ser utilizado, quanto da escala de tempo adotada na análise quantitativa da confiabilidade. Além disso, a formulação de Weibull, utilizada na modelagem da confiabilidade do equipamento, pressupõe que a análise seja feita para cada modo de falha, sob pena de introdução de distorções e conseqüentes prejuízos no resultado.

É necessário também que o sistema seja, tanto quanto possível, dividido em subsistemas e estes em componentes, viabilizando a construção de seu diagrama de blocos de confiabilidade (RDB), de modo a permitir

que a confiabilidade do conjunto, ou equipamento, possa ser avaliada a partir da confiabilidade de cada um daqueles subsistemas e/ou componentes. Assim, para equipamentos novos ou que nunca apresentaram falhas, pode-se partir do histórico de falhas de subsistemas idênticos utilizados em equipamentos similares àquele sob estudo, metodologia denominada de Weibayes, de modo a se poder quantificar um valor inicial de confiabilidade.

O trabalho tem como objetivo demonstrar a aplicabilidade do método Weibull para o Setor Elétrico Brasileiro, a fim de incentivar tanto o levantamento de históricos operacionais de equipamentos, quanto a utilização desses dados para a análise da confiabilidade, tornando tal prática um hábito.

Espera-se com isso aproximar os resultados de análise de confiabilidade à realidade vivida pelo Setor, usando nessa análise valores de taxas de falha aderentes à realidade operacional. Será possível indicar prioridades na realização da manutenção ou mesmo um acompanhamento através de monitoramento específico, o que indiretamente reduzirá os custos operacionais da empresa.

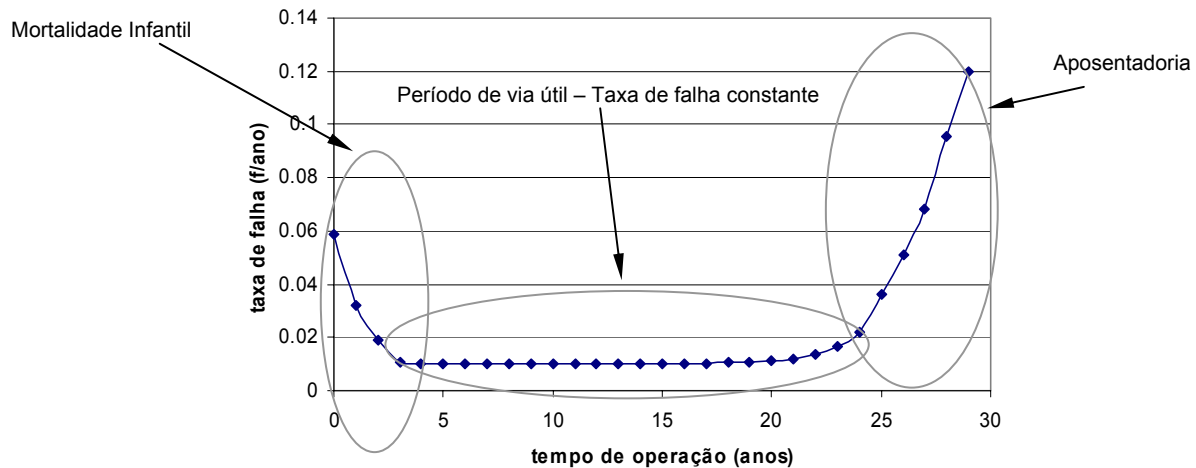


FIGURA 1 – Exemplo de curva de vida operacional de equipamento - “curva da banheira”

1.2 Medição do risco de falha

A análise de confiabilidade de um equipamento pode ser classificada de duas formas:

- Qualitativa, na qual se observa os modos de falha, e realiza-se a análise de falhas e efeitos. Este método é utilizado nas práticas de RCM.
- Quantitativa, que utiliza teorias da probabilidade e permite a ponderação de fatores, estimativa dos custos e comparação analítica de hipóteses. A precisão deste tipo de análise está fortemente ligada ao levantamento de ocorrências passadas.

1.3 Limitações da estatística convencional

A teoria convencional de estatística pressupõe uma avaliação sobre um número significativo de ocorrências, obtidas a partir de uma amostra válida. Quanto maior a amostra, mais precisa será a avaliação. Sendo um setor estratégico da economia, cujas falhas podem conduzir a cenários catastróficos, o Setor Elétrico já exhibe índices de confiabilidade que, embora possam ser melhorados, são tão elevados que o histórico disponível de falhas por tipo de equipamento é insuficiente para um tratamento estatístico convencional. Assim, faz-se necessária a obtenção de uma estimativa de risco a partir de uma amostra pequena de ocorrências, e que mostre resultados em curto prazo.

2.0 - ABORDAGEM DE RISCO DE FALHA PELO MÉTODO DE WEIBULL

2.1 Conceito

O método Weibull é utilizado para se analisar os riscos de falha, a partir do histórico operacional de uma dada amostra de equipamentos, usando a distribuição estatística criada por Wallodi Weibull. A análise fornece a probabilidade de falha ao longo do tempo para aquela amostra e identifica em que parte da curva da banheira os equipamentos estão operando.

A distribuição Weibull possui dois parâmetros básicos: o parâmetro de forma (β) e o parâmetro de escala ou vida característica (η). Pode ser adicionado um terceiro parâmetro chamado parâmetro de localização (γ), a fim de

tornar o resultado mais preciso. O primeiro parâmetro indica o formato da curva e permite classificar o tipo das falhas de uma amostra: $\beta < 1$ indica mortalidade infantil; $\beta = 1$ indica falhas aleatórias; e $\beta > 1$ indica falhas por desgaste. O segundo parâmetro representa o fator de escala da curva e o valor em que 63,2% da amostra terão falhado (figura 2). O parâmetro γ representa a origem, o momento até o qual não há possibilidade de ocorrerem falhas, criando um deslocamento da curva no tempo.

As equações abaixo resumem a distribuição de Weibull para dois parâmetros e representam respectivamente: a função densidade de probabilidade (PDF), função acumulativa distribuição (CDF), confiabilidade (R) e tempo médio para a falha (MTTF):

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

onde t representa o tempo da ocorrência.

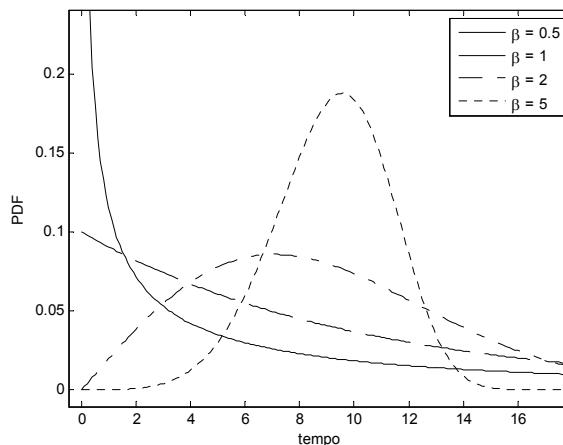


FIGURA 2 – Exemplo de PDF Weibull, para diversos valores de β .

A distribuição de Weibull permite estimar o risco de falhas de amostras que apresentem um reduzido histórico de ocorrências, aplicando-se perfeitamente ao caso do Setor Elétrico Brasileiro.

Outra característica é a sua generalidade de aplicação. Enquanto a distribuição exponencial é usada para amostras que se encontram apenas na fase de falhas aleatórias ($\beta = 1$), ou seja, a parte reta da curva da banheira, Weibull engloba todas as fases, podendo identificar em que momento da vida operacional se encontram os equipamentos analisados.

2.2 Uso de Percentis

Os percentis representam o momento em que uma parcela da amostra vai falhar. Escolhe-se um percentil qualquer, como 10% ou 0.1%, para se trabalhar como parâmetro crítico para o número de falhas. Em falhas consideradas críticas, costuma-se trabalhar com um percentil bastante baixo, tal como 0.01%, adotado pela indústria aeroespacial para falhas catastróficas.

2.3 Conceito de modo de falha

Como explicado anteriormente, a RCM define o modo de falha como qualquer evento que causa uma falha funcional. Tal conceito é importante na definição da escala de tempo adotada na análise quantitativa da confiabilidade (falha do transformador após “x” horas, falha do disjuntor após “y” ciclos de operação). A utilização do modelo de Weibull requer que a análise da falha funcional seja feita para cada modo de falha, o que evita distorções como *outliers* e *doglegs*.

2.4 Uso de suspensões

Em uma amostra, nem todos os elementos necessariamente vão apresentar falha, ou a falha pode não corresponder àquela de interesse na análise. A isso é dado o nome de *suspensão*. O uso da suspensão enriquece o registro, pois nos fornece informação mais precisa sobre os equipamentos analisados. A presença de

suspensões numa amostra pode alterar o valor do parâmetro de vida característica η , mas pouco afetará o parâmetro β .

2.5 Formatos de Registros de Ocorrência

Os formatos mais comuns de histórico de falhas são a lista de ocorrências e a lista de intervalos. O primeiro formato dispõe as ocorrências com a informação dos momentos (ciclos) em que foram registradas e a informação do tipo de ocorrência (falha ou suspensão), como é mostrado na tabela 1. O segundo formato lista uma série de intervalos de tempo, conforme tabela 2. Cada um deles contém o registro do momento inicial, do momento final, e quantas falhas e suspensões ocorreram entre eles. O histórico em intervalos nos fornece uma informação menos precisa sobre as ocorrências, já que não determina o momento exato. Mesmo assim esse formato é o mais comum, visto que muitas falhas somente são descobertas na inspeção periódica.

TABELA 1 – Exemplo de registro de ocorrências

Número de Ordem	Instante da Ocorrência (h)	Tipo
1	1500	Falha
2	1750	Suspensão
3	2250	Falha
4	4000	Falha
5	4300	Falha
6	5000	Suspensão
7	7000	Falha

TABELA 2 – Exemplo de registro por intervalos

Ciclo de Ocorrência (Quilometragem)	Suspensões	Falhas
0 < d ≤ 2000	18	3
2000 < d ≤ 4000	26	4
4000 < d ≤ 6000	17	3
6000 < d ≤ 8000	16	2
8000 < d ≤ 10000	7	1
10000 < d ≤ 12000	3	-

3.0 - CÁLCULO DOS PARÂMETROS

A estimativa dos parâmetros na distribuição de Weibull pode ser realizada através de um método gráfico, mais usual, ou através de um processo iterativo que maximize uma função de máxima verossimilhança, método MLE. Para o primeiro método é usado um gráfico com escalas específicas, logarítmica no eixo das abscissas (eixo do tempo) e dupla logarítmica no eixo das ordenadas (eixo da probabilidade). A equação da CDF pode ser visualizada neste gráfico como uma reta (figuras 3 e 4). O eixo das abscissas é definido por:

$$x = \ln(t)$$

e o eixo das ordenadas como

$$y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right)$$

Neste método, as falhas são marcadas como pontos no gráfico, depois de passarem por um ajuste, devido à presença das suspensões, e calculadas suas respectivas probabilidades acumuladas. O valor dessa probabilidade pode ser obtido por meio de tabelas e fórmulas estatísticas. Entre os métodos para calcular essa probabilidade, pode-se citar o Posto Mediano, Fórmula de Hazen, *Probit*, entre outros.

Depois de calculados e marcados esses pontos no gráfico, procura-se a reta que passe entre eles com o menor distanciamento médio. O traçado da reta poderia ser aproximado apenas visualmente, ou matematicamente por meio de regressão linear. É possível também medir o grau da relação de linearidade que os pontos possuem entre si, por meio do cálculo do coeficiente de correlação r .

A equação da reta pode ser reescrita como $y = \beta x - \beta \ln(\eta)$, onde o coeficiente angular da reta é β e sua interseção com o eixo das ordenadas é $-\beta \ln(\eta)$. Assim, por esse método, os parâmetros β e η podem ser obtidos diretamente do gráfico.

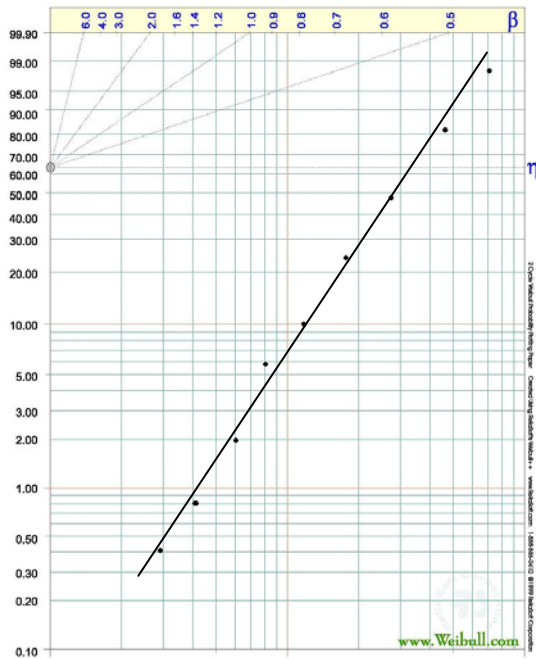


FIGURA 3 - Exemplo de distribuição de Weibull em folha específica

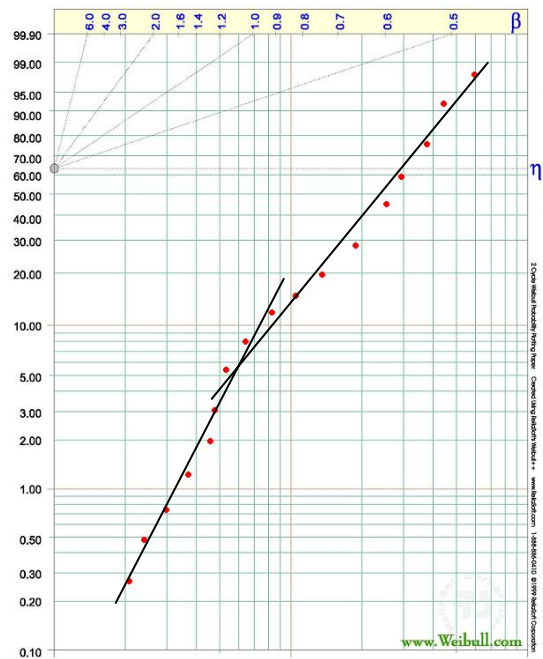


FIGURA 4 - Exemplo de distribuição com indicativo de dois modos de falha - presença de *dog/leg*

Já no método iterativo, os parâmetros são estimados através da maximização das funções a seguir:

$$L(t, \beta, \eta) = \prod_{i=1}^N [f(t_i)]^q [1 - F(t_i)]^{1-q},$$

para ocorrências e

$$L(t, \beta, \eta) = \prod_{i=1}^N [F(t_i) - F(t_{i-1})]^q [1 - F(t_i)]^{1-q},$$

para dados em forma de intervalos, onde N é o número total de ocorrências, t_i o tempo final do intervalo, t_{i-1} o tempo inicial e $q = 1$ para falhas e 0 para suspensões.

Esse método é bastante preciso para amostras de tamanho médio e grande, porém não fornece uma visualização gráfica imediata da análise.

4.0 - IMPLEMENTAÇÃO

4.1 Programa ConWeib

O programa desenvolvido pelo Cepel, denominado ConWeib (Confiabilidade Weibull), permite a estimativa dos parâmetros das principais distribuições estatísticas (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 o gráfico da função Weibull e da reta que modela a distribuição (figuras 5).

5.0 - VALIDAÇÃO

5.1 Casos de teste

Procurou-se validar a metodologia, analisando-se um caso real encontrado na literatura, onde se buscou determinar, precocemente, parâmetros de interesse para o cálculo de risco de falha e vida útil, comparando-se essas previsões com os valores observados. Partindo-se de uma mesma amostra, composta por 202 equipamentos observáveis, foram consideradas as falhas e suspensões ocorridas até determinado instante t_1 , anterior ao período original T (2150h) relatado na literatura. Assim, usando-se o programa ConWeib, foram estudados dois casos, cujos respectivos números de falhas e suspensões são apresentados a seguir:

5.1.1 Primeiro caso

São 202 unidades, ocorrendo 5 falhas e 197 suspensões. A última falha ocorre na hora 1013 e a observação da amostra é conduzida até a hora 1050 (t_1).

TABELA 3 – Caso 1: falhas da segunda amostra modificada

Falhas (h)
708
828
884
884
1013

TABELA 4 – Caso 1: suspensões da segunda amostra modificada

Suspensões (intervalos de 100 h)		
250 x 2	550 x 2	650 x 2
750 x 9	850 x 23	950 x 27
1050 x 132		

5.1.2 Segundo caso

São 202 unidades, ocorrendo 7 falhas e 195 suspensões. A última falha ocorre na hora 1105 e a observação da amostra é conduzida até a hora 1150 (t_1).

TABELA 5 – Caso 2: falhas da primeira amostra modificada

Falhas (h)
708
828
884
884
1013
1082
1105

TABELA 6 – Caso 2: suspensões da primeira amostra modificada

Suspensões (intervalos de 100 h)		
250 x 2	550 x 2	650 x 2
750 x 9	850 x 23	950 x 27
1050 x 20	1150 x 110	

5.1.3 Terceiro caso (original)

São 202 unidades, sendo 10 falhas e 192 suspensões. A última falha ocorre na hora 1251 e a última suspensão ocorre na hora 2150.

TABELA 7 – Caso 3: falhas da amostra original

Falhas (h)
708
828
884
884
1013
1082
1105
1198
1249
1251

TABELA 8 – Caso 3: suspensões da amostra original

Suspensões (intervalos de 100 h)		
250 x 2	550 x 2	650 x 2
750 x 9	850 x 23	950 x 27
1050 x 20	1150 x 22	1250 x 22
1350 x 11	1450 x 11	1550 x 20
1650 x 8	1750 x 4	1850 x 2
1950 x 3	2050 x 3	2150 x 1

5.2 Resultados

Os valores encontrados nas análises dos casos com $t_1 < T$ mantiveram-se próximos aos valores do caso original. O valor de β acima de 5 nos três casos indica uma amostra em período de envelhecimento rápido, com taxa de falha crescente ao longo do tempo. Os resultados estão dispostos na tabela 9. Comparando-se os valores obtidos para o percentil 10, como sugere Weibull para esses casos, verificam-se erros inferiores a 10%, o que é bastante razoável, considerando-se que a metodologia proposta foi aplicada sobre um número pequeno de ocorrências, e as previsões foram realizadas com cerca da metade das horas o histórico original.

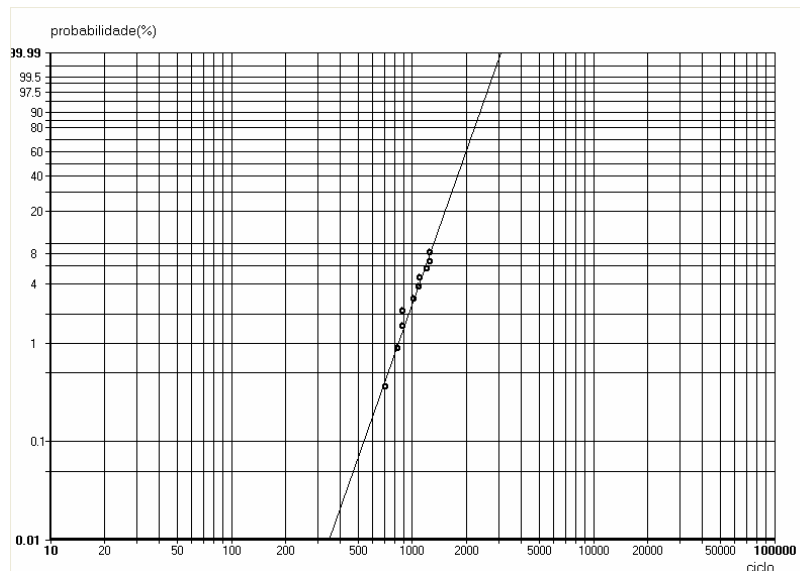


FIGURA 7 – Caso original

6.0 - CONCLUSÕES

A metodologia Weibull apresenta-se como uma ferramenta bastante adequada para a aplicação nos estudos de confiabilidade do Setor Elétrico. Os altos custos das falhas em equipamentos elétricos e o alto nível de confiabilidade requerido em SE's, fazem com que o número de ocorrências seja bem reduzido, exigindo um método estatístico não convencional para a análise dos riscos de falhas. A técnica descrita neste trabalho é capaz de fornecer resultados a partir de uma amostra com poucas ocorrências. É válido ressaltar também a importância de se levantar históricos de falhas de equipamentos nas suas condições operacionais locais, a fim de aproximar os resultados das análises à realidade do Setor Elétrico Brasileiro.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ABERNETHY, R. B. *The New Weibull Handbook*, 4th ed., 2000.
- (2) DOMINGUES, L. A. *et al.* "Avaliação de Confiabilidade de Subestações", 4^o *Simpósio Internacional de Confiabilidade*, Salvador, BA, 2006.
- (3) ARRUDA, C. K. *et al.* "Metodologia para Cálculo do Índice de Robustez de Subestações – Projeto Piloto – Subestação Coxipó (MT)", XIX *SNPTEE*, Rio de Janeiro, RJ, 2007.
- (4) BILLINTON, R., RINGLEE, R. J., WOOD, A. J. *Power-System Reliability Calculations*, MIT Press, 1973.
- (5) BILLINTON, R., ALLAN, R. N. *Reliability Evaluation of Engineering Systems*, 2nd ed., Plenum Press, 1992.
- (6) "Reliability Engineering and Weibull Analysis Resources", <http://www.weibull.com>.
- (7) RELIASOFT, *Weibull++ 7 Life Data Analysis Reference*, Reliasoft Publishing, 2005.
- (8) MARQUART, T. A. "Comparison of Methods for Interval Data Using Monte Carlo Simulations"
- (9) CAMARGO, C. C. B. *Confiabilidade Aplicada a Sistemas de Potência Elétrica*, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1981.